Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



URŠKA DREŠČEK

KONCEPTUALNI MODEL ZA ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI 3D-MODELOV STAVB NA TEMELJU FOTOGRAMETRIČNEGA OBLAKA TOČK

DOKTORSKA DISERTACIJA

INTERDISCIPLINARNI DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM TRETJE STOPNJE GRAJENO OKOLJE

Ljubljana, 2021

Hrbtna stran: **DREŠČEK URŠKA** 2021

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova *cesta* 2
1000 Ljubljana,Slovenija
telefon (01) 47 68 500 faks
(01) 42 50 681
tajnistvo@fgg.uni-lj.si

INTERDISCIPLINARNI DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM III. STOPNJE GRAJENO OKOLJE

Doktorand/-ka:
URŠKA DREŠČEK

KONCEPTUALNI MODEL ZA ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI 3D-MODELOV STAVB NA TEMELJU FOTOGRAMETRIČNEGA OBLAKA TOČK

DOKTORSKA DISERTACIJA

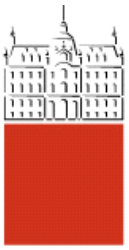
A CONCEPTUAL MODEL FOR QUALITY ASSURANCE OF 3D BUILDING MODELS BASED ON A PHOTOGRAMMETRIC POINT CLOUD

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, 2021

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Mentor/-ica: izr. prof. dr. Anka Lisec, UL FGG

Somentor/-ica: doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG

Poročevalci za oceno doktorske disertacije:

- doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, UL FGG
- doc. dr. Mihaela Triglav Čekada, UL FGG in GIS
- doc. dr. Žiga Kokalj, ZRC SAZU

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: **004.932:528.7:721(043)**
Avtor: **Urška Drešček, univ. dipl. inž. geod.**
Mentor: **izr. prof. dr. Anka Lisec**
Somentor: **doc. dr. Mojca Kosmatin Fras**
Naslov: **Konceptualni model za zagotavljanje kakovosti 3D-modelov stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk**
Tip dokumenta: **Doktorska disertacija**
Obseg in oprema: **180 str., 23 pregl., 55 sl., 6 en.**
Ključne besede: **prostorski podatki, kakovost podatkov, konceptualni model, procesni model, UAV, daljinsko vodeni letalnik, oblak točk, 3D-modeliranje, 3D-model stavbe, CityGML**

Izvleček

V doktorski disertaciji se ukvarjamo s področjem spremljanja in zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov, natančneje s kakovostjo podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk, pridobljenega iz fotografij, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom. Ker se daljinsko vodeni letalniki vse širše uporabljajo za zajem prostorskih podatkov, je vprašanje zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov pri tem aktualna raziskovalna in strokovna tema. V raziskavi smo na podlagi literature podrobno analizirali postopke zajema, obdelave in modeliranja prostorskih podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, za pridobitev topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavb. Izdelali smo procesni model, s katerim smo prepoznavali ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov v celotnem postopku obdelave podatkov in 3D-modeliranja. Ob poznavanju teh dejavnikov smo zasnovali konceptualni model za zagotavljanje kakovosti podatkov v obravnavanem procesu. Na podlagi konceptualnega modela smo razširili procesni model s postopki za sprotno spremljanje kakovosti vmesnih rezultatov procesa 3D-modeliranja stavb. Razviti procesni model, ki poleg postopkov obdelave podatkov vključuje tudi postopke preverjanja kakovosti, je pomembna novost na obravnavanem raziskovalnem področju in pregledno predstavlja vse faze od zajema UAV-podatkov do končnega 3D-modela stavbe. V eksperimentalnem delu naloge smo za podatke na dveh študijskih območjih preizkusili predlagani konceptualni in procesni model. Nadalje smo preverili vplive izbranih dejavnikov na kakovost vmesnih rezultatov procesa in končnega 3D-modela stavb. Pomembni prispevki disertacije so, poleg celovite obravnave procesa 3D-modeliranja stavb iz podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, in podrobnega procesnega modela s postopki preverjanja kakovosti, še analiza vpliva izbranih dejavnikov in verifikacija predlaganih korakov za spremljanje kakovosti rezultatov obdelave podatkov.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	**004.932:528.7:721(043)**
Author:	**Urška Drešček, Geod. Eng.**
Supervisor:	**Assoc. Prof. Anka Lisec, Ph.D.**
Co-supervisor:	**Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.**
Title:	**A Conceptual Model for Quality Assurance of 3D Building Models Based on a Photogrammetric Point Cloud**
Document type:	**Doctoral dissertation**
Scope and tools:	**180 p., 23 tab., 55 fig., 6 eq.**
Keywords:	**spatial data, data quality, conceptual model, process model, UAV, remotely piloted aerial systems, point cloud, 3D modelling, 3D building model, CityGML**

Abstract

This doctoral dissertation deals with spatial data quality monitoring and assurance, more specifically with the quality of data in the process of 3D building modelling from photogrammetric point cloud obtained from imagery acquired by an unmanned aerial vehicle (UAV). As UAVs are increasingly used to acquire spatial data, ensuring spatial data quality is an emerging relevant topic. Based on the literature review, we thoroughly analysed the procedures for spatial data acquisition, processing and modelling acquired by a UAV to obtain a topologically correct 3D building model in a vector form. We developed a process model to identify critical factors that affect data quality throughout data processing and modelling. Based on the identified factors, we designed a conceptual model for spatial data quality assurance within the whole process. Considering the conceptual model, the process model has been expanded by integrating data quality procedures for controlling the quality of intermediate results within the 3D building modelling process. The developed process model, which includes both data processing and quality managing, is an important research achievement that transparently presents all data-modelling phases from the UAV data acquisition to the final 3D building model. In the experimental part, the conceptual and process model have been verified for datasets in two study areas. Here, we have further analysed the influence of selected factors on the quality of the intermediate results of data processing and the final 3D building model. Besides the comprehensive study of 3D building modelling based on UAV data and a detailed process model for data modelling, the research contributions are to be seen in the impact analysis of the selected factors and verification of the detailed process model with data-quality monitoring.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Ob zaključevanju doktorske disertacije bi se rada zahvalila vsem, ki so mi na tej poti pomagali in mi stali ob strani.

Zahvaljujem se mentoricama, izr. prof. dr. Anki Lisec in doc. dr. Mojci Kosmatin Fras. Anka, hvala za ponujeno priložnost za vstop v raziskovalne kroge, za vse napotke in usmeritve, za pozitivno energijo ter dobre razmere za delo v vseh štirih letih mojega mladega raziskovanja. Mojca, hvala za vse koristne nasvete, natančne preglede in konstruktivne komentarje.

Hvala sodelavcem s katedre in oddelka za prijetno vzdušje ter ustvarjalno okolje. Jernej, hvala za uporabne ideje, pojasnila in rešitve, od preddiplomskih izzivov do kasnejših iskanj pravih »transformerjev«. Barbara, hvala za vse življenjske nasvete. Miran, hvala za jutranjo kavo. In seveda vsi ostali, ki ste mi kakor koli pomagali in poskrbeli, da mi ni bilo težko prihajati v službo.

Klemen, hvala za zajem podatkov z letalnikom. Dejan, hvala za raznovrstne fotogrametrične nasvete. Tilen, hvala za opravljene dodatne meritve.

Zahvaljujem se dobrim prijateljem za spodbudne besede. Čeprav smo se v zadnjih letih redkeje srečevali, so mi tudi ti trenutki sprostitve pomagali, da sem na točki, kjer sem.

Ob koncu bi se zahvalila tistim, ki so mi najbližje. Hvala mami in očetu, da sta mi v življenju omogočila, kar sem si želela in potrebovala, mi zagotavljala podporo in spodbudo, ko je bilo to potrebno. Andraž, hvala za vse spodbudne besede in bratske nasvete. Hvala tudi Martinovim za podporo.

Zadnja, a največja zahvala tebi, Martin. Hvala, da si mi vedno stal ob strani, me spodbujal in poskrbel za tisto, česar sama nisem zmogla. S tabo je vse lažje in lepše, skupaj zmoreva vse!

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT V
ZAHVALA VII
KAZALO VSEBINE IX
KAZALO PREGLEDNIC XIII
KAZALO SLIK XV
LIST OF TABLES XIX
LIST OF FIGURES XXI
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI XXV

1 UVOD 1

1.1 Opredelitev problema 2

1.2 Raziskovalne hipoteze in cilji naloge 4

1.3 Struktura disertacije 5

2 TEORETIČNO OZADJE 9

2.1 Kakovost prostorskih podatkov 9

2.1.1 Mednarodni in slovenski standard SIST EN ISO 19157:2015 10

2.1.2 Standardizacija na področju fotogrametričnih izdelkov 13

2.2 UAV-fotogrametrija 15

2.2.1 Vrste snemalnih sistemov 16

2.2.2 Sestava in način delovanja sistema 18

2.2.3 Procesni koraki v UAV-fotogrametriji 19

2.2.4 Uporaba UAV-fotogrametrije 21

2.3 3D-modeliranje v GIS 22

2.3.1 OGC CityGML 24

2.3.2 Prostorski podatki za 3D-modeliranje stavb 29

3 METODOLOGIJA IN VIRI PODATKOV 33

3.1 Študij literature 33

3.2 Procesno modeliranje in razvoj konceptualnega modela za spremljanje kakovosti 34

3.3 Verifikacija konceptualnega modela za spremljanje kakovosti 34
3.3.1 Študijska območja 35
3.3.2 Obdelava podatkov 37
3.3.3 3D-modeliranje 38
3.4 Ocena kakovosti 39
4 ANALIZA DEJAVNIKOV, KI VPLIVAJO NA KAKOVOST 43
4.1 Dejavniki vpliva na kakovost pri zajemu podatkov 43
4.1.1 Dejavniki vpliva, povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij 45
4.1.2 Dejavniki vpliva, ki so povezani s snemalno misijo 55
4.1.3 Dejavniki vpliva, ki so povezani s posrednim georeferenciranjem oblaka točk 62
4.2 Dejavniki vpliva na kakovost pri obdelavi podatkov 68
4.2.1 Obdelava fotografij 68
4.2.2 Obdelava fotogrametričnega oblaka točk 75
4.3 Dejavniki vpliva na kakovost pri 3D-modeliranju stavb 78
4.3.1 Prepoznavanje stavb in določitev oboda stavb 80
4.3.2 Izdelava 3D-modela stavbe 82
4.4 Razprava glede dejavnikov, ki vplivajo na kakovost 3D-modeliranja stavb 86
5 KONCEPTUALNI MODEL ZA SPREMLJANJE KAKOVOSTI 91
5.1 Procesni model in zasnova modela za spremljanje kakovosti 91
5.1.1 Faza zajema podatkov 93
5.1.2 Faza obdelave podatkov 94
5.1.3 Faza 3D-modeliranja 96
5.2 Podroben model za spremljanje kakovosti 98
6 REZULTATI EKSPERIMENTALNEGA DELA RAZISKAVE 101
6.1 Obdelava podatkov in 3D-modeliranje stavb 101
6.2 Preizkus modela za spremljanje kakovosti 3D-modeliranja stavb na podlagi UAV-podatkov 105
6.2.1 Rezultati 3D-modeliranja na študijskem območju Kandrše 105
6.2.2 Rezultati 3D-modeliranja na študijskem območju Vače 115

6.3 Analiza vpliva izbranih dejavnikov na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk 124
6.3.1 Vpliv višine leta ... 126
6.3.2 Vpliv prekrivanja fotografij ... 128
6.3.3 Vpliv števila oslonilnih točk ... 129
6.4 Analiza vpliva izbranih dejavnikov na kakovost 3D-modela stavb ... 133
6.4.1 Vpliv višine leta ... 135
6.4.2 Vpliv prekrivanja fotografij ... 137
6.4.3 Analiza vpliva gostote oblaka točk na določitev oboda stavbe ... 139
6.5 Razprava ... 144
7 ZAKLJUČEK ... 151
7.1 Vrednotenje raziskovalnih hipotez in ciljev ... 151
7.2 Prispevek k znanosti ... 154
7.3 Priložnosti za nove raziskave ... 155
8 POVZETEK ... 157
9 SUMMARY ... 161
VIRI ... 165

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Lastnosti delovanja platforme za letalnike kategorij nano, mikro in mini (povzeto po Everaerts, 2009). ... 16
Preglednica 2: OGC CityGML 2.0 stopnje podrobnosti (LOD0-LOD4) s predlagano točnostjo podatkov (Open Geospatial Consortium, 2012). ... 27
Preglednica 3: Elementi kakovosti prostorskih podatkov, ki jih analiziramo v posameznih fazah predlaganega modela za zagotavljanje kakovosti pri 3D-modeliranju stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk. ... 99
Preglednica 4: Lastnosti digitalnega fotoaparata, s katerim smo zajeli podatke na študijskem območju Kandrše. ... 105
Preglednica 5: Parametri leta daljinsko vodenega letalnika za UAV-izmero na študijskem območju Kandrše. ... 106
Preglednica 6: Parametri, uporabljeni za generiranje obodov stavb na študijskem območju Kandrše. ... 110
Preglednica 7: Ocenjena položajna točnost 2D-obodov stavb na študijskem območju Kandrše. ... 111
Preglednica 8: Nastavitve algoritma *Efficient RANSAC* za prepoznavanje ravnin v oblaku točk. ... 112
Preglednica 9: Lastnosti digitalnega fotoaparata, s katerim smo zajeli podatke na študijskem območju Vače. ... 116
Preglednica 10: Parametri leta daljinsko vodenega letalnika za UAV-izmero na študijskem območju Vače. ... 116
Preglednica 11: Parametri, uporabljeni za generiranje obodov stavb na študijskem območju Vače. 121
Preglednica 12: Ocenjena relativna položajna točnost generiranih 2D-obodov stavb. ... 122
Preglednica 13: Nastavitve algoritma *Efficient RANSAC* za prepoznavanje ravnin v oblaku točk – Vače (glej tudi Drešček et al., 2020). ... 122
Preglednica 14: Nastavitve parametrov leta, ki smo jih spreminjali med snemalnimi serijami. ... 125
Preglednica 15: Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah (OT) in kontrolnih točkah (KT) po georeferenciranju v odvisnosti od višine snemanja. ... 127
Preglednica 16: Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah (OT) in kontrolnih točkah (KT) po georeferenciranju v odvisnosti od prekrivanja fotografij. ... 129
Preglednica 17: Število oslonilnih točk (OT) in kontrolnih točk (KT), ki so bile uporabljene v analizi položajne točnosti oblaka točk. ... 130
Preglednica 18: Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah (OT) in kontrolnih točkah (KT) po georeferenciranju v odvisnosti od števila oslonilnih točk. ... 132
Preglednica 19: Statistične ocene položajnih razlik med rekonstruiranim in referenčnim modelom v odvisnosti od snemalne višine. ... 135

Preglednica 20: Statistične ocene odstopanj med rekonstruiranim in referenčnim modelom v odvisnosti od prekrivanja med fotografijami. 137
Preglednica 21: Parametri, uporabljeni za generiranje obodov za izbrano stavbo. 141
Preglednica 22: Relativna položajna točnost izdelanih 2D-obodov stavbe glede na položaj referenčnega oboda. 142
Preglednica 23: Površina 2D-obodov stavbe v odvisnosti od oddaljenosti med točkami..... 144

KAZALO SLIK

Slika 1: Elementi kakovosti prostorskih podatkov, opredeljeni v standardu SIST EN ISO 19157:2015 (SIST, 2015). 12
Slika 2: Vrste letalnikov glede na doseg in najvišjo možno višino leta nad terenom (povzeto po Eisenbeiss, 2009). 17
Slika 3: Primer dveh vrst letalnikov glede na izvedbo kril: (a) letalnik s fiksnimi krili (C-Astral, 2019), (b) letalnik z rotorji (vir slikovnega gradiva: U. Drešček). 17
Slika 4: Potek priprave, zajema in obdelave fotogrametričnih podatkov v postopku UAV-fotogrametrije. 20
Slika 5: Tipi predstavitve 3D-modelov: (a) žični model, (b) ploskovni model, (c) prostorninski model. 24
Slika 6: Stopnje podrobnosti (LOD), ki so določene v standardu OGC CityGML 2.0 (Open Geospatial Consortium, 2012). 26
Slika 7: Primeri vhodnih podatkov za 3D-modeliranje stavb: (a) klasificiran aero laserski oblak točk, (b) fotogrametrični oblak točk, (c) digitalni model površja, (d) ortofoto. 30
Slika 8: Študijsko območje Kandrše. 36
Slika 9: Študijsko območje Vače. 37
Slika 10: Površina zajetega območja na terenu v odvisnosti od velikosti goriščne razdalje (c). 46
Slika 11: Zgradba in delovanje senzorjev CCD ter senzorjev CMOS. Skica je povzeta po von Fintel (2015). 47
Slika 12: Razmerje med slikovnimi in objektnimi koordinatami točke (Kraus, 2007). 50
Slika 13: Shematski prikaz dveh primerov geometrije bloka posnetkov: (a) »šibka« geometrija, kjer imajo posnetki medsebojno vzporedne osi, (b) »močna« geometrija, kjer so osi posnetkov med seboj konvergentne. 52
Slika 14: Vpliv višine leta na prostorsko ločljivost posnetka ob uporabi enakega slikovnega senzorja. 57
Slika 15: Vzdolžno (levo) in prečno (desno) prekrivanje fotografij. 59
Slika 16: Različni načini zajema fotografij, ki določajo geometrijo bloka fotografij: (a) osnovna smer leta letalnika; (b) osnovnemu preletu letalnika je dodan prečni prelet na drugačni višini; (c) geometrijo mreže sestavljajo zgolj nadirne fotografije; (d) nadirnim fotografijam dodamo poševne fotografije. 62
Slika 17: Primerjava posrednega in neposrednega georeferenciranja (povzeto po Mian et al., 2015). 63
Slika 18: Primeri enakomerne razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk po snemalnem območju v odvisnosti od njegove velikosti in oblike. 67
Slika 19: Zajem fotografij za uporabo v SfM-MVS fotogrametriji (povzeto po Piermattei, 2016). 70
Slika 20: Splošni koraki v postopku strukture iz gibanja (Furukawa in Hernández, 2013). 71

Slika 21: Procesni model 3D-modeliranja stavb na osnovi UAV-fotogrametričnega oblaka točk, prikazan v obliki UML-diagrama aktivnosti. 91
Slika 22: Posplošena shema konceptualnega modela za zagotavljanje kakovosti pri 3D-modeliranju stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk..... 92
Slika 23: Del procesnega modela, ki vključuje zajem podatkov z uporabo letalnika (UAV), s predlogom za nadzor kakovosti. 93
Slika 24: Del procesnega modela, ki obsega izmero podatkov za georeferenciranje, s predlogom za nadzor kakovosti. 94
Slika 25: Del procesnega modela, ki vključuje obdelavo podatkov z algoritmi strukture iz gibanja in gostega slikovnega ujemanja, s predlogom za nadzor kakovosti. 95
Slika 26: Del procesnega modela, ki vključuje segmentacijo in klasifikacijo oblaka točk, s predlogom za nadzor kakovosti. 96
Slika 27: Del procesnega modela, ki vključuje prepoznavanje stavbe in rekonstrukcijo 3D-modela, s predlogom za nadzor kakovosti. 97
Slika 28: Celoten UML-diagram aktivnosti za proces 3D-modeliranja stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk s predlaganimi koraki za spremljanje kakovosti. 98
Slika 29: Nestrukturiran fotogrametrični oblak točk. 102
Slika 30: Prilegajoče se 3D-ploskve v oblak točk za izbrano stavbo. 102
Slika 31: Procesni model za določitev oboda stavbe, izdelan v prostorskem ETL (objavljeno v angleškem jeziku v Dreščk et al., 2020). 103
Slika 32: Shema procesnega modela za 3D-modeliranje stavb v prostorskem ETL (objavljeno v angleškem jeziku v Dreščk et al., 2020). 104
Slika 33: Procesni koraki obdelave UAV-fotografij in izdelave 3D-modela stavb (objavljeno v angleškem jeziku v Dreščk et al., 2020) 104
Slika 34: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na študijskem območju Kandrše. 107
Slika 35: Fotogrametrični oblak točk za del študijskega območja Kandrše, kjer smo izvedli 3D-modeliranje stavb. 108
Slika 36: Prepoznavanje stavb: (a) določitev ravnih površin z izračunom spremenljivosti površja, rdeče so obarvane točke z visoko spremenljivostjo, ki smo jih izločili iz oblaka točk; (b) prepoznane tri povezane komponente: teren (modro), stanovanjska hiša (rdeče), gospodarski objekt (zeleno). 109
Slika 37: Vhodni podatki in vmesni ter končni rezultati postopka izdelave 2D-oboda izbrane stavbe: (a) vhodni fotogrametrični oblak točk v tlorisnem pogledu; (b) konkavni poligon; (c) generaliziran poligon; (d) regulariziran poligon brez »lukenj«, ki je rezultat postopka prepoznavanja stavb in generiranja oboda. 110
Slika 38: Prepoznane 3D-ravnine strehe: (a) stanovanjska hiša; (b) gospodarski objekt. 112

Slika 39: Končna 3D-modela dveh izbranih stavb, skladna s standardom OGC CityGML (LOD2), za študijsko območje Kandrše. 113
Slika 40: Položajne razlike med izdelanim 3D-modelom stavb in vhodnim oblakom točk na študijskem območju Kandrše. 114
Slika 41: Položajne razlike med izdelanim in referenčnim 3D-modelom stavb na študijskem območju Kandrše: (a) pogled od spredaj; (b) pogled od zadaj. 115
Slika 42: Razporeditev devetih oslonilnih točk na študijskem območju Vače. 117
Slika 43: Fotogrametrični oblak točk za štiri stavbe, ki smo jih izbrali za 3D-modeliranje na študijskem območju Vače: (a) stavba z enokapno streho; (b) stavba z dvokapno streho; (c) stavba s »križno« dvokapno streho; (d) stavba z dvokapno streho v dveh nivojih (Dreščk et al., 2020). 119
Slika 44: Izračunane vrednosti spremenljivosti površja: rdeča barva označuje točke z višjo spremenljivostjo površja (točke vegetacije); modra-rumena-zelena barva označujejo točke z nižjo spremenljivostjo površja (točke na ravnih površinah) (Dreščk et al., 2020). 120
Slika 45: Izračunane povezane komponente: (a) največja komponenta določa teren; (b) naslednjih 14 komponent opisuje stavbe ali dele stavb (Dreščk et al., 2020). 120
Slika 46: 2D-obod izbranih stavb: (a) stavba z enokapno streho; (b) stavba z dvokapno streho; (c) stavba s »križno« dvokapno streho; (d) stavba z dvokapno streho v dveh nivojih (Dreščk et al., 2020). 121
Slika 47: Končni 3D-modeli stavb, skladni s standardom OGC CityGML (LOD2): (a) stavba z enokapno streho; (b) stavba z dvokapno streho; (c) stavba s »križno« dvokapno streho; (d) stavba z dvokapno streho v dveh nivojih (Dreščk et al., 2020). 123
Slika 48: Položajne razlike med rekonstruiranim 3D-modelom stavb in vhodnim oblakom točk na študijskem območju Vače (Dreščk et al., 2020). 124
Slika 49: Število in razporeditev oslonilnih točk (OT) ter kontrolnih točk (KT) na študijskem območju Kandrše: (a) 1. primer razporeditve: 6 OT, 31 KT; (b) 2. primer razporeditve: 19 OT, 18 KT; (c) 3. primer razporeditve: 32 OT, 5 KT. 131
Slika 50: Položajne razlike rekonstruiranih 3D-modelov od referenčnih modelov: (a) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij z načrtovane višine 35 metrov; (b) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij z višine 50 metrov. 136
Slika 51: Položajna odstopanja rekonstruiranih 3D-modelov od referenčnih modelov: (a) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij s prekrivanjem 80 %/70 %; (b) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij s prekrivanjem 85 %/75 %. 138
Slika 52: Izbrana stavba za analizo položajne točnosti izdelanega 2D-oboda stavbe. 139
Slika 53: Grafikon položajne točnosti ($RMSE_{2D}$) ocenjevanih 2D-obodov stavb v odvisnosti od oddaljenosti med točkami v oblaku točk. 142

Slika 54: Primerjava med obodi stavb, ki so bili izdelani iz oblakov točk z različno gostoto točk. ... 143
Slika 55: Proces 3D-modeliranja stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk (črno) in koraki obrnjenega inženirstva za določitev kakovosti posameznih faz procesa 3D-modeliranja (rdeče). 149

LIST OF TABLES

Table 1: The operation properties of UAV platforms for the categories nano, micro, and mini (adopted from Everaerts, 2009). 16
Table 2: OGC CityGML 2.0 levels of detail (LOD0-LOD4) with proposed data accuracy (Open Geospatial Consortium, 2012). 27
Table 3: Spatial data quality elements, which are analysed in the specific phases of the proposed model for ensuring quality in the 3D building modelling based on the UAV photogrammetric point cloud. 99
Table 4: The specifications of the digital camera used for data acquisition in the study area Kandrše. 105
Table 5: Parameters of the unmanned aerial vehicle (UAV) flight for the study area Kandrše. 106
Table 6: Parameters used for building outline extraction in the study area Kandrše. 110
Table 7: The assessed positional accuracy of the extracted 2D roof outlines in the study area Kandrše. 111
Table 8: The parameters of the efficient RANSAC for roof patches detection. 112
Table 9: The specifications of the digital camera used for data acquisition in the study area Vače. 116
Table 10: Parameters of the unmanned aerial vehicle (UAV) flight for the study area Vače. 116
Table 11: Parameters used for building outline extraction in the study area Vače. 121
Table 12: The assessed relative positional accuracy of the extracted 2D building outlines. 122
Table 13: The parameters of the efficient RANSAC for roof patches detection – Vače (see also Drešček et al., 2020). 122
Table 14: The parameters of UAV flight, which were altered between flight missions. 125
Table 15: The *RMSE* values at ground control points and check points after georeferencing with respect to the altitude above ground level. 127
Table 16: The *RMSE* values at ground control points and check points after georeferencing with respect to the image overlap. 129
Table 17: Number of ground control points (GCPs) and check points (CPs) used in the analysis of the positional accuracy of the point cloud. 130
Table 18: The *RMSE* values at ground control points and check points after georeferencing with respect to the number of ground control points. 132
Table 19: The statistic assessment of distances between reconstructed and reference 3D-models with respect to the flight altitude. 135
Table 20: The statistical assessment of distances between reconstructed and reference 3D-models with respect to the image overlap. 137
Table 21: Parameters used for building outline extraction for selected building. 141

Table 22: The relative positional accuracy of the extracted 2D building outlines with respect to the reference outline..... 142
Table 23: The area of 2D building outline with respect to point spacing in the point cloud. 144

LIST OF FIGURES

Figure 1: Elements of spatial data quality as defined in the SIST EN ISO 19157:2015 standard (SIST, 2015). 12
Figure 2: UAV categories based on flight altitude and flight range (adopted from Eisenbeiss, 2009). 17
Figure 3: Two types of UAV platform differing in the type of wings: (a) a fixed-wing UAV (C-Astral, 2019), (b) a rotary-wing UAV (image source: U. Drešček). 17
Figure 4: The procedure of preparation, acquisition, and processing of photogrammetric data in UAV photogrammetry. 20
Figure 5: Types of 3D-model presentation: (a) the wire-frame model, (b) the surface model, (c) the solid model. 24
Figure 6: The levels of detail (LOD) as defined in the OGC CityGML 2.0 standard (Open Geospatial Consortium, 2012). 26
Figure 7: Examples of input spatial data for 3D building modelling: (a) classified aerial laser scanning point cloud, (b) photogrammetric point cloud, (c) digital surface model, (d) orthophoto imagery. 30
Figure 8: Study area Kandrše. 36
Figure 9: Study area Vače. 37
Figure 10: The area coverage in the field with respect to the value of focal length (c). 46
Figure 11: The structure and operations of CCD and CMOS sensors. The figure is adopted from von Fintel (2015). 47
Figure 12: The relationship between image and object coordinates of a point (Kraus, 2007). 50
Figure 13: Two examples of image block geometry: (a) weak geometry of image block with parallel images, (b) strong geometry of image block where image axis are convergent. 52
Figure 14: The impact of flight altitude on spatial resolution in the case of using the same image sensor. 57
Figure 15: Forward (left) and side (right) image overlap. 59
Figure 16: Different geometry of image acquisition influencing the image block geometry: (a) basic flight direction of UAV, (b) additional flight in the cross direction to basic direction, (c) geometry of image block contains only nadir imagery, (d) nadir image block can be enhanced with oblique imagery. 62
Figure 17: A comparison between indirect and direct georeferencing. The source of the figure: Mian et al. (2015). 63
Figure 18: Examples of even distribution of ground control points over the acquisition field depending on the size and shape of the field. 67

Figure 19: Image acquisition in the case of SfM-MVS photogrammetry (adopted from Piermattei, 2016). 70
Figure 20: The basic steps in the structure-from-motion workflow (Furukawa and Hernández, 2013). 71
Figure 21: The process model of 3D building modelling based on the UAV-photogrammetric point cloud presented by the UML activity diagram. 91
Figure 22: The generalised schema of the conceptual model for ensuring data quality in 3D building modelling based on the UAV photogrammetric point cloud. 92
Figure 23: Part of the process model containing data acquisition using a UAV with the quality control proposal..... 93
Figure 24: Part of the process model containing data acquisition for georeferencing with the quality control proposal..... 94
Figure 25: Part of the process model containing data processing using structure from motion and dense image matching algorithms with the quality control proposal. 95
Figure 26: Part of the process model containing point cloud segmentation and classification the quality control proposal. 96
Figure 27: Part of the process model containing building detection and 3D model reconstruction with the quality control proposal..... 97
Figure 28: The complete UML activity diagram for the process of 3D building modelling based on UAV photogrammetric point cloud with the suggested steps for data quality monitoring. . 98
Figure 29: Unstructured photogrammetric point cloud. 102
Figure 30: Fitted 3D planar patches into the point cloud for the selected building. 102
Figure 31: The process model for building outline extraction developed in the spatial ETL (published in English in Drešček et al., 2020). 103
Figure 32: Schema of the process model for 3D building modelling in the spatial ETL (published in English in Drešček et al., 2020). 104
Figure 33: The steps of UAV imagery processing and 3D building model reconstruction (published in English in Drešček et al., 2020). 104
Figure 34: Configuration of ground control points and check points in the study area Kandrše. 107
Figure 35: Photogrammetric point cloud of the part of the study area Kandrše, where 3D building modelling was performed..... 108
Figure 36: Building detection: (a) defining planar regions by computing surface variation values, red colour denotes points with high surface variation, which were then excluded from the point cloud; (b) three labelled connected components: terrain (blue), residential house (red), auxiliary building (green)..... 109
Figure 37: Input data, intermediate and final results of building outline generation: (a) the input photogrammetric point cloud in the top view; (b) the estimated convex hull; (c)

generalised polygon; (d) the regularised building outline without holes, which is the result of building outline detection and extraction. 110
Figure 38: Detected 3D roof patches: (a) residential house; (b) auxiliary building. 112
Figure 39: Final 3D building models of two selected buildings, in accordance with the OGC CityGML standard (LOD2), from the study area Kandrše. 113
Figure 40: The positional differences between reconstructed 3D building model and the input point cloud in the study area Kandrše. 114
Figure 41: The positional differences between the reconstructed and reference 3D building model in the study area Kandrše: (a) the front view; (b) the back view. 115
Figure 42: Distribution of nine ground control points in the study area Vače. 117
Figure 43: Photogrammetric point clouds of four buildings, which were selected for 3D building modelling in the study area Vače: (a) building with a flat roof; (b) building with a gable roof; (c) building with a cross gable roof; (d) building with a two-level gable roof (Drešček et al., 2020). 119
Figure 44: Computed values of surface variation: red colour denotes points with higher surface variation (point of vegetation); blue-yellow-green colours denote points with lower surface variation (points on flat surfaces) (Drešček et al., 2020). 120
Figure 45: The computed connected components: (a) the largest component defines the terrain; (b) the next 14 components describe buildings or their parts (Drešček et al., 2020). 120
Figure 46: 2D outline of selected buildings: (a) building with a flat roof; (b) building with a gable roof; (c) building with a cross gable roof; (d) building with a two-level gable roof (Drešček et al., 2020). 121
Figure 47: Final 3D building models, in accordance with the OGC CityGML standard (LOD2): (a) building with a flat roof; (b) building with a gable roof; (c) building with a cross gable roof; (d) building with a two-level gable roof (Drešček et al., 2020). 123
Figure 48: The positional differences between the reconstructed 3D building models and the input point cloud in the study area Vače (Drešček et al., 2020). 124
Figure 49: The number and distribution of ground control points (GCPs) and check points (CPs) in the study area Kandrše: (a) 1st configuration: 6 GCPs, 31 CPs; (b) 2nd configuration: 19 GCPs, 18 CPs; (c) 3rd configuration: 32 GCPs, 5 CPs. 131
Figure 50: Positional deviations between the reconstructed 3D models and reference models: (a) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery at the planned fight altitude 35 m; (b) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery at the fight altitude 50 m. 136
Figure 51: Positional deviations between the reconstructed 3D-models and reference models: (a) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery with overlap 80 %/70 %;

(b) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery with overlap 85 %/75 %. 138
Figure 52: The selected building for the analysis of the positional accuracy of the extracted 2D building outline. 139
Figure 53: The graph of the positional accuracy ($RMSE_{2D}$) of the analysed 2D building outlines with respect to the point spacing in the point cloud. 142
Figure 54: The comparison between building outlines extracted from the point clouds with different point cloud density. 143
Figure 55: The 3D building modelling process based on the photogrammetric point cloud (black) and reverse engineering steps for determination of the quality of the specific phases of the modelling process (red). 149

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ALS	Aerolasersko skeniranje (angl. *airborne laser scanning*)
CP	Kontrolne točke (angl. *control points*)
DIM	Gosto slikovno ujemanje (angl. *dense image matching*)
DMP	Digitalni model površja (angl. *digital surface model – DSM*)
DMR	Digitalni model reliefa (angl. *digital terrain model – DTM*)
DMV	Digitalni model višin (angl. *digital elevation model – DEM*)
ETL	*Extract, transform, load* (angl.)
FOV	Zorni kot (angl. *field of view*)
GCP	Oslonilne točke (angl. *ground control points*)
GIS	Geografski informacijski sistem
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistem (angl. *global navigation satellite system*)
GSD	Dolžina talnega intervala (angl. *ground sampling distance*)
IMU	Inercialna merilna enota (angl. *inertial measurement unit*)
ISO	Mednarodna organizacija za standardizacijo (angl. *International Organization for Standardization*)
LOD	Stopnja podrobnosti (angl. *level of detail*)
MLS	Mobilno lasersko skeniranje (angl. *mobile laser scanning*)
MVS	Večslikovno stereo ujemanje (angl. *multi-view stereo*)
OGC	*Open Geospatial Consortium* (angl.)
RMSE	Koren srednjega kvadrata pogreška (angl. *root mean square error*)
RPAS	Daljinsko vodeni letalnik (angl. *remotely piloted aircraft system*)
RTK	Kinematična metoda izmere GNSS v realnem času (angl. *real-time kinematic*)
SfM	Struktura iz gibanja (angl. *structure from motion*)
SGM	*Semi-Global Matching algorithm* (angl.)
SIST	Slovenski inštitut za standardizacijo
UAS	Daljinsko vodeni letalni sistem (angl. *unmanned aerial system*)
UAV	Daljinsko vodeni letalnik (angl. *unmanned aerial vehicle*)
UML	*Unified Modelling Language* (angl.)
TIN	Mreža nepravilnih trikotnikov (angl. *triangulated irregular network*)
TLS	Terestrično lasersko skeniranje (angl. *terrestrial laser scanning*)

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Analiza stanja in procesov v okolju, v katerem živimo, je ključna naloga za uspešno odločanje o nadaljnjih ukrepih pri zagotavljanju učinkovitega in trajnostnega upravljanja prostora. Kakovostni prostorski podatki imajo pri tem pomembno vlogo, saj zagotavljajo podporo za tovrstne analize in podporo odločanju (Malczewski, 1999, 2006; Drobne in Lisec, 2009; Rinner, 2018). Ključen izziv pri zagotavljanju kakovostnih prostorskih in drugih podatkov je vprašanje, kako zagotoviti podatke z ustrezno kakovostjo. To vprašanje je še posebej aktualno pri uporabi novih tehnologij, saj nova strojna in programska oprema omogoča hiter in cenovno ugoden zajem ter obdelavo prostorskih podatkov, a hkrati ne vemo, kaj vse vpliva na kakovost podatkov in kako jo lahko dosežemo.

Prostorski podatki, predvsem podajanje informacije o lokaciji nekega objekta ali pojava, so se v preteklosti najpogosteje obravnavali ločeno za ravninsko in višinsko komponento. Tako so bili tudi v okoljih geografskih informacijskih sistemov (GIS) zajem, obdelava, prikaz in shranjevanje prostorskih podatkov zaradi tehničnih ovir omejeni na dvorazsežno oziroma dvodimenzionalno (2D) obravnavo položaja, medtem ko je bila višina prikazana zgolj posredno, in sicer kot dodaten opisni podatek ali z izbranim grafičnim prikazom. Zaradi vse večje kompleksnosti pojavov v prostoru, v katerem živimo, je objekte in pojave v prostoru smiselno preučevati enakovredno v vseh treh prostorskih razsežnostih. Če je bilo v preteklosti zaradi različnih tehnoloških omejitev to težko ali celo nemogoče, je razvoj različnih tehnologij omogočil lažji zajem, obdelavo, shranjevanje, prikaz in izmenjavo raznovrstnih prostorskih podatkov, tudi v treh razsežnostih oziroma treh dimenzijah (3D).

Področje zajema, obdelave, modeliranja, analiz in uporabe prostorskih podatkov v treh razsežnostih je eno izmed najhitreje razvijajočih se področij v domeni geoinformatike. To so med drugim izpostavili v študiji evropskega združenja EuroSDR (Coote et al., 2017), kjer so posebej raziskovali dodano vrednost prostorskih podatkov in informacij v treh razsežnostih, predvsem v okviru uradne prostorske podatkovne infrastrukture (angl. *spatial data infrastructure*). Pomembnost uporabe tri- ali celo štirirazsežnih prostorskih podatkov in poznavanje njihove kakovosti potrjujejo tudi druge mednarodne študije (Chen et al., 2016; UN-GGIM, 2020).

3D-prostorski podatki so se začeli obsežneje uporabljati z razvojem pristopov in tehnologij za množični zajem prostorskih podatkov, med drugim so to letalsko fotogrametrično snemanje, letalsko, mobilno in terestrično lasersko skeniranje ter satelitsko daljinsko zaznavanje. Navedene tehnologije so učinkovita rešitev za zajem 3D-prostorskih podatkov, na podlagi katerih je mogoče pojave iz naravnega ali grajenega okolja predstaviti v GIS. Georeferencirani 3D-prostorski podatki pomenijo dodano vrednost na številnih področjih uporabe, med drugim pri upravljanju nepremičnin, v gradbeništvu, prostorskem načrtovanju, kulturni dediščini, pri navigaciji in lokacijsko podprtih storitvah, okoljskih študijah idr.

(Stoter in Salzmann, 2003; Van Oosterom et al., 2008; Biljecki et al., 2015; Stylianidis in Remondino, 2016; Ellul et al., 2018; Stoter et al., 2020). Kakovostni in zanesljivi 3D-modeli prostora omogočajo ustrezno podporo pri odločanju, zato je treba opredeliti, kako zagotoviti kakovostne prostorske podatke. Kljub široki uporabi tovrstnih podatkov še vedno obstajajo odprta vprašanja, kaj in koliko vpliva na kakovost podatkov, predvsem v povezavi z novimi tehnološkimi rešitvami.

1.1 Opredelitev problema

Že v sredini preteklega stoletja se je fotogrametrija široko uveljavila za zajem prostorskih podatkov v treh razsežnostih. Fotogrametrijo bi lahko pri tem opredelili kot vedo, ki se ukvarja z določitvijo položaja in oblike prostorskih entitet iz fotografij. V preteklosti so se sicer zaradi omejenih možnosti obdelave prostorskih podatkov praviloma ločeno modelirale prostorske entitete v ravninski (horizontalni) razsežnosti in v višinskem (vertikalnem) smislu (glej tudi Coote et al., 2017). V klasični fotogrametriji so postopki in algoritmi pridobivanja ter obdelave prostorskih podatkov iz fotografij uveljavljeni, saj so se osnovni pristopi razvili v času analogne fotogrametrije in se potem prenesli tudi na področje digitalne fotogrametrije. Razvoj zmogljivejše računalniške tehnologije in področja obdelave velike količine podatkov je v zadnjih desetih letih prinesel velike spremembe tudi na področje fotogrametrije in 3D-modeliranja. Razvoj lahkih letalskih platform, cenejši senzorji za zajem prostorskih podatkov in novi algoritmi za obdelavo fotografij ter izdelavo 3D-fotogrametričnih oblakov točk so prispevali k vse večji uporabi daljinsko vodenih letalnikov v fotogrametriji (Nex in Remondino, 2014; Dandois et al., 2015).

Nove priložnosti na področju množičnega zajema prostorskih podatkov so v zadnjem desetletju med drugim torej prinesli lažje dostopni daljinsko vodeni letalniki, pogosto imenovani tudi »*brezpilotni letalniki*« UAV (angl. *unmanned aerial vehicles*) oziroma daljinsko vodeni sistemi, tudi »*brezpilotni sistemi*« UAS (angl. *unmanned aerial systems*). Mednarodna organizacija za civilno letalstvo ICAO uvaja termin daljinsko vodenih letalnih sistemov oziroma RPAS (angl. *remotely piloted aircraft systems*), pri čemer navaja, da je UAS širši pojem in se nanaša na vse letalne sisteme brez pilota na krovu. Daljinsko vodeni letalniki so torej podskupina brezpilotnih letalnikov, ki morajo imeti poleg letalnika kontrolno postajo in komunikacijsko tehnologijo za daljinsko upravljanje letalnika (ICAO, 2011). V nalogi bomo za namen fotogrametričnega snemanja, kjer moramo daljinsko upravljati brezpilotni letalnik, uporabili pojem daljinsko vodeni letalniki/sistemi, čeprav se je v angleški literaturi na tem področju uveljavil pojem UAV oziroma UAS. V splošnem gre za tehnologijo v obliki letalske platforme, na kateri ni človeške posadke, temveč jo operater upravlja s tal, na njej pa so nameščeni senzorji za navigacijo v prostoru in optični senzorji za zajem podatkov, ki ob ustrezni kasnejši obdelavi omogočajo pridobitev merskih prostorskih podatkov. V preteklosti je bila uporaba letalnikov omejena na vojaške naloge, v zadnjih desetih letih pa so zaradi razvoja lažjih in cenejših komponent postali

dostopnejši za ostale uporabnike, tudi na področju fotogrametrije in daljinskega zaznavanja v civilne namene. Vzporedno z razvojem strojne opreme so se razvili napredni algoritmi obdelave, ki skupaj s specifičnim načinom zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom odpirajo novo področje fotogrametrije, imenujemo ga tudi *UAV-fotogrametrija*. Rezultat fotogrametričnega zajema prostorskih podatkov z daljinsko vodenim letalnikom in nadaljnje obdelave je 3D-fotogrametrični oblak točk, ki ga je mogoče uporabiti kot vhodni podatek v različnih aplikacijah, med drugim tudi za 3D-modeliranje prostorskih objektov. Nove tehnologije in algoritmi na področju fotogrametrije vsekakor odpirajo številne nove možnosti uporabe, hkrati pa ponujajo izziv, kako z novimi pristopi zagotoviti, da bodo tako zajeti prostorski podatki ustrezne kakovosti.

Pomembno področje uporabe množično zajetih 3D-prostorskih podatkov z daljinsko vodenimi letalniki so vektorski 3D-modeli mest in pokrajin, ki jih lahko uporabimo za različne analize in prikaze v 3D-okoljih GIS (Billen et al., 2014). Vektorski 3D-model mesta je trirazsežna predstavitev urbanega okolja, v kateri so stavbe eden od pomembnejših elementov prostora. Digitalni vektorski modeli stavb so skupaj z modeli ostalih entitet grajenega in naravnega okolja pogosto uporabljeni v različnih aplikacijah, bodisi za vizualizacijo ali v kompleksnejših prostorskih analizah (Biljecki et al., 2015). Digitalni vektorski 3D-model stavb je mogoče izdelati na različne načine in na podlagi različnih podatkov, vendar se bomo v disertaciji omejili na 3D-vektorske modele, ki jih izdelamo na podlagi podatkov, pridobljenih z daljinsko vodenimi letalniki. Čeprav se vektorski 3D-modeli mest in pokrajin vse pogosteje izdelujejo in uporabljajo, sta tematiki algoritmov za 3D-modeliranje in analizo kakovosti izdelanih 3D-modelov še vedno izredno aktualni, predvsem v smislu nadzora kakovosti v celotnem procesu, od zajema podatkov do končnega 3D-modela. Kot bomo videli tudi v nadaljevanju, se več študij nanaša na posamezne faze obdelave podatkov, zajetih z daljinsko vodenimi letalniki (Nasrullah, 2016; Gindraux et al., 2017; Singh in Frazier, 2018), ali 3D-modeliranje (Krämer et al., 2007; Wong in Ellul, 2016). Celovite študije, ki bi hkrati obravnavala celoten postopek obdelave podatkov, pridobljenih z daljinsko vodenimi letalniki, in 3D-vektorsko modeliranje z vidika zagotavljanja kakovosti končnega 3D-modela, pa v nam dostopnih virih še ni bilo objavljene.

Ker je zagotavljanje kakovosti 3D-prostorskih podatkov aktualno področje, se v raziskavi ukvarjamo s problemom zagotavljanja ustrezne kakovosti 3D-prostorskih podatkov pri uporabi novih tehnologij za množični zajem prostorskih podatkov. Kot že omenjeno, se omejujemo na stavbe kot primer pogostih prostorskih entitet, ki jih modeliramo v 3D-okolju. Natančneje, zanima nas zagotavljanje kakovosti pri zajemu prostorskih podatkov z daljinsko vodenimi letalniki in njihovi nadaljnji obdelavi v postopkih modeliranja vektorskih 3D-modelov stavb. V raziskavi smo se ukvarjali z vprašanjem: *Kako zagotoviti ustrezno kakovost prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju stavb iz fotogrametričnega oblaka točk*? Poudarek raziskave je na razvoju konceptualnega modela za spremljanje in zagotavljanje kakovosti tovrstnih prostorskih podatkov in 3D-modelov stavb, kar lahko z ustreznimi prilagoditvami uporabimo

tudi za druge prostorske entitete. Konceptualni model za zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov in 3D-modelov stavb temelji na celovitem procesnem modelu, ki obsega celotno verigo obdelave prostorskih podatkov in spremljanja kakovosti: od zajema do izdelave končnega 3D-modela stavbe. Ključen korak pri definiciji procesnega modela je bil odgovoriti na vprašanje: *Kaj vpliva na kakovost prostorskih podatkov v posamezni fazi procesa in kako zagotoviti zahtevano kakovost končnega 3D-modela stavbe*? Pri razvoju procesnega modela je bil pomemben korak opredeliti ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost podatkov v fazi zajema, obdelave in modeliranja za pridobitev 3D-modela stavbe.

1.2 Raziskovalne hipoteze in cilji naloge

Tema raziskave je preučevanje dejavnikov, ki vplivajo na kakovost končnega vektorskega 3D-modela stavbe, pridobljenega z obdelavo UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Pri tem nas zanimajo dejavniki vpliva na kakovost v posameznih fazah procesa od zajema preko obdelave do modeliranja prostorskih podatkov. Osredotočamo se na zajem podatkov z daljinsko vodenim letalnikom za izdelavo fotogrametričnega oblaka točk, na podlagi katerega pridobimo topološko urejen vektorski podatkovni model, skladen s standardom OGC CityGML (Open Geospatial Consortium, 2012) s stopnjo oziroma ravnjo podrobnosti modela LOD2. Navedeni standard sicer podaja le konceptualni model za trirazsežno modeliranje grajenega in naravnega okolja, pri tem pa je predvidenih več stopenj podrobnosti modelov, kjer stopnja podrobnosti LOD2 za primer stavb opredeljuje model, ki vsebuje pravilno geometrijo strehe (enokapnica, dvokapnica, ravna streha ipd.), podrobnosti na strehah pa so izpuščene (na primer dimniki); zunanje površine objektov so lahko prikazane z navpičnimi ploskvami, lahko tudi s teksturami.

Skladno z identificiranimi raziskovalnimi problemi smo opredelili naslednji raziskovalni hipotezi:

- HIPOTEZA 1: *Identificirati je mogoče posamične dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema fotogrametričnega oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, skladnega z zahtevami mednarodnega standarda OGC CityGML z ravnjo podrobnosti modela LOD2.*
- HIPOTEZA 2: *Na temelju poznavanja dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, je mogoče razviti konceptualni model za spremljanje kakovosti po posameznih fazah obdelave podatkov, ki zagotavlja predpisano kakovost končnega 3D-modela.*

Za preverjanje pravilnosti druge hipoteze smo oblikovali še dodatno domnevo:

- HIPOTEZA 2.1: *Končna kakovost georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb opredeljuje zahtevano kakovost vsake posamezne faze procesa od zajema do izdelave končnega modela.*

Skladno z zgoraj podanimi hipotezami smo si zastavili naslednje raziskovalne cilje:

- analizirati postopke za zajem ter obdelavo prostorskih podatkov, pridobljenih z letalnikom (fotogrametrični oblak točk), in izdelati georeferenciran 3D-vektorski model stavb na podlagi teh podatkov v skladu s standardom OGC CityGML (LOD2);
- izdelati procesni model od zajema podatkov do izdelave 3D-vektorskega modela stavb;
- na podlagi procesnega modela opredeliti dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah od zajema do izdelave končnega 3D-vektorskega modela stavb;
- za identificirane dejavnike preučiti, v kateri fazi, na kakšen način in v kolikšnem obsegu vplivajo na kakovost končnega 3D-modela stavb;
- razviti konceptualni model za spremljanje in zagotavljanje kakovosti podatkov in procesov po posameznih fazah, in sicer od zajema podatkov z optičnimi senzorji na letalniku do izdelave 3D-vektorskega modela stavb;
- z eksperimentom in rezultati analiz ovrednotiti vplive posameznih dejavnikov na kakovost 3D-vektorskega modela stavb;
- za študijske primere opredeliti mejne vrednosti posameznih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost 3D-modela stavb, in preveriti pravilnost zastavljenih hipotez.

Pričakovani rezultati so predvsem predstavitev ugotovitev podrobne analize procesa 3D-modeliranja stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk, zajetega z daljinsko vodenim letalnikom, in celovita obravnava zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov v tem procesu. Na podlagi identificiranih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov od zajema do končnega vektorskega 3D-modela stavb, bomo predlagali konceptualni model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa z namenom zagotavljanja ustrezne kakovosti končnih rezultatov, kar bo pomemben prispevek k znanosti in stroki na področju fotogrametrije ter prostorske podatkovne znanosti.

Rezultati eksperimentalnega dela, ki bodo v prvi vrsti namenjeni preverjanju oblikovanega konceptualnega modela za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju, bodo zanimivi za oblikovanje priporočil glede izvedbe zajema UAV-podatkov, njihove obdelave ter 3D-modeliranja, saj so izzivi glede zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov z uporabo teh novih tehnologij izredno veliki in aktualni na širši mednarodni ravni na področju geodezije in geoinformatike.

1.3 Struktura disertacije

Doktorska disertacija vsebuje sedem poglavij, vsebino katerih podajamo v nadaljevanju.

V uvodnem poglavju podajamo temeljna izhodišča in raziskovalni problem, s katerim se ukvarjamo v doktorski nalogi. Sledi predstavitev zastavljenih raziskovalnih hipotez in ciljev ter pričakovanih rezultatov.

Drugo poglavje je namenjeno predstavitvi teoretičnega ozadja tematike doktorske disertacije. Najprej opišemo področje kakovosti prostorskih podatkov s poudarkom na sprejetih mednarodnih in slovenskih standardih za prostorske podatke ter standardizacijo na področju fotogrametričnih izdelkov. Sledi predstavitev UAV-fotogrametrije, kjer opišemo vrste snemalnih platform, njihovo sestavo in način delovanja, procesne korake v UAV-fotogrametriji ter možnosti uporabe izdelkov. V tretjem delu poglavja predstavimo 3D-modeliranje v okoljih geografskih informacijskih sistemov, s poudarkom na opisu mednarodnega standarda OGC CityGML, ki opredeljuje osnovne značilnosti ciljnega modela stavb pri naši raziskavi, in na vrstah prostorskih podatkov, ki jih uporabljamo za 3D-modeliranje.

V tretjem poglavju je opisana v raziskavi uporabljena metodologija in viri podatkov, pri čemer opredelimo študij literature, predstavimo metode procesnega modeliranja in razvoj konceptualnega modela. Podrobneje je predstavljen metodološki okvir za preizkus konceptualnega in procesnega modela za spremljanje kakovosti vmesnih in končnega izdelka UAV-fotogrametrije in 3D-modeliranja stavb. V ta namen smo opisali izbrani študijski območji, metodologijo zajema in obdelave podatkov ter uporabljene pristope 3D-modeliranja stavb. V zadnjem delu podamo metodološki okvir za oceno kakovosti prostorskih podatkov – tako vmesnih kot končnih rezultatov modeliranja stavb.

V četrtem poglavju podajamo rezultate poglobljene analize dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk. Analiza je razdeljena na tri dele: v prvem delu analiziramo dejavnike, ki vplivajo na kakovost podatkov v fazi zajema, v drugem delu dejavnike, ki vplivajo na kakovost podatkov pri obdelavi fotografij in obdelavi oblaka točk, v tretjem delu analiziramo dejavnike, ki vplivajo na kakovost podatkov v fazi 3D-modeliranja stavb, sledi pa razprava, kjer povzamemo ključne ugotovitve tega procesa.

Osrednji del naloge je peto poglavje, v katerem predstavimo predlagani konceptualni model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Konceptualni model smo definirali na podlagi razvitega procesnega modela za 3D-modeliranje stavb. Slednji vključuje procesne korake od zajema podatkov do izdelave georeferenciranega vektorskega 3D-modela stavbe, skladnega z zahtevami standarda OGC CityGML z ravnjo podrobnosti LOD2. Model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v ključnih fazah procesa vključuje dejavnosti za nadzor kakovosti vmesnih rezultatov procesa, s ciljem zagotoviti želeno kakovost končnega rezultata, to je 3D-modela stavb.

V šestem poglavju podamo rezultate eksperimentalnega dela, to so rezultati preizkusa predlaganega modela za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Najprej predstavimo rezultate splošnega preizkusa modela za spremljanje kakovosti v obravnavanem procesu, in sicer smo preizkus izvedli na dveh izbranih študijskih območjih. V drugem delu prikažemo rezultate analize vpliva izbranih dejavnikov na kakovost podatkov v izbrani fazi procesa 3D-modeliranja stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk. V sklepnem delu poglavja sledi tudi razprava o rezultatih in ugotovitvah eksperimentalnega dela.

V zaključku, to je v sedmem poglavju, podamo sklepne ugotovitve raziskave in se opredelimo do zastavljenih raziskovalnih hipotez. Podrobneje smo predstavili prispevek raziskave k znanosti ter potencial za prenos znanja v prakso, to je prispevek k razvoju stroke. Dodatno smo opisali raziskovalne izzive, ki smo jih prepoznali med raziskavo in kažejo na visok raziskovalni kot tudi razvojni potencial na mednarodni ravni.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 TEORETIČNO OZADJE

V tem poglavju predstavljamo teoretično ozadje področja raziskave. V prvem delu je opisana standardizacija na področju prostorskih podatkov, s poudarkom na njihovi kakovosti. Sledi predstavitev področja UAV-fotogrametrije, kjer so prikazani vrste snemalnih sistemov, njihovo delovanje in nadaljnja uporaba na področju fotogrametrije. V tretjem delu poglavja opisujemo 3D-modeliranje v okoljih geografskih informacijskih sistemov (GIS), predvsem z vidika 3D-modeliranja mest in uporabe različnih prostorskih podatkov za 3D-modeliranje stavb.

2.1 Kakovost prostorskih podatkov

Razvoj različnih tehnologij za zajem in algoritmov za obdelavo prostorskih podatkov je prinesel velike in hitre spremembe na širokem področju prostorske podatkovne znanosti. Prostorski podatki se danes uporabljajo na številnih področjih – od klasičnega topografskega kartiranja, upravljanja nepremičnin in načrtovanja prostora do kmetijstva, gozdarstva, zaščite okolja, ukrepanja ob naravnih in drugih elementarnih nesrečah, v prometu, turizmu itd. Prostorski podatki omogočajo podporo za zagotavljanje pravočasnih in ustreznih informacij o dogajanju v prostoru za sprejemanje ustreznih odločitev. Okolja GIS ponujajo učinkovita orodja za upravljanje prostorskih podatkov in prostorske analize v podporo upravljanju prostora, saj v okviru geoinformacijskih podatkovnih modelov omogočajo združevanje in analizo prostorskih in drugih podatkov, ki se nanašajo na prostor. Na podlagi rezultatov takih analiz je mogoče spremljati dogajanje v prostoru in nadalje sprejemati ustrezne odločitve o ukrepih v prostoru (Malczewski, 1999, 2006; Drobne in Lisec, 2009). Kakovost teh odločitev je močno odvisna tudi od kakovosti vhodnih podatkov, zato je pomembno, da so uporabljeni podatki dovolj kakovostni z vidika točnosti, popolnosti in zanesljivosti. Zaradi pojava novih tehnologij imamo danes na voljo vse več raznolikih prostorskih podatkov, povečuje se njihova izmenjava in uporaba, zato je potreba po oceni kakovosti podatkov za zagotavljanje kakovosti in interoperabilnosti podatkov oziroma informacij, procesov ter storitev vedno večja (Li et al., 2012; Chen et al., 2016).

Kakovost je v standardu za kakovost prostorskih podatkov Mednarodne organizacije za standardizacijo ISO (angl. *International Organization for Standardization*), ki je tudi slovenski standard, poznan pod oznako SIST EN ISO 19157:2015, opredeljena kot stopnja, do katere značilnosti izdelka ali storitve ustrezajo predhodno določenim zahtevam (SIST, 2015). Z vprašanjem kakovosti prostorskih podatkov, kako jo doseči in na kakšen način jo oceniti ter posredovati uporabnikom teh podatkov, se je v zadnjih tridesetih letih ukvarjalo veliko raziskovalcev in organizacij s področja geoinformatike ter sorodnih področij. Pomembnost te tematike je bila prepoznana ne le med raziskovalci, temveč tudi širše v okviru državnih institucij in industrije, saj se je z razvojem informacijske tehnologije povečal ne le zajem, temveč tudi uporaba prostorskih podatkov (Devillers et al., 2007, 2010; Shi et al., 2015). Zagotavljanje

in pravilen opis kakovosti prostorskih podatkov sta še toliko pomembnejša, ker prostorske podatke pogosto uporabljajo tudi posamezniki in organizacije, ki se v osnovi ne ukvarjajo s področjem geoinformatike, ampak jim podatki služijo le kot podpora pri njihovih odločitvah (Delavar in Devillers, 2010). Zaradi tega ima pomembno vlogo tudi posredovanje informacij o stopnji kakovosti prostorskih podatkov uporabnikom, da se lahko odločijo, ali so podatki primerni za njihovo uporabo oziroma koliko se na izbrane podatke lahko zanesejo (Devillers et al., 2010).

V preteklosti so se raziskave s področja kakovosti prostorskih podatkov ukvarjale s splošno opredelitvijo kakovosti (Devillers in Jeansoulin, 2006), s posameznimi vidiki kakovosti, kot je na primer ocena uporabnosti določenega prostorskega podatka (Devillers et al., 2007; Bielecka, 2015), in s konkretnimi izdelki prostorskih podatkov ter oceno njihove točnosti (Kosmatin Fras, 2002; Höhle in Potuckova, 2011; Mohamed et al., 2013). Pomembno znanstveno vprašanje je bilo, kako naj kakovost podatkov opišemo (Triglav, 2012) in kako naj ponudniki prostorskih podatkov to informacijo posredujejo uporabnikom, da jo bodo razumeli (Boin in Hunter, 2006; Meijer et al., 2015). Pomembno je tudi vprašanje, kako kakovost prostorskih podatkov vpliva na kakovost prostorskih in drugih analiz na osnovi teh podatkov (Biljecki et al., 2018). Za zagotavljanje kakovostnih izdelkov in storitev so se na področju geoinformatike in fotogrametrije razvili mednarodni standardi, ki skrbijo za poenotenje pri izdelavi, uporabi in tudi vrednotenju kakovosti podatkov ter storitev.

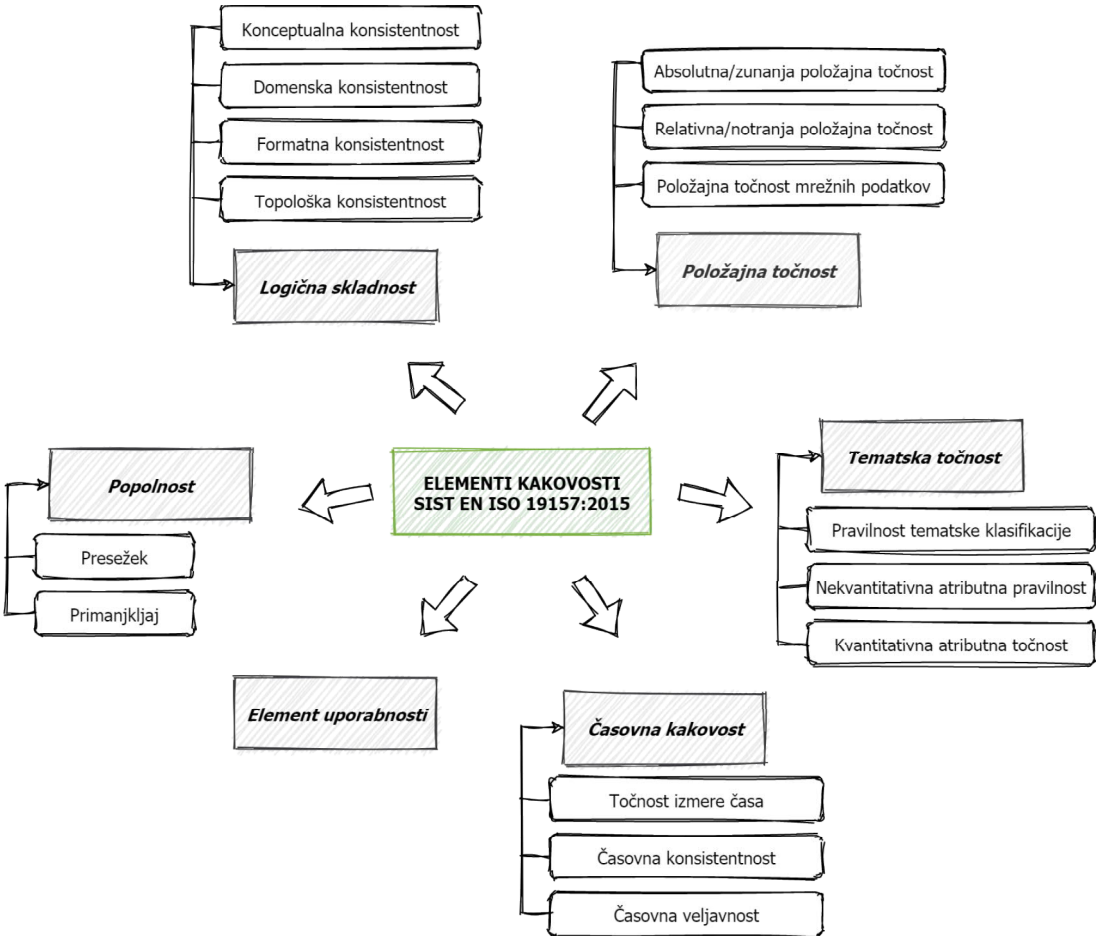
2.1.1 Mednarodni in slovenski standard SIST EN ISO 19157:2015

Standard je dogovor med uporabniki določenega izdelka ali storitve, ki nastane na podlagi soglasja z namenom poenotenja in zmanjšanja razlik, ki sicer ovirajo uporabo teh izdelkov ali storitev (Šumrada, 2009). Mednarodna organizacija za standardizacijo ISO je organizacija, ki skrbi za razvoj mednarodnih standardov na različnih področjih z namenom poenotenja izdelkov, storitev in sistemov za zagotavljanje kakovosti, varnosti ter učinkovitosti (ISO, 2020). V organizaciji ISO deluje tudi tehnični odbor (TC) 211, ki skrbi za področje geografskih informacij in je odgovoren za postopke mednarodne formalne standardizacije na področju prostorskih podatkov. Poleg organizacije ISO sta za Slovenijo na področju standardizacije v geoinformatiki zanimiva še Evropski odbor za standardizacijo (angl. *European Committee for Standardization*) in Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST). Tehnični odbori za geoinformatiko oziroma geografske informacije v vseh treh organizacijah tesno sodelujejo pri razvoju standardov tudi z drugimi organizacijami, kot so konzorcij OGC (angl. *Open Geospatial Consortium*), mednarodno združenje geodetov FIG (fran. *Fédération Internationale des Géomètres*), mednarodna organizacija za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje ISPRS (angl. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) idr., kar omogoča, da standardi dosežejo široko soglasje med uporabniki, ki se jih tematika prostorskih podatkov dotika (Šumrada, 2009).

Veljaven formalni mednarodni, evropski in slovenski standard za kakovost prostorskih podatkov je standard SIST EN ISO 19157:2015 (2015), ki je bil v okviru ISO sprejet leta 2013 in kasneje uveljavljen tudi na evropski in slovenski ravni. Nadomestil je več starejših mednarodnih standardov, ki so obravnavali kakovost prostorskih podatkov. Standard vsebuje načela, kako opišemo kakovost prostorskih podatkov, opredeljuje elemente in merila kakovosti ter opisuje postopke vrednotenja in poročanja o kakovosti prostorskih podatkov. Namenjen je tako ponudnikom prostorskih podatkov za oceno, kako kakovostni so njihovi podatki glede na specifikacije izdelka, kot tudi uporabnikom prostorskih podatkov za oceno, ali so izbrani prostorski podatki primerne kakovosti za uporabo v posamezne namene.

Kakovost prostorskih podatkov lahko po navedenem standardu opišemo z naslednjimi elementi kakovosti (slika 1) (SIST, 2015):

- **popolnost:** določa prisotnost in odsotnost pojavov, njihovih atributov in razmerij; opredeljujeta jo presežek in primanjkljaj podatkov v nizu;
- **logična skladnost:** določa stopnjo skladnosti z logičnimi pravili glede strukture podatkov, atributov in razmerij; ločimo konceptualno, domensko, formatno in topološko skladnost prostorskih podatkov;
- **položajna točnost:** opredeljuje točnost položaja izbranega prostorskega podatka v okviru referenčnega prostorskega sistema; ločimo absolutno ali zunanjo točnost, relativno ali notranjo točnost in položajno točnost mrežnih podatkov;
- **tematska točnost:** opredeljena je kot točnost kvantitativnih atributov prostorskih podatkov, pravilnost nekvantitativnih atributnih podatkov in pravilnost klasifikacije;
- **časovna kakovost:** opisuje kakovost časovnih atributov prostorskih podatkov v smislu točnosti izmere časa, časovne konsistentnosti in časovne veljavnosti;
- **element uporabnosti:** element se uporablja za oceno primernosti uporabe izbranih prostorskih podatkov v posamezni aplikaciji ali stopnjo skladnosti prostorskih podatkov s predhodno določenimi zahtevami.



Slika 1: Elementi kakovosti prostorskih podatkov, opredeljeni v standardu SIST EN ISO 19157:2015 (SIST, 2015).
Figure 1: Elements of spatial data quality as defined in the SIST EN ISO 19157:2015 standard (SIST, 2015).

Za poenoteno podajanje informacij o kakovosti prostorskih podatkov je pomemben tudi mednarodni, evropski in slovenski standard za metapodatke SIST EN ISO 19115:2005 (SIST, 2005), ki določa vsebino in strukturo metapodatkov za opis prostorskih podatkov ter storitev. Informacije o kakovosti prostorskih podatkov so običajno sestavni del metapodatkovnega opisa prostorskih podatkov.

Standard SIST EN ISO 19157:2015 podaja definicijo kakovosti prostorskih podatkov, splošna merila in postopke za vrednotenje posameznih elementov kakovosti ter kako in na kakšen način podajamo kakovost prostorskih podatkov. Je mednarodno priznan formalni okvir za spremljanje in zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov, ne opredeljuje pa konkretnih vrednosti o zahtevani stopnji kakovosti, saj je ta odvisna od vrste podatkov in namena uporabe izdelkov ter storitev prostorskih podatkov. Zaradi tega so se na posameznih področjih geoinformatike razvili dodatni industrijski standardi, ki zagotavljajo poenotenje podatkovnih modelov za dosego kakovostnejših prostorskih podatkov in podajajo specifična merila ter mejne vrednosti posameznih vidikov kakovosti za zagotavljanje zahtevane kakovosti prostorskih podatkov.

2.1.2 Standardizacija na področju fotogrametričnih izdelkov

Na področju fotogrametrije in topografskega kartiranja so se specifični standardi za kontrolo kakovosti fotogrametričnih izdelkov razvili že pred več kot sedemdesetimi leti, saj je bilo že v času analognih kart pomembno, da so lahko ponudniki (proizvajalci) podatkov preverili skladnost svojega izdelka s predhodno določenimi naročnikovimi specifikacijami. Večina teh standardov se osredotoča na položajno kakovost izdelkov, ki jih izdelamo na podlagi fotogrametrično zajetih podatkov, na kakšen način ocenjujemo in podajamo položajno kakovost izdelkov. Podajajo pa tudi mejne vrednosti in merila za oceno skladnosti izdelka s predhodno določeno položajno točnostjo.

V nadaljevanju predstavljamo najpogosteje uporabljene standarde za analizo položajne točnosti fotogrametrično zajetih prostorskih podatkov. Čeprav večina izvira iz ZDA, velja, da se mnogi nacionalni standardi naslanjajo ravno na navedene standarde, saj na mednarodni ravni za to področje, to je področje fotogrametričnih izdelkov, ni posebnih standardov. Položajna točnost prostorskih podatkov je pri vseh teh standardih analizirana s primerjavo položaja v ravninskem in višinskem smislu na karti oziroma podatkovnem nizu, ki ga testiramo, in položajem identične točke v naravi, ki jo izmerimo z drugo, natančnejšo metodo (delno povzeto po Ariza López in Atkinson Gordo, 2008):

- **National Map Accuracy Standard – NMAS:** standard so v 40. letih prejšnjega stoletja razvili strokovnjaki s področja fotogrametrije v Združenih državah Amerike v okviru urada *American Bureau for Budget.* Bil je prvi standard na področju kakovosti prostorskih podatkov, ki je predpisoval zahtevano položajno točnost izdelanih kart. Gre za preprost standard, katerega končna različica je bila sprejeta leta 1947 in je bil razvit iz praktičnih razlogov testiranja skladnosti državnih kart s predpisano položajno točnostjo. Zahtevana ravninska in višinska točnost je podana z mejno vrednostjo odstopanja v enotah na karti. Za izračun končne zahtevane točnosti karte je treba upoštevati merilo karte pri ravninski točnosti in ekvidistanco med plastnicami za višinsko točnost. Če je položaj ali višina točke na karti znotraj 90-odstotnega intervala zaupanja, je karta skladna s standardom NMAS.
- **Accuracy Standard for Large-Scale Maps – ASLSM** (ASPRS, 1990): standard je bil razvit v okviru ameriške organizacije za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje ASPRS (angl. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) in določa predpisane mejne vrednosti položajne točnosti kart meril, večjih od 1 : 20.000. Od sprejema leta 1990 je bil standard v splošni uporabi med različnimi uporabniki, ki so se ukvarjali z zagotavljanjem prostorskih podatkov. Za ravninsko točnost podatkov so glede na merilo karte podane mejne vrednosti položajne točnosti koordinat v obliki vrednosti korena srednjega kvadratnega pogreška – *RMSE* (angl. *root mean square error*), višinska točnost je odvisna od ekvidistance med plastnicami. V primerjavi s standardom NMAS ta standard podaja mejne vrednosti odstopanja položaja od

prave vrednosti v dejanskih enotah v naravi, pri čemer je mejna vrednost odstopanja odvisna od merila prikaza prostorskih podatkov oziroma ekvidistance plastnic na karti.

- **National Standard for Spatial Data Accuracy – NSSDA** (FGDC, 1998): standard, razvit pod okriljem odbora *Federal Geographic Data Committee,* prav tako v Združenih državah Amerike, so v preteklosti uporabljale različne organizacije, ki so izdelovale in vzdrževale prostorske podatke. Standard ponuja dobro opredeljeno metodologijo za kontrolo kakovosti prostorskih podatkov. Ne podaja konkretnih mejnih vrednosti zahtevane položajne točnosti za posamezen izdelek prostorskih podatkov, temveč zgolj na podlagi statističnega testiranja opredeljuje način izračuna tako ravninske kot višinske točnosti, ki jo obravnavani prostorski podatki dosegajo. Izračun točnosti podatkov temelji na vrednosti *RMSE* in statističnem testiranju odstopanja napak, pri čemer je skladnost podatkov s standardom zagotovljena, če je položaj točke znotraj intervala s stopnjo zaupanja 95 %. To pomeni, da bo 95 % vseh podatkov v testiranem podatkovnem nizu imelo položajno odstopanje od prave vrednosti (vrednosti, določene z neodvisno natančnejšo metodo), manjše ali enako predhodno določeni mejni vrednosti odstopanja. Na strani uporabnika je odločitev, ali je točnost podatkov, ki jo izračunana po metodologiji standarda NSSDA, primerna za izbrano uporabo.
- **Standard agreement 2215 – Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data** (STANAG, 2010): vojaški standard, ki nastal in se uporablja za izdelke prostorskih podatkov, kot so topografske karte, letalski posnetki in drugi digitalni prostorski podatki, ki jih uporablja organizacija NATO oziroma Organizacija severnoatlantske pogodbe.
- **Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data – PASDGD** (ASPRS, 2015): najnovejši standard ameriške organizacije za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje ASPRS, ki je bil v svoji končni različici sprejet leta 2015, je nadgradnja standarda ASLSM iz leta 1990 in specifikacij za kontrolo kakovosti prostorskih podatkov laserskega skeniranja iz leta 2004. Starejši standard ASLSM je bil razvit za spremljanje in zagotavljanje položajne točnosti analognih tiskanih kart, zato s pojavom digitalnih prostorskih podatkov in novih tehnologij za zajem prostorskih podatkov, ki omogočajo doseganje višjih položajnih točnosti, ni bil več aktualen za uporabo. Skladno z množičnim zajemom in uporabo digitalnih prostorskih podatkov se je razvil nov standard za položajno točnost digitalnih prostorskih podatkov, predvsem za ortofoto ter ravninske in višinske prostorske podatke. Standard določa razrede točnosti glede na mejne vrednosti *RMSE*, ki jim morajo izdelki ustrezati, da so skladni s standardom, pri čemer v večini povzema metodologijo izračuna točnosti iz standarda NSSDA. Ravninska točnost je določena z izračunom vrednosti *RMSE* po posamezni koordinatni komponenti in v skupnem 2D-položaju ter z mejno vrednostjo intervala zaupanja s stopnjo zaupanja 95 %. Podobno je izračunana višinska točnost na območjih brez vegetacije, kjer se prav tako z izračunom *RMSE* in intervalom s 95-odstotno stopnjo zaupanja določi mejna vrednost odstopanja višine. Razlika glede na standard NSSDA je v ločenimi obravnavi višinske točnosti podatkov na območjih z

vegetacijo, kjer se ne predpostavljajo normalne porazdelitve odstopanj. Na poraščenih območjih je mejna vrednost odstopanja višine od prave vrednosti določena z vrednostjo 95. kvantila odstopanja.

Poleg uveljavljenih standardov za položajno točnost prostorskih podatkov so se v preteklosti v okviru različnih strokovnih in znanstvenih organizacij razvile pobude za poenotenje vrednotenja kakovosti ter za ustrezno zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov. Ena od takih organizacij je EuroSDR (2020), ki skrbi za povezavo med nacionalnimi geodetskimi upravami in raziskovalnimi institucijami z namenom zagotavljanja, prenosa in uvajanja novih rešitev na področju prostorskih podatkov. V okviru organizacije EuroSDR so bile objavljene smernice za vrednotenje točnosti prostorskih podatkov, ki vključujejo podrobno metodologijo za oceno točnosti podatkov glede na specifike obravnavanih podatkov, kjer lahko izpostavimo smernice za oceno točnosti digitalnega modela reliefa (Höhle in Potuckova, 2011).

2.2 UAV-fotogrametrija

Fotogrametrija je veda o pridobivanju zanesljivih trirazsežnih (3D) geometričnih in tematskih informacij o prostorskih objektih, pojavih in pokrajini, pogosto povezanih tudi s časovno razsežnostjo, in sicer s fotografij, iz lidarskih podatkov oziroma podob razdalj (ISPRS, 2019). V preteklosti so se fotografije, uporabljene v fotogrametriji, zajemale iz zraka z uporabo raznovrstnih zračnih plovil (letala, helikopterja, balona, zmaja itd.) ali s tal pri terestrični fotogrametriji. Čeprav so bile v preteklosti za zajem zračnih fotogrametričnih posnetkov, imenovanih tudi aerofotogrametrični posnetki, najpogosteje uporabljene platforme s človeško posadko na krovu, so začetki aerofotogrametrije povezani prav z uporabo platform brez človeške posadke, kot so baloni, zmaji in celo golobi, na katerih so bili nameščeni fotoaparati. Kasneje so se uveljavile stabilnejše platforme s človeško posadko, ki so omogočale uporabo kakovostnejše snemalne opreme in nadzor nad zajemom podatkov med snemanjem. Z razvojem lažjih in cenejših senzorjev za zajem podatkov v zadnjih petnajstih letih spet prihajajo v uporabo snemalni sistemi brez človeške posadke, ki jih imenujemo daljinsko vodeni letalniki oziroma krajše letalniki. Kot že opisano v poglavju 1.1, se uporablja tudi kratica UAV. Daljinsko vodene letalnike so za vojaške namene uporabljali že vse od prve svetovne vojne, prve fotogrametrične poskuse s takimi letalniki pa lahko zasledimo konec 70. let prejšnjega stoletja (Eisenbeiss, 2009). Po prvih fotogrametričnih snemanjih z daljinsko vodenimi letalniki se tovrsten način snemanja ni uveljavil, ker je bila uporaba še precej okrnjena zaradi tehnoloških omejitev in s tem omejitev glede doseganja zahtevane kakovosti. Daljinsko vodeni letalniki so se za fotogrametrična snemanja pogosteje začeli uporabljati v tem tisočletju, predvsem s prihodom cenejših in lažjih snemalnih sistemov po letu 2005. Od takrat lahko zasledimo več fotogrametričnih letalnikov na trgu pa tudi vse več znanstvenih in strokovnih objav, ki obravnavajo fotogrametrično uporabo letalnikov (Eisenbeiss, 2009; Colomina in Molina, 2014; Pajares,

2015; Singh in Frazier, 2018). Z razvojem zmogljivejših letalnikov in senzorjev, ki omogočajo zajem prostorskih podatkov visoke ločljivosti in točnosti, se je tako v fotogrametriji uveljavilo novo področje, ki ga skladno z angleškim opisom imenujemo UAV-fotogrametrija (angl. *UAV-photogrammetry*). V nadaljevanju predstavljamo vrste daljinsko vodenih sistemov, ki jih uporabljamo v fotogrametriji, njihovo sestavo in način delovanja ter najpogostejša področja njihove uporabe.

2.2.1 Vrste snemalnih sistemov

V literaturi najdemo več različnih definicij, kaj je daljinsko vodeni letalnik oziroma sistem, in več različnih klasifikacij teh sistemov, uporabljenih v fotogrametričnih snemanjih. Eisenbeiss (2009) je v svojem delu opredelil več vidikov razdelitve letalnikov, ki jih lahko uporabimo za fotogrametrijo:

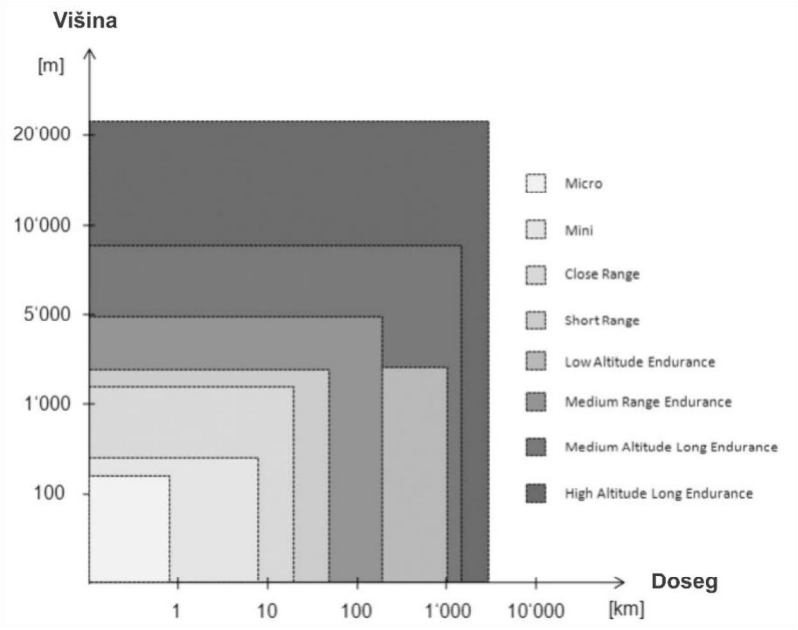
- glede na izvedbo kril: letalniki s fiksnimi krili, letalniki z rotorji, fleksibilni letalniki (kombinacija fiksnih kril in rotorjev);
- glede na maso: lažji od zraka in težji od zraka,
- glede na prisotnost pogona: letalniki brez pogona in letalniki s pogonom.

Letalniki se med seboj razlikujejo po dosegu, vzdržljivosti, odvisnosti od vplivov vetra in ostalih vremenskih dejavnikov ter možnosti manevriranja sistema med snemanjem. Prav tako se sistemi med seboj razlikujejo po načinu letenja, velikosti in masi, zmogljivosti prenosa tovora, najvišji možni višini leta nad terenom itd. Klasifikacija letalnikov po Everaerts (2009) je določena glede na fizične lastnosti platforme, kot so doseg, najvišja višina leta nad terenom, čas vzdržljivosti in operativna masa letalnika (preglednica 1).

Preglednica 1: Lastnosti delovanja platforme za letalnike kategorij nano, mikro in mini (povzeto po Everaerts, 2009).

Table 1: The operation properties of UAV platforms for the categories nano, micro, and mini (adopted from Everaerts, 2009).

Kategorija	Doseg [km]	Višina leta [m]	Vzdržljivost [h]	Operativna masa [kg]
Nano	< 1	100	< 1	< 0,025
Mikro	< 10	250	1	< 5
Mini	< 10	150–300	< 2	< 30



Slika 2: Vrste letalnikov glede na doseg in najvišjo možno višino leta nad terenom (povzeto po Eisenbeiss, 2009).
Figure 2: UAV categories based on flight altitude and flight range (adopted from Eisenbeiss, 2009).

Slika 2 prikazuje kategorije letalnikov glede na doseg in najvišjo višino leta nad terenom. V UAV-fotogrametriji najpogosteje uporabljamo letalnike, ki so razvrščeni v skupini mikro (angl. *micro*) in mini (angl. *mini*). Ti letalniki imajo lastni pogon in so težji od zraka. Z vidika izvedbe se uporabljajo letalniki tako s fiksnimi krili kot z rotorji (slika 3). Kateri letalnik bomo uporabili za zajem fotogrametričnih posnetkov, je odvisno od značilnosti snemalnega projekta, predvsem od namena snemanja in velikosti snemalnega območja.



(a) (b)

Slika 3: Primer dveh vrst letalnikov glede na izvedbo kril: (a) letalnik s fiksnimi krili (C-Astral, 2019), (b) letalnik z rotorji (vir slikovnega gradiva: U. Drešček).

Figure 3: Two types of UAV platform differing in the type of wings: (a) a fixed-wing UAV (C-Astral, 2019), (b) a rotary-wing UAV (image source: U. Drešček).

2.2.2 Sestava in način delovanja sistema

Sistem za izvedbo fotogrametričnega snemanja z letalnikom je sestavljen iz treh glavnih komponent (Colomina in Molina, 2014):

- letalnika s senzorji,
- kontrolne postaje na tleh,
- komunikacijske povezave med letalnikom in kontrolno postajo, preko katere operater nadzoruje letalnik.

Letalnik, namenjen fotogrametričnemu snemanju, sestavlja fizična platforma, na kateri so nameščene elektronske in strojne komponente, ki omogočajo njegovo delovanje. Poleg komponent, ki zagotavljajo informacije o razmerah med letom, kot so temperatura, zračni tlak ipd., ter baterij, ki zagotavljajo energijo za delovanje platforme, sta za fotogrametrijo pomembni dve skupini senzorjev na letalniku. Prva omogoča navigacijo in orientacijo letalnika v smislu nadzora položaja, hitrosti in višine v času letenja in jo praviloma sestavljajo sprejemnik GNSS (angl. *global navigation satellite system*), inercialna merilna enota IMU (angl. *inertial measurement unit*), višinomer ter kompas. Običajno so ti senzorji povezani s procesno enoto, ki izvaja ukaze operaterja na tleh ali ukaze avtopilota za izvedbo preleta, kot ga je določil operater v fazi načrtovanja izmere. Senzorji za orientacijo lahko sočasno ali v okviru ločnih sistemov shranjujejo tudi podatke o lokaciji in orientaciji letalnika med snemanjem, ki jih je mogoče uporabiti pri kasnejši obdelavi podatkov – kot znano zunanjo orientacijo fotografij ali kot približne začetne vrednosti položajev in zasukov zajetih fotografij. V ta namen je treba vzpostaviti povezavo z drugo skupino senzorjev, ki omogočajo zajem slikovnih podatkov daljinskega zaznavanja. Senzorji za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje obsegajo senzorje, s katerimi zajamemo fotogrametrične posnetke v vidnem ali infrardečem spektru elektromagnetnega valovanja, laserske skenerje za zajem laserskega oblaka točk, na trgu so se pojavili tudi že senzorji, ki zajemajo podatke v drugih pasovih elektromagnetnega valovanja. Izbira vrste senzorja za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje je odvisna od namena snemanja, ki določa želeno točnost in natančnost rezultatov. Hkrati masa in velikost senzorja pogojujeta vrsto snemalne platforme z ustrezno zmogljivostjo prenosa bremena, ki bo omogočila uporabo želenih senzorjev. Način izvedbe snemanja z letalnikom je odvisen od namena snemanja, vrste snemalnega sistema in zunanjih razmer v času snemanja. Lahko se izvede v obliki ročnega, deloma samodejnega ali v celoti samodejnega zajema z uporabo avtopilota (Everaerts, 2009; Colomina in Molina, 2014; Nex in Remondino, 2014).

Način zajema podatkov je poleg značilnosti letalnika močno omejen z zakonodajo, ki opredeljuje pogoje uporabe letalnikov. Vsaka država ureja področje uporabe tovrstnih sistemov, zato je treba že med načrtovanjem letalske misije upoštevati omejitve, ki jih določa zakonodaja. V Sloveniji področje uporabe letalnikov v civilne namene zakonsko ureja Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov (2016),

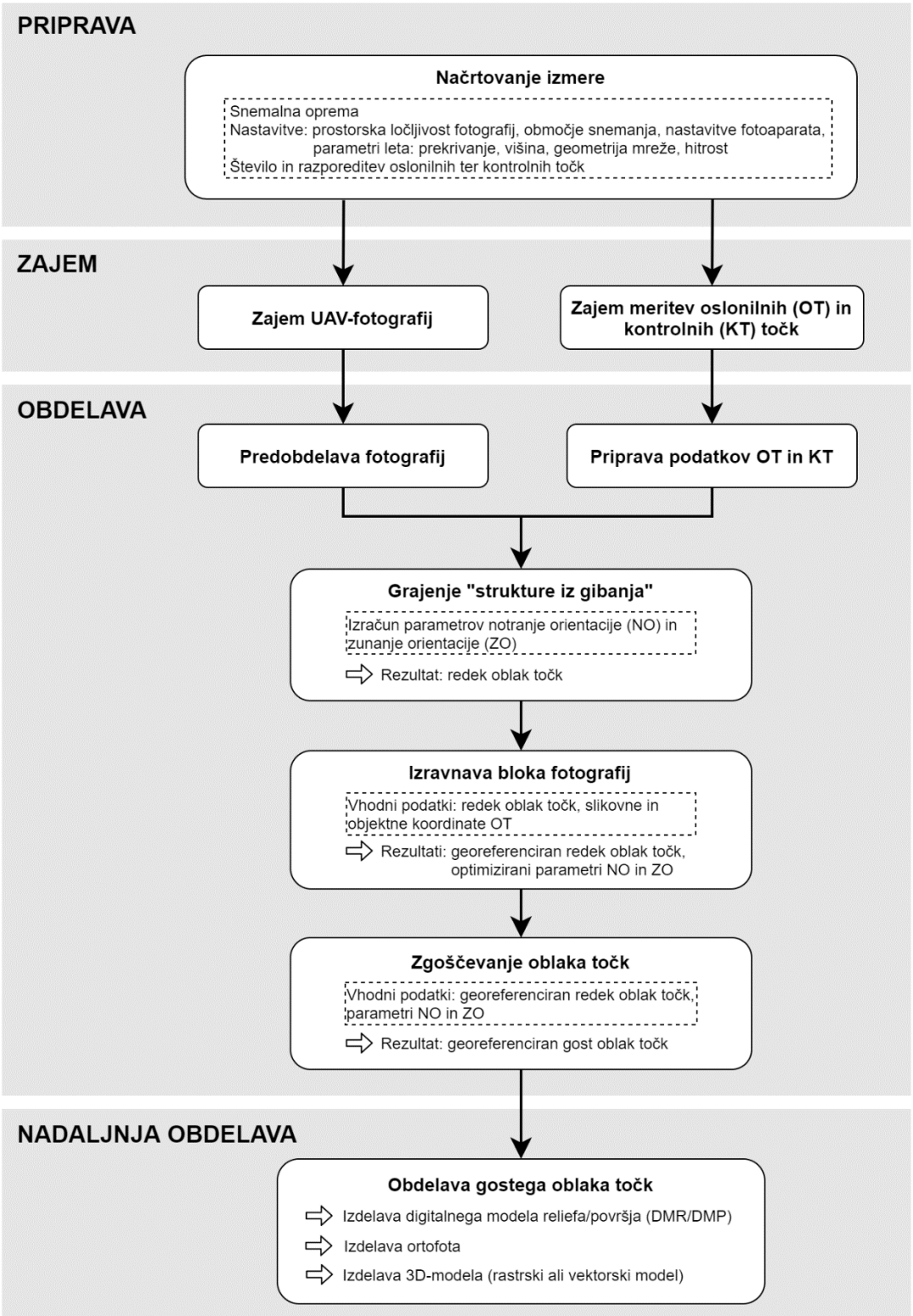
ki določa pogoje za varno izvajanje snemanja z letalniki z maso med 0,5 in 150 kilogrami. Skladno z navedeno uredbo je v Sloveniji mogoče uporabljati letalnike le v območju vidnega polja, kar pomeni, da ima operater vedno vizualni stik z letalnikom med letom, na oddaljenosti največ 500 metrov od operaterja. Snemamo lahko na višini od 50 do 150 metrov nad terenom, razen na območjih, kjer zaradi prisotnosti letališč ali drugih pomembnih objektov veljajo strožja pravila. Glede na značilnosti območja snemanja, predvsem glede na stopnjo poseljenosti in prisotnost ljudi, so z uredbo določene zahteve, ki jih mora izpolnjevati tako letalnik v smislu zahtevanih sestavnih delov platforme kot tudi operater z ustrezno pripravo in izvedbo snemanja. S 1. 1. 2021 se je začela uporabljati nova evropska zakonodaja o sistemih daljinsko vodenih letalnikov in pravilih za njihovo upravljanje, ki se razlikuje od leta 2016 sprejete in še vedno aktualne slovenske zakonodaje na tem področju. Do nedavnega je vsaka država samostojno urejala področje uporabe daljinsko vodenih letalnikov, z novo zakonodajo pa je to področje poenoteno za vse države Evropske unije. Nova zakonodaja določa nove kategorije, v okviru katerih se uporabljajo daljinsko vodeni letalniki, in sicer glede na značilnosti snemalnega območja, uporabljenega letalnika in pogoje uporabe (CAA, 2020).

2.2.3 Procesni koraki v UAV-fotogrametriji

V nadaljevanju sledi opis posameznih procesnih korakov v UAV-fotogrametriji, ki združuje pripravo izmere, zajem podatkov na terenu in obdelavo zajetih podatkov za pridobitev fotogrametričnega oblaka točk. Nadalje lahko izvedemo postopke za pridobitev izbranega fotogrametričnega izdelka, kot so digitalni model reliefa, ortofoto ali 3D-model. Na sliki 4 je podan splošen postopek UAV-fotogrametrije z uporabo mikro ali mini letalnikov, nemerskih fotoaparatov, posrednega georeferenciranja in prilagojenih fotogrametričnih programskih okolij za obdelavo fotografij oziroma posnetkov (Nex in Remondino, 2014; Iglhaut et al., 2019).

V fazi priprave izvedemo načrtovanje izmere, ki vključuje izbiro primerne snemalne opreme za zastavljen namen snemanja. Glede na namen uporabe zajetih fotogrametričnih podatkov se odločimo za ustrezen tip snemalnega sistema (na primer letalnike s fiksnimi krili/rotorji) s pripadajočimi senzorji za navigacijo in orientacijo letalnika ter enim ali več senzorji za zajem fotogrametričnih podatkov. Pri UAV-fotogrametriji je to največkrat lažji nemerski fotoaparat za zajem posnetkov v spektru vidne svetlobe. V tej fazi postopka določimo tudi vhodne parametre snemanja, kot so območje snemanja, prostorska ločljivost, nastavitve fotoaparata (velikost odprte zaslonke, čas ekspozicije, stopnja občutljivosti senzorja ISO ipd.) in parametre leta, ki bodo omogočili pridobitev rezultatov ustrezne kakovosti (prekrivanje fotografij, višina leta nad terenom, geometrija mreže posnetkov, hitrost letalnika med letom). Hkrati v tej fazi določimo število oslonilnih točk (angl. *ground control points – GCP*) in kontrolnih točk (angl. *check points – CP*) ter določimo njihovo razporeditev po snemalnem območju.

Fazi načrtovanja sledi izvedba izmere na terenu, ki vključuje zajem fotogrametričnih podatkov, zajem dodatnih podatkov, kot so podatki o položajih oslonilnih in kontrolnih točk, ter druge kontrolne meritve.



Slika 4: Potek priprave, zajema in obdelave fotogrametričnih podatkov v postopku UAV-fotogrametrije.

Figure 4: The procedure of preparation, acquisition, and processing of photogrammetric data in UAV photogrammetry.

Sledi obdelava zajetih podatkov, ki je sestavljena iz več korakov. Pred glavnim postopkom obdelave je treba v nekaterih primerih izvesti predobdelavo zajetih podatkov, kamor štejemo pretvorbo posnetkov v ustrezen datotečni format, radiometrično izboljšavo in maskiranje neželenih elementov na posnetkih. Prav tako uredimo podatke o položaju oslonilnih in kontrolnih točk s pretvorbo v ustrezno obliko ali s transformacijo v izbran prostorski referenčni koordinatni sistem. Sledi izvedba postopka grajenja strukture iz gibanja (angl. *structure from motion – SfM*), v katerem s samodejnim postopkom iskanja ujemajočih točk med fotografijami hkrati določimo 3D-geometrijo zajetega območja, parametre notranje orientacije in približne parametre zunanje orientacije posnetkov v poljubnem prostorskem koordinatnem sistemu. Rezultat tega koraka obdelave je redek oblak točk. Temu koraku sledi izmera slikovnih koordinat oslonilnih in kontrolnih točk na posnetkih, ki so poleg redkega oblaka točk ter začetnih vrednosti parametrov notranje in zunanje orientacije vhodni podatek v izravnavo bloka posnetkov (angl. *bundle block adjustment*). Z izravnavo bloka posnetkov pridobimo redek georeferenciran fotogrametrični oblak točk. Ta je vhodni podatek v naslednji korak obdelave, ki obsega postopek gostega slikovnega ujemanja DIM (angl. *dense image matching*) oziroma MVS (angl. *multi-view stereo*). V tem koraku se uporabijo algoritmi, ki redek oblak točk zgostijo v gost georeferenciran fotogrametrični oblak točk, kar je prvi izdelek fotogrametrične obdelave z uporabo algoritmov grajenja strukture iz gibanja in gostega slikovnega ujemanja.

Nadalje lahko gost oblak točk uporabimo za izdelavo drugih fotogrametričnih izdelkov, kot so digitalni model reliefa DMR (angl. *digital terrain model – DTM*) in digitalni model površja DMP (angl. *digital surface model – DSM*), ortofoto in 3D-model prostora v rastrski ali vektorski obliki, kot so mreža nepravilnih trikotnikov TIN (angl. *triangulated irregular network*), ploskovni ali žični vektorski 3D-model. V vseh fazah obdelave je treba za dosego želene končne kakovosti izdelka spremljati kakovost vmesnih rezultatov: od izravnave bloka posnetkov, gostega oblaka točk do kakovosti posameznih fotogrametričnih izdelkov.

2.2.4 Uporaba UAV-fotogrametrije

Čeprav so se prvi daljinsko vodeni letalniki za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje uporabljali že konec 70. let prejšnjega stoletja (Eisenbeiss, 2009), je šele razvoj lažjih, cenejših, stabilnejših in zmogljivejših snemalnih sistemov ter senzorjev, nameščenih na teh sistemih, omogočil množičnejšo uporabo v civilne namene. V primerjavi z drugimi sorodnimi metodami zajema prostorskih podatkov, kot so klasično zračno oziroma aero in terestrično fotogrametrično snemanje ter aero, mobilno in terestrično lasersko skeniranje, omogoča daljinsko vodeni letalnik relativno hiter in cenovno ugoden množični zajem prostorskih podatkov. Letalniki iz kategorij mikro in mini po Everaerts (2009), ki se v fotogrametriji najpogosteje uporabljajo, so primerni za snemanje manjših območij, kot jih praviloma snemamo z večjimi letalskimi sistemi za fotogrametrično snemanje ali laserskim skeniranjem. Hkrati pa

omogočajo hitrejši zajem podatkov na manjših območjih v primerjavi s terestričnimi metodami. Na množično uporabo letalnikov v zadnjem desetletju je poleg zmogljivejših senzorjev vplival tudi razvoj specializirane programske opreme za obdelavo teh podatkov. Številna odprtokodna in komercialna programska okolja omogočajo učinkovito načrtovanje izmere, izvedbo zajema podatkov in ustrezno obdelavo za pridobitev želenih rezultatov (Nex in Remondino, 2014).

Relativno hitra in samodejna izvedba zajema ter obdelave podatkov, zajetih z letalnikom, je prispevala k vse širši uporabi te tehnologije. Fotogrametrični oblak točk in z njim povezani izdelki se uporabljajo na različnih strokovnih področjih. Everaerts (2009) ter Nex in Remondino (2014) navajajo mnogo področij uporabe. Izpostavimo lahko kmetijstvo (Candiago et al., 2015), gozdarstvo (Dandois in Ellis, 2013), ekologijo (Anderson in Gaston, 2013), geomorfološke analize (Turner et al., 2015; Gillan et al., 2017), tradicionalne naloge kartiranja in katastrov nepremičnin (Manyoky et al., 2012), arheologijo in varstvo kulturne dediščine (Bendea et al., 2007), energetiko (Jiang et al., 2017) idr. Tovrstni fotogrametrični podatki zagotavljajo podlago za analizo stanja v prostoru in omogočajo sprejemanje ustreznih odločitev o nadaljnjih ukrepih.

Omejitve pri uporabi daljinsko vodenih zračnih sistemov za zdaj bolj kot iz tehnologije izhajajo iz zakonodaje. Te omejitve so namenjene predvsem zagotavljanju zasebnosti in varnosti ljudi ter zaščiti njihovih materialnih dobrin v okolju, kjer se izvaja snemanje z letalnikom, zato je praviloma prepovedana neomejena uporaba teh sistemov. Kljub dobro razviti tehnologiji še vedno obstaja negotovost pri zagotavljanju varnega delovanja letalnikov, kar je prav tako treba upoštevati. Zaradi snemanja z letalnikom, ki se izvaja brez človeške posadke na krovu, je težko predvideti vse morebitne vplive na delovanje sistema, ki bi lahko povzročili nepopravljivo škodo pri ljudeh ali na njihovem premoženju. Čeprav zakonske omejitve v marsikaterem primeru omejujejo ali celo preprečujejo izvedbo snemanja z letalnikom, so kljub temu smiselne prav zaradi zagotavljanja varnosti in zasebnosti.

2.3 3D-modeliranje v GIS

Geografski informacijski sistem (GIS) je sistem orodij za zajem, upravljanje, analizo in predstavitev prostorskih podatkov oziroma informacij. Tradicionalno se podatki o stanju in dogajanju v prostoru obravnavajo v le dveh razsežnostih (2D ali 2,5D) – bodisi v fizični ali digitalni obliki. Ker pa živimo v 3D-okolju, je prostorske podatke smiselno zajeti, analizirati in jih grafično prikazati v vseh treh prostorskih razsežnostih. V preteklosti je bila ponazoritev stvarnosti v obliki 3D-modela prostora in nadaljnja uporaba 3D-prostorskih podatkov otežena predvsem zaradi tehnoloških omejitev, kar je z razvojem različnih tehnologij in rešitev na tem področju postalo lažje izvedljivo. Dodana vrednost uporabe 3D-prostorskih podatkov je potrjena v aplikacijah na več različnih področjih, kot so gradbeništvo, arhitektura, geologija, prostorsko načrtovanje, navigacija, okoljske študije idr. (Abdul-

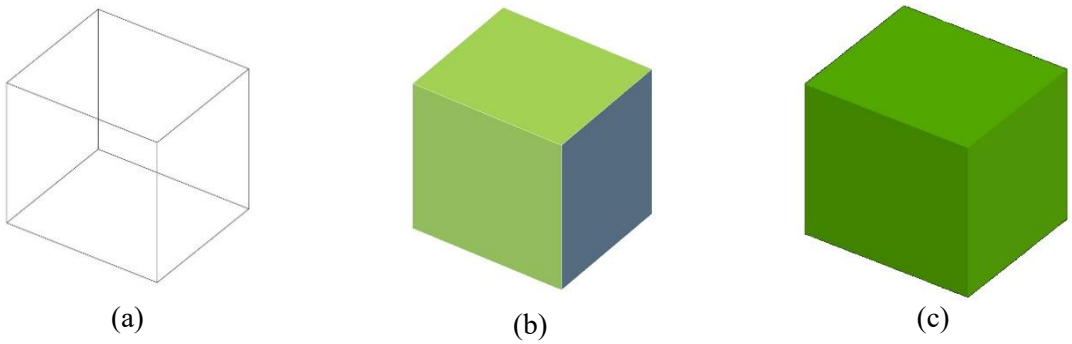
Rahman in Pilouk, 2007). Čeprav uporaba 3D-prostorskih podatkov v GIS omogoča pridobitev številnih uporabnih informacij, je njihova obravnava še vedno zelo kompleksna v primerjavi s klasičnimi 2D-modeli prostora v GIS – tako z vidika modeliranja, obdelave podatkov, prostorskih analiz kot z vidika vizualizacije podatkov (Coote et al., 2017).

Prostorske objekte in druge pojave (prostorske entitete) v GIS-okolju prikažemo v obliki modela, ki predstavlja poenostavljeno obliko izbranega dela stvarnosti. Postopek, s katerim razvijemo trirazsežno predstavitev izbrane entitete v prostoru, imenujemo 3D-modeliranje. Rezultat tega postopka je georeferencirani 3D-model prostorske entitete, kjer poznamo (Kresse in Danko, 2012):

- modeliranje s tehniko porazdeljevanja prostora: prostor razdelimo na enako velike geometrijske 3D-celice (voksle), ki opisujejo objekte v prostoru;
- poligonsko modeliranje: kompleksne prostorske entitete so razčlenjene v veliko preprostih poligonov, ki skupaj tvorijo sklenjeno mrežo (angl. *mesh*); primer sklenjene mreže poligonov je TIN-mreža površja; rezultat poligonskega modeliranja je lahko tudi model robnih ploskev (angl. *boundary representation – B-Rep*), kjer robne ploskve omejujejo telo;
- implicitno modeliranje: določitev oblike prostorske entitete preko implicitne enačbe površine;
- modeliranje z uporabo geometričnih gradnikov: prostorska entiteta je sestavljena iz enega ali več geometričnih gradnikov, ki skupaj sestavljajo trden objekt.

Na področju 3D-modeliranja prostorskih entitet so se uveljavili trije osnovni tipi prikaza rezultatov modeliranja v vektorski obliki (slika 5):

- žični model (angl. *wire-frame model*): 3D-linijska predstavitev objekta, ki vsebuje le robove, brez vmesnih ploskev; gre za najpreprostejši prikaz 3D-modela prostorske entitete, ki je najpogosteje uporabljena na področju modeliranja v okoljih CAD (angl. *computer-aided design*);
- ploskovni model (angl. *surface model*): 3D-model je sestavljen iz posameznih robnih ploskev, ki določajo zunanjost objekta; tovrstna predstavitev je kompleksnejša od žičnega modela, vendar omogoča nedvoumen opis objekta, saj vsebuje tako robove kot zunanje površine; ploskvam, ki določajo model, lahko pripišemo izbrane lastnosti (na primer teksturo, barvo ali hrapavost), zato so ploskovni modeli pogosto uporabljeni v vizualizacijah;
- prostorninski model (angl. *solid model*): 3D-model je definiran z geometrijskim telesom; omogoča popolno, pravilno in nedvoumno predstavitev objekta (popolnost pomeni jasno razmejitev, kaj je zunanjost in kaj notranjostjo telesa; pravilnost je opredeljena v smislu pravilne topolške povezanosti med vozlišči, robovi in ploskvami telesa; nedvoumnost določa enolično predstavitev geometrije in topologije telesa).



Slika 5: Tipi predstavitve 3D-modelov: (a) žični model, (b) ploskovni model, (c) prostorninski model.
Figure 5: Types of 3D-model presentation: (a) the wire-frame model, (b) the surface model, (c) the solid model.

V disertaciji se ukvarjamo s 3D-modeliranjem stavb, pri čemer se bomo omejili na njihovo predstavitev v obliki, ki je skladna s standardom OGC CityGML.

2.3.1 OGC CityGML

Standardi se ne razvijajo zgolj v okviru formalnih organizacij za standardizacijo, kot je ISO, temveč se velikokrat pojavi potreba po poenotenju posameznih izdelkov, storitev ali procesov med proizvajalci ali uporabniki. Takšno poenotenje olajša delo z zagotavljanjem medopravilnih rešitev na nekem področju ter pripomore k večji učinkovitosti vseh deležnikov. Na področju prostorskih podatkov deluje s tem namenom mednarodni konzorcij OGC (angl. *Open Geospatial Consortium*), ki skrbi za razvoj javno dostopnih industrijskih standardov s področja prostorskih podatkov in storitev. Standardi OGC omogočajo medopravilnost rešitev na področju prostorskih podatkov in storitev tako med proizvajalci kot uporabniki prostorskih podatkov. Standardi OGC se nanašajo predvsem na poenotenje zapisa, obdelave, izmenjave in uporabe prostorskih podatkov v okviru enotnih formatov in spletih servisov (OGC, 2020). Potreba po standardizaciji na področju prostorskih podatkov in storitev je postala očitna s pojavom digitalnih prostorskih podatkov in sega v 80. leta preteklega stoletja, že v 90. letih pa je bil ustanovljen OGC. Pri razvoju standardov sodeluje širok krog udeležencev, od raziskovalnih institucij, državnih organov do podjetij, ki se ukvarjajo s to tematiko. S tem je dosežen širok dogovor o vsebini standardov, hkrati pa je olajšana njihova širša implementacija, kar je eden glavnih ciljev konzorcija OGC (Lemmens, 2011).

Eno izmed številnih področji delovanja OGC je razvoj standardov in rešitev na področju prostorske podatkovne podpore za grajeno okolje, s poudarkom na obravnavi celotnega življenjskega cikla grajenih objektov: od načrtovanja, izgradnje do upravljanja, obnove in rušenja. Cilj pobud na tem področju, s tem pa tudi standardov, je zagotoviti podatkovno in informacijsko medopravilnost med različnimi sektorji, ki ponujajo in potrebujejo prostorske podatke o grajenem (in naravnem) okolju, ter s tem omogočiti povezovanje in integracijo različnih prostorskih podatkov za dosego čim boljše komunikacije

med vsemi deležniki (OGC, 2020). Eden od pomembnejših standardov OGC na področju 3D-prostorskih podatkov je standard OGC CityGML.

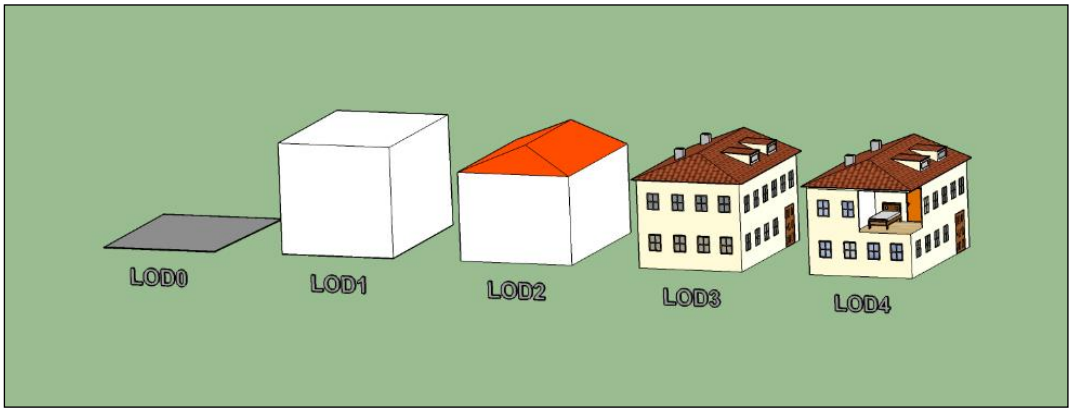
Mednarodni standard OGC CityGML (Open Geospatial Consortium, 2012) je odprti standard in opredeljuje konceptualni model za trirazsežno modeliranje podatkov o grajenem in naravnem okolju. Čeprav je v imenu standarda beseda GML (angl. *Geography Markup Language*), ki označuje na XML-jeziku temelječo standardno aplikativno shemo za prostorske podatke, CityGML ne predstavlja aplikativne sheme, ampak le na konceptualni ravni opredeljuje 3D-modele mest in pokrajin (angl. *3D city and landscape model*). Pomembno pri tem je, da standard OGC CityGML podaja poenoteno shemo za modeliranje georeferenciranih semantičnih vektorskih 3D-modelov mest in pokrajin. Standard ne predpisuje načina podajanja grafične predstavitve geometrije 3D-podatkov, kot je to običajno pri drugih standardih za zapis 3D-podatkov (na primer DXF, VRML, X3D, Collada), poudarja pa nujnost semantičnih in topoloških lastnosti, ki so pomembne pri različnih prostorskih analizah in simulacijah (van den Brink et al., 2013). Poleg osnovnih elementov modelov mest v obliki stavb in sorodnih grajenih objektov vključuje konceptualna shema tudi dodatne tematike, ki so pomembne za posamezen model mesta, kot so digitalni model reliefa, podatki o vegetaciji, rabi tal, vodnih površinah, infrastrukturi in dodatni opremi mest. Osnovno konceptualno shemo je mogoče razširiti in vanjo vključiti dodatne prostorske podatke, ki se nanašajo na specifično področje obravnave v okviru izbrane aplikacije, na primer modeliranje hrupa v urbanem okolju, modeliranje energetske učinkovitosti stavb v mestih (Billen et al., 2014).

Standard OGC CityGML predvideva modeliranje, shranjevanje in izmenjavo podatkov modelov mest in pokrajin na različnih stopnjah oziroma ravneh podrobnosti LOD (angl. *level of detail*). Stopnja prostorske podrobnosti pomeni stopnjo poenostavitve modela stvarnih entitet v smislu geometrijskih in semantičnih lastnosti entitete. Višja kot je stopnja podrobnosti, podrobnejša je predstavitev objekta tako v geometrijskem kot semantičnem smislu. Stvarne entitete v izbranem modelu prostora imajo lahko sicer različno stopnjo podrobnosti. Prav tako je lahko isti 3D-model prostora na voljo v različnih stopnjah podrobnosti, čeprav se v praksi redkeje srečamo s takšnimi rešitvami. 3D-modele prostora v različnih stopnjah podrobnosti je namreč težje shranjevati in vzdrževati, saj uporabljena programska oprema pogosto ni prilagojena prikazu podatkov v več stopnjah podrobnosti (Biljecki et al., 2016). Trenutno veljavna različica standarda OGC CityGML 2.0 loči pet stopenj podrobnosti (LOD) (Open Geospatial Consortium, 2012):

- **LOD0**: najpreprostejša oblika predstavitve mesta in pokrajine, običajno jo sestavlja digitalni model reliefa; kot primer prostorskih entitet navajamo stavbe, ki so v modelu prikazane z obrisi stika stavbe s površjem (angl. *building footprint*) ali obrisom oboda strehe (angl. *roof edge polygon*);

- **LOD1:** model sestavljajo preprosti bloki – prizme, ki predstavljajo prostorske entitete; stavbe so na primer prikazane kot enostavna geometrijska telesa, strehe stavb so modelirane z ravnimi ploskvami;
- **LOD2:** model podaja več podrobnosti prostorskih entitet s podrobnejšo geometrijo; stavbe so na primer v modelu določene z izoblikovano streho (enokapnica, dvokapnica, ravna streha ipd.), podrobnosti na strehah so izpuščene (na primer dimniki); zunanje površine objektov so lahko prikazane s teksturami;
- **LOD3:** model podaja podroben prikaz zunanje oblike in strukture prostorskih entitet – model je v primerjavi s predhodnimi modeli mnogo podrobnejši v geometrijskem in semantičnem smislu; pri stavbah so tako strehe kot fasade modelirane podrobno, vključno z elementi zunanje opreme stavb, kot so balkoni, dimniki, okna, vrata ipd.;
- **LOD4:** predstavlja najpodrobnejši in najnatančnejši model mest in pokrajin, kjer so objekti iz LOD3 nadgrajeni z dodanimi elementi o notranji geometriji in opremi; pri stavbah je tako predviden podroben model notranjosti stavb, kar vključuje model notranjih prostorov in opreme.

Slika 6 prikazuje stopnje podrobnosti modelov stavb, skladne z veljavno različico standarda OGC CityGML 2.0 (2012). Izbira stopnje podrobnosti je odvisna od namena uporabe modela. Skladno z višjo stopnjo geometrijske in semantične podrobnosti prikaza stvarnih prostorskih entitet v modelu se poveča tudi zahtevana položajna točnost podatkov.



Slika 6: Stopnje podrobnosti (LOD), ki so določene v standardu OGC CityGML 2.0 (Open Geospatial Consortium, 2012).

Figure 6: The levels of detail (LOD) as defined in the OGC CityGML 2.0 standard (Open Geospatial Consortium, 2012).

V preglednici 2 so podane značilnosti petih stopenj podrobnosti modelov prostorskih entitet za primer stavb po standardu OGC CityGML skupaj s predlaganimi vrednostmi parametrov kakovosti. Glede na dosedanje dejavnosti na področju razvoja standardov v domeni 3D-modeliranja prostora se predvideva, da bo v kratkem objavljena nova različica standarda OGC CityGML 3.0, s katero se bo nekoliko

spremenila dosedanja opredelitev stopenj podrobnosti. Najvišja raven (LOD4) bo ukinjena, za primere stavb pa napovedujejo, da bo notranja geometrija modelirana tudi na nižjih ravneh od LOD0 do LOD3, skladno s stopnjo podrobnosti zunanjih elementov stavb (Kutzner et al., 2020).

Preglednica 2: OGC CityGML 2.0 stopnje podrobnosti (LOD0-LOD4) s predlagano točnostjo podatkov (Open Geospatial Consortium, 2012).

Table 2: OGC CityGML 2.0 levels of detail (LOD0-LOD4) with proposed data accuracy (Open Geospatial Consortium, 2012).

	LOD0	**LOD1**	**LOD2**	**LOD3**	**LOD4**
Obseg modela	Regionalno modeliranje; pokrajine	Mesto, pokrajina	Mesto, del mesta	Manjše območje, skupina objektov	Posamezni objekti, arhitekturni modeli
Razred točnosti modela	Najnižji	Nizek	Srednji	Visok	Najvišji
Absolutna točnost točk (ravninsko/višinsko)	Manjša kot pri LOD1	5/5 m	2/2 m	0,5/0,5 m	0,2/0,2 m
Stopanja generalizacije	Največja	Bloki objektov so generalizirani; prikazani so objekti, večji od 6 m x 6 m / 3 m	Objekti so generalizirani; prikazani so objekti, večji od 4 m x 4 m / 2 m	Objekti imajo realističen videz; prikazani so objekti, večji od 2 m x 2 m / 1 m	Prikazani so konstrukcijski elementi ter okna in vrata
Zunanji gradbeni elementi	Ne	Ne	Preproste oblike	Značilni zunanji elementi	Modelirana dejanska oblika
Predstavitev/oblika strehe	Ne	Ravna streha	Preproste oblike strehe	Podrobne oblike strehe	Podrobne oblike strehe
Nadstrešni deli stavbe	Ne	Ne	Lahko, če je oblika znana	Dejanska oblika nadstrešnih delov strehe	Dejanska oblika nadstrešnih delov strehe s podrobnostmi
Dodatna oprema mesta	Ne	Samo pomembni objekti	Objekti v poenostavljeni obliki	Dejanske oblike posameznih objektov	Dejanske oblike posameznih objektov
Elementi vegetacije	Ne	Samo pomembni objekti	Objekti v poenostavljeni obliki	Dejanske oblike posameznih objektov	Dejanske oblike posameznih objektov

Standard OGC CityGML opredeljuje podatkovne razrede s pripadajočimi atributi in razmerji med njimi za glavne prostorske entitete, ki jih najdemo v 3D-modelih mest in pokrajin. Prvi del podatkovnega modela je osrednji modul (angl. *core module*) in se nanaša na osnovne podatke, ki so skupni vsem objektom v modelu. Drugi del so razširitveni moduli (angl. *extension modules*), ki se nanašajo na specifične podatke o posameznem elementu v modelu, kot je na primer stavba, raba tal, relief, promet, most, predor, vegetacija itd. Standard OGC CityGML dovoljuje, da v 3D-modelu mest in pokrajin poleg obveznega osrednjega modula uporabimo različne kombinacije razširitvenih modulov. Tako v 3D-model vključimo le tiste objekte in njihove lastnosti, ki so relevantni za našo aplikacijo (Open Geospatial Consortium, 2012).

Pomembno pri standardu OGC CityGML je, da prinaša okvir za kompleksno 3D-modeliranje geografskega prostora. Če so bili v preteklosti 3D-modeli mest in pokrajin namenjeni predvsem vizualizaciji, se danes vse bolj pojavlja potreba po izdelavi kompleksnejših modelov z geometričnimi,

topološkimi in opisnimi podatki (Billen et al., 2014; Biljecki et al., 2015). Ti modeli torej poleg geometrije združujejo tudi semantične podatke o prostorskih entitetah in njihovih delih, ki jih je mogoče uporabiti v zahtevnejših aplikacijah in analizah. Pri tem ima pomembno vlogo tudi nemotena izmenjava prostorskih podatkov in informacij med različnimi deležniki s čim manjšo izgubo pri prenosu. Standard OGC CityGML tako podaja okvir za modeliranje stvarnih entitet v prostoru z vidika geometrije, topologije kot tudi opisnih oziroma atributnih podatkov. Ker obravnavamo prostorske podatke, je izrednega pomena tudi jasna umestitev 3D-modela v izbran prostorski referenčni koordinatni sistem (Kolbe et al., 2009).

3D-modeli mest in pokrajin, skladni s standardom OGC CityGML, so uporabni na številnih področjih človekovega delovanja, kot so topografija in katastri nepremičnin ter upravljanje nepremičnin (Stoter in Salzmann, 2003; Drobež et al., 2016), prostorsko načrtovanje (Chen, 2011; Indrajit et al., 2020), navigacija (Cappelle et al., 2012), turizem in kulturna dediščina (Campanaro et al., 2016), energetika (Rosser et al., 2019), ukrepanje ob naravnih in drugih elementarnih nesrečah (Ozbek et al., 2016), okoljskih študijah (Stoter et al., 2008, 2020) idr. Kljub dodani vrednosti uporabe 3D-modelov stvarnega prostora v okoljih GIS, so ti prostorski podatki kompleksnejši za zajem, uporabo in shranjevanje v primerjavi s klasičnimi prostorskimi podatki v dveh razsežnostih (2D), zato je v nekaterih primerih uporabe še vedno bolj ekonomično uporabljati prostorske podatke v dveh razsežnostih. Razširitev v 3D-modele je smiselna za posebne primere, kjer je pomembna tudi višinska razsežnost (Biljecki et al., 2015). Zaradi široke uporabnosti se 3D-modeliranje prostora vse bolj uveljavlja v praksi, saj so številne javne institucije, kot so mesta, lokalne skupnosti, države, ter zasebna podjetja prepoznali prednosti, ki jih prinašajo semantično obogateni 3D-modeli mest in pokrajin. K vse večji uporabi prispeva tudi razvoj tehnologij za zajem in obdelavo podatkov (Gröger in Plümer, 2012).

Poleg uporabnosti je pomemben razmislek tudi o ekonomski vrednosti 3D-prostorskih podatkov, s čimer se ukvarjajo predvsem proizvajalci prostorskih podatkov in institucije na državnih, regionalnih ter lokalnih ravneh, ki so odgovorne za zagotavljanje uradne prostorske podatkovne infrastrukture. Dejanska ekonomska vrednost 3D-prostorskih podatkov in njihove uporabe je močno odvisna od konteksta, v katerem se podatki zajemajo, uporabljajo in shranjujejo (Wong, 2015). Dejstvo je, da je v marsikaterem primeru zaradi kompleksnosti področja za zdaj tako z ekonomskega kot uporabniškega vidika še vedno bolj smotrno uporabljati podatke v dveh razsežnostih. 3D-podatkovni modeli imajo pogosto še dodatno slabost, in sicer se izdelujejo zgolj za specifično uporabo po načelu »*fit-for-purpose*« in jih je težko uporabiti na več različnih področjih. Kljub vsemu lahko na podlagi številnih primerov uporabe potrdimo uporabnost in uporabniške potrebe po 3D-podatkovnih modelih, iz česar lahko sklepamo, da se bo njihova uporaba v prihodnje še povečevala (Biljecki et al., 2015), tudi v okviru državne prostorske podatkovne infrastrukture (Coote et al., 2017).

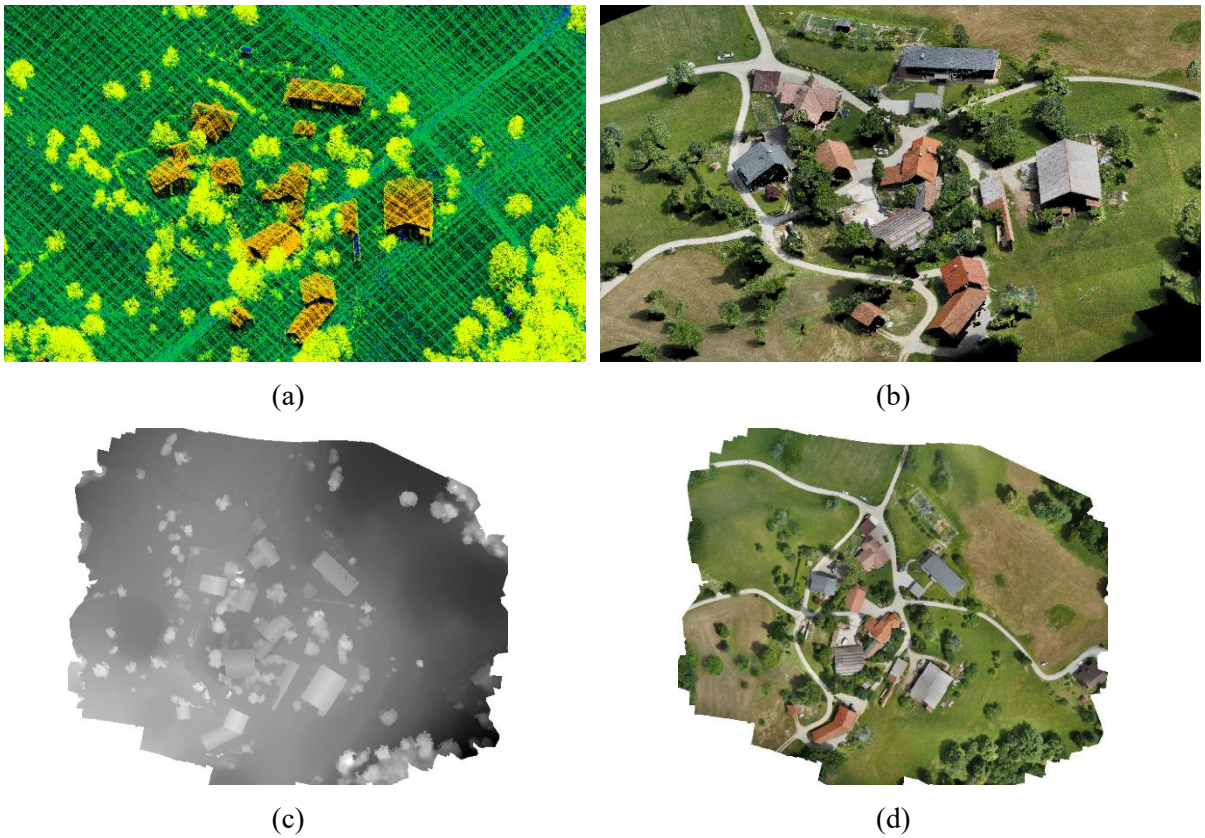
2.3.2 Prostorski podatki za 3D-modeliranje stavb

Za modeliranje stavb v okviru 3D-modeliranja mest in pokrajin (tudi topografskega modeliranja) na podlagi prostorskih podatkov so se razvili različni pristopi, ki se med seboj razlikujejo že glede na vhodne podatke. V prvem obdobju 3D-modeliranja stavb, s tem pa tudi mest in pokrajin, so se uporabljali predvsem klasični zračni oziroma aero fotogrametrični posnetki, iz katerih je mogoče s stereo zajemom določiti 3D-položaj stavbe v prostoru in rekonstruirati 3D-model (glej tudi Drobež, 2016). V zadnjih dveh desetletjih se za 3D-modeliranje stavb pogosto uporablja tudi oblak točk, ki ga pridobimo z laserskim skeniranjem z uporabo tehnologije LiDAR (angl. *light detection and ranging*) ali s fotogrametričnim gostim slikovnim ujemanjem (angl. *dense image matching*).

V začetnem obdobju razvoja metod in orodij za samodejno ali polsamodejno 3D-rekonstrukcijo stavb iz georeferenciranega oblaka točk je bila v ospredju uporaba podatkov aero laserskega skeniranja – ALS (angl. *airborne laser scanning*). Tovrsten oblak točk se pri 3D-modeliranju stavb uporablja za modeliranje streh kot glavnega elementa stavb pri 3D-modeliranju mest in pokrajin. Streham se nato dodajo preprosti zunanji zidovi z dvigovanjem odtisa stavbe na terenu za pridobitev končnega 3D-modela (Dorninger in Pfeifer, 2008; Oude Elberink in Vosselman, 2009; Henn et al., 2013; Jarzabek-Rychard in Borkowski, 2016). Pri modeliranju stavb, predvsem fasad, se uporabljajo tudi laserski oblaki točk mobilnega laserskega skeniranja – MLS (angl. *mobile laser scanning*) in terestričnega laserskega skeniranja – TLS (angl. *terrestrial laser scanning*) ali kombinacija več oblakov točk iz različnih virov. Integracija različnih oblakov točk omogoča pridobitev popolnejšega 3D-modela stavbe, saj vhodni oblak točk vsebuje tudi dele stavbe, ki pri uporabi zgolj ene vrste oblaka točk niso zajeti (prisotnost senc, zastrtost posameznih delov itd.). Prav tako se za 3D-modeliranje stavb lahko uporabijo 2,5D-podatki v obliki digitalnega modela površja (DMP), izdelanega iz oblaka točk. Uporaba DMP v kombinaciji z digitalnim modelom reliefa (DMR), izvornim laserskim oblakom točk ali ortofotom omogoča prepoznavanje stavb ter nadaljnje modeliranje.

Z razvojem naprednih algoritmov in hkrati vse zanesljivejše strojne opreme prihaja v ospredje uporaba fotogrametričnih oblakov točk, pridobljenih z uporabo gostega slikovnega ujemanja. Fotogrametrični oblak točk pridobimo z obdelavo zgolj navpičnih fotografij ali v kombinaciji s poševnimi fotografijami. Ustrezna geometrična in radiometrična kakovost vhodnih fotografij ob visokem prekrivanju omogoča pridobitev gostega oblaka točk, ki je primeren ne zgolj za vizualizacijo, temveč tudi za nadaljnje prepoznavanje in modeliranje različnih objektov v prostoru (Haala in Kada, 2010; Toschi et al., 2017). Prednost uporabe fotogrametričnega oblaka točk je v dejstvu, da je danes mogoče z daljinsko vodenim letalnikom na manjšem območju lažje in ceneje zajeti podatke, ki jih lahko nato uporabimo za 3D-modeliranje. Dodatna prednost je radiometrični podatek vsake točke v oblaku točk, ki ga lahko uporabimo za lažje prepoznavanje in ekstrakcijo točk, ki predstavljajo stavbe v oblaku točk za nadaljnjo

uporabo za 3D-modeliranje. Slika 7 prikazuje primere prostorskih podatkov, ki jih lahko uporabimo za 3D-modeliranje stavb. 3D-modeliranje stavb na osnovi fotogrametričnega oblaka točk, zajetega z daljinsko vodenim letalnikom, je tudi tema naše raziskave.



(a) (b)

(c) (d)

Slika 7: Primeri vhodnih podatkov za 3D-modeliranje stavb: (a) klasificiran aero laserski oblak točk, (b) fotogrametrični oblak točk, (c) digitalni model površja, (d) ortofoto.

Figure 7: Examples of input spatial data for 3D building modelling: (a) classified aerial laser scanning point cloud, (b) photogrammetric point cloud, (c) digital surface model, (d) orthophoto imagery.

Številni algoritmi za 3D-modeliranje stavb poleg osnovnega vira podatkov v postopku modeliranja upoštevajo tudi dodatne prostorske podatke, kot so 2D-obrisi stavb iz topografskih ali katastrskih podatkovnih zbirk (Haala in Kada, 2010). Takšni podatki običajno olajšajo prepoznavanje stavb v oblaku točk, torej jih je lažje ločiti od ostalih entitet v prostoru, in omogočijo topološko pravilno ter ustrezno podrobno modeliranje prostora. Pri vrednotenju kakovosti končnega 3D-modela stavbe je treba upoštevati tudi kakovost dodatnih podatkov, saj običajno pomembno vplivajo na točnost položaja, oblike in orientacije modela v prostoru ter tudi na popolnost modela (Tarsha-Kurdi et al., 2007).

Pri 3D-modeliranju stavb v splošnem velja, da so oblaki točk zaradi svoje gostote učinkoviti pri določanju višin in ravnih ploskev, medtem ko je robove težje določiti. Na drugi strani pa rastrski posnetki ob zadostni prostorski ločljivosti omogočajo kakovostno prepoznavanje robov, v primeru stavb sta to obod strehe ali obris stavbe na terenu (Kaartinen et al., 2005). Prav zaradi tega so se razvile metode,

ki za 3D-rekonstrukcijo stavb uporabljajo kombinacijo različnih vhodnih podatkov, s čimer izkoriščajo prednosti posameznega tipa podatkov, na primer uporaba oblaka točk in ortofota (Awrangjeb et al., 2013).

»Ta stran je namenoma prazna«

3 METODOLOGIJA IN VIRI PODATKOV

Pričujoča raziskava obravnava tematiko kakovosti prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju stavb na osnovi fotogrametričnega oblaka točk. Raziskovalno delo in nadaljnja vsebina doktorske disertacije sta razdeljena na tri glavne dele.

V prvem delu smo opravili analizo postopkov, ki jih je treba izvesti v procesu 3D-modeliranja stavb na osnovi podatkov, zajetih z daljinsko vodenimi letalniki (v nadaljevanju tudi: UAV). Sledi analiza dejavnikov, ki vplivajo na kakovost končnega izdelka v posameznem koraku obravnavanega procesa. V drugem delu raziskave smo se osredotočili na podrobno modeliranje procesa, kar je podlaga za stalno spremljanje in zagotavljanje kakovosti v postopku 3D-modeliranja stavb na osnovi UAV-fotogrametričnega oblaka točk. V tretjem, zadnjem delu raziskave smo izvedli praktični preizkus predlaganega konceptualnega modela za spremljanje kakovosti pri 3D-modeliranju stavb, ki temelji na že omenjenem podrobnem procesnem modelu 3D-modeliranja stavb. Poleg evalvacije procesnega modela smo v eksperimentalnem delu preverjali vpliv izbranih dejavnikov na kakovost izdelkov 3D-modeliranja stavb v posameznih fazah postopka.

V tem poglavju podrobneje opisujemo uporabljeno metodologijo in vire podatkov.

3.1 Študij literature

V prvem delu raziskave smo na podlagi literature in izkustva analizirali postopke, ki so potrebni v celotni verigi procesa od zajema prostorskih podatkov z daljinsko vodenim letalnikom do izdelave vektorskega 3D-modela stavbe, skladnega s standardom OGC CityGML. Potem smo na temelju literature opredelili dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb na osnovi UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Vpliv izbranih dejavnikov smo v kasnejši fazi raziskave tudi preverili na študijah primerov. Postopke in dejavnike, ki vplivajo na kakovost v posamezni fazi zajema podatkov, njihove obdelave in 3D-modeliranja, smo torej analizirali na podlagi študija literature in jih z uporabo opisne metode predstavljamo v nadaljevanju doktorske naloge.

Pri pregledu literature smo se osredotočili na preučevanje znanstvenih objav v angleškem in slovenskem jeziku, in sicer v mednarodnih recenziranih revijah s faktorjem vpliva (IF) za področje fotogrametrije, daljinskega zaznavanja in geoinformatike. V analizo objav smo vključili tudi prispevke na znanstvenih konferencah mednarodnih združenj za obravnavano področje, predvsem mednarodne organizacije za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje ISPRS (angl. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*).

Z metodo analitične indukcije smo določili ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost pri zajemu, obdelavi in 3D-modeliranju stavb z uporabo UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Vpliv dejavnikov smo ovrednotili na podlagi analize objav s sklepanjem iz posameznih primerov na splošno.

3.2 Procesno modeliranje in razvoj konceptualnega modela za spremljanje kakovosti

Drugi, osrednji del raziskave je namenjen razvoju procesnega modela zajema in obdelave podatkov ter 3D-modeliranja stavb na podlagi UAV-fotogrametrije, ki je bil podlaga za zasnovo konceptualnega modela za spremljanje kakovosti v postopku 3D-modeliranja stavb. Procesni model smo izdelali na podlagi predhodnega študija literature in izkustva, opisali smo ga v obliki diagramov z uporabo standardiziranega jezika za modeliranje UML (angl. *Unified Modelling Language*). UML so v devetdesetih letih ustvarili Booch, Jacobson in Rumbaugh za potrebe objektno usmerjenega modeliranja. UML-notacija, ki je neodvisna od metodološkega postopka in okolja uporabe, se uporablja za analizo in načrtovanje stvarnih ali navideznih sistemov (Eriksson et al., 2004), v zadnjem desetletju pa se je uveljavila tudi pri procesnem modeliranju (Lisec et al., 2008). V nalogi je uporabljena aktualna različica industrijskega standarda združenja OMG (angl. *Object Management Group*), to je UML 2.5.1. Za namene predstavitve korakov obdelave UAV-fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranja stavb smo pripravili podroben opis procesov, grafično pa smo procesni model predstavili z UML-diagrami aktivnosti (angl. *activity diagram*), ki poleg vseh aktivnosti prikazuje zaporedje izvajanja posameznih aktivnosti.

Za definicijo konceptualnega modela za spremljanje in zagotavljanje kakovosti v opisanem procesu 3D-modeliranja stavb na osnovi fotogrametričnega oblaka točk smo procesni model, ki vključuje korake zajema, obdelave in modeliranja podatkov, razširili z dodanimi koraki, ki omogočajo spremljanje kakovosti v ključnih fazah procesa za zagotavljanje želene kakovosti rezultatov procesa. Tudi predlagane korake konceptualnega modela smo podrobno opisali in jih vključili v grafični prikaz procesnega modela z UML-diagramom aktivnosti.

3.3 Verifikacija konceptualnega modela za spremljanje kakovosti

Zadnji del disertacije je bil namenjen praktičnemu preizkusu izdelanega procesnega modela obdelave UAV-oblaka točk in 3D-modeliranja ter preverjanju ustreznosti konceptualnega modela za spremljanje kakovosti v posameznem koraku obdelave podatkov in 3D-modeliranja. V ta namen smo na študijskih primerih preverili pravilnost procesnega modela za obdelavo UAV-fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranja stavb ter hkrati pri spremljanju kakovosti preverili relevantnost razvitega konceptualnega modela za spremljanje kakovosti v posamezni fazi obdelave podatkov in modeliranja. Podatke smo zajeli na dveh študijskih območjih, jih obdelali v ustreznih programskih okoljih, izvedli

3D-modeliranje stavb ter ocenili kakovost končnega modela. Pri tem smo dodatno analizirali vplive izbranih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov, kot so snemalna višina letalnika, prekrivanje med fotografijami, število oslonilnih točk, uporabljenih za posredno georeferenciranje oblaka točk, in gostota oblaka točk.

3.3.1 Študijska območja

Testiranje procesnega modela in modela za spremljanje kakovosti 3D-modeliranja stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk smo izvedli na osnovi podatkov, zajetih na dveh študijskih območjih, to sta Kandrše in Vače.

Študijsko območje Kandrše

Študijsko območje s površino 6 hektarov (0,06 km^2) stoji na območju vasi Kandrše v osrednji Sloveniji. Območje je redko poseljeno, v sredini najdemo dva večja objekta (industrijski objekt in gasilski dom), južno od večjih objektov se razprostira travnik z dvema skupinama dreves na vzhodni in zahodni strani, na severnem delu območja stojita stanovanjska hiša in pripadajoči gospodarski objekt (slika 8). Območje je bilo primerno za izvedbo UAV-izmere, ker ni gosto poseljeno, saj je uporaba daljinsko vodenih letalnikov pogojena z omejitvami glede izvajanja letalskih operacij z letalniki v gosteje poseljenih urbanih okoljih.

UAV-izmera je bila izvedena 4. 5. 2020 v dopoldanskem času. Na obravnavanem študijskem območju smo izvedli tri prelete z letalnikom DJI Phantom Pro 4, ki so se med seboj razlikovali v vrednostih dveh parametrov leta letalnika, in sicer v (i) višini leta nad terenom in (ii) vzdolžnem ter prečnem prekrivanju med fotografijami. Na podlagi zajetih podatkov s študijskega območja Kandrše smo na preprostem primeru stanovanjske hiše in pripadajočega gospodarskega objekta izvedli preizkus splošnega procesnega modela za obdelavo UAV-fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranje stavb. Pri tem smo v posameznih fazah preverjali vrednosti parametrov kakovosti, kot je predlagano v konceptualnem modelu za spremljanje kakovosti podatkov. Poleg preizkusa celotnega procesnega modela smo za dele procesa izvedli analizo vpliva izbranih dejavnikov na kakovost podatkov, in sicer smo preverili vpliv višine leta letalnika nad terenom, vpliv prekrivanja fotografij in vpliv števila ter razporeditve oslonilnih točk na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk na celotnem študijskem območju. Nato smo preverili še vpliv višine leta in vpliv prekrivanja fotografij na kakovost končnega 3D-modela stavbe za izbran primer stanovanjske hiše in gospodarskega objekta.

Pri končni analizi kakovosti izdelanih 3D-modelov, skladnih s standardom OGC CityGML LOD2, smo preverili skladnost modelov z vhodnim oblakom točk in z referenčnim modelom, izdelanimi na podlagi

prostorskih podatkov, ki smo jih zajeli z neodvisno geodetsko metodo. Podrobnejši postopek zajema, obdelave in modeliranja s postopki iz procesnega modela ter analiza kakovosti rezultatov so opisani v eksperimentalnem delu naloge (poglavje 6).



Slika 8: Študijsko območje Kandrše.
Figure 8: Study area Kandrše.

Študijsko območje Vače

Drugo študijsko območje, ki je bilo uporabljeno za testiranje razvitega procesnega modela za obdelavo UAV-fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranje stavb, leži v okolici vasi Vače v osrednjem delu Slovenije. Površina snemalnega območja znaša približno 5,5 hektara (0,055 km^2). Na izbranem območju je manjše naselje s stanovanjskimi hišami, gospodarskimi poslopji in dodatnimi manjšimi objekti (slika 9). Tudi v tem primeru smo območje izbrali zaradi redke poseljenosti in oddaljenosti od gosto naseljenih urbanih središč. Zajem UAV-podatkov smo izvedli 8. 6. 2018 pozno dopoldan. Izvedli smo eno serijo snemanja z letalnikom Sky Hero X8, pri čemer smo uporabili nastavitve parametrov letalske misije glede na predhodno proučene priporočene vrednosti. Podatke smo obdelali z namenom, da preizkusimo celoten procesni model v celotni verigi procesa od zajema do izdelave vektorskega 3D-modela več

stavb. V analizi točnosti končnih 3D-modelov stavb smo primerjali izdelane modele z vhodnim oblakom točk. Na delovišču Vače smo se namreč osredotočili na relativno kakovost 3D-modela stavb glede na uporabljen oblak točk z namenom analize vpliva postopkov modeliranja na kakovost končnega modela. V ta namen smo dodatno na podatkih, zajetih na študijskem območju Vače, preverili vpliv gostote oblaka točk na položajno točnost določitve 2D-oboda stavbe. Podrobnejši opis postopkov zajema, obdelave in modeliranja, skladnih z razvitim procesnim modelom, je podan v poglavju 6.



Slika 9: Študijsko območje Vače.
Figure 9: Study area Vače.

3.3.2 Obdelava podatkov

Preizkus procesnega modela za obdelavo UAV-fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranje stavb ter konceptualnega modela za spremljanje kakovosti pri 3D-modeliranju stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk smo izvedli na osnovi podatkov, ki smo jih zajeli na terenu in pozneje obdelali v specializiranih programskih okoljih. Pred zajemom podatkov je treba izvesti načrtovanje zajema prostorskih podatkov z letalnikom, kjer glede na velikost izbranega snemalnega območja, izbrano mersko opremo in želeno prostorsko ločljivost zajetih fotografij določimo parametre leta. Sledi obdelava tako zajetih podatkov, ki smo jo izvedli v komercialnem programskem okolju *Agisoft Photoscan Professional ver. 1.4.3* za območje Vače oziroma *Agisoft Metashape Professional ver. 1.6.2* za območje Kandrše (Agisoft, 2020). Rezultat obdelave fotografij, ob upoštevanju podatkov o položaju

oslonilnih točk, je bil nestrukturiran fotogrametrični oblak točk v državnem prostorskem referenčnem koordinatnem sistemu.

Nadaljnja obdelava bi lahko vključevala segmentacijo in klasifikacijo celotnega oblaka točk, na podlagi katerih bi sledilo modeliranje stavb. V našem postopku smo 3D-modeliranje izvedli neposredno iz nestrukturiranega oblaka točk, zato klasifikacija ni bila potrebna. V tretjem delu postopka smo izvedli 3D-modeliranje, kjer smo najprej iz oblaka točk na osnovi geometrijskih lastnosti okolice posamezne točke prepoznali tiste točke, ki določajo stavbe. Izračun geometrijskih lastnosti točk in filtriranje točk stavb smo izvedli v odprtokodnem programskem okolju *CloudCompare ver. 2.11* (CloudCompare, 2020). V postopku prepoznavanja stavb smo določili 2D-obod posamezne stavbe, ki je bil določen z obodom strehe in je opisoval položaj, orientacijo in obliko stavbe v dveh razsežnostih. Obod posamezne stavbe smo določili v programskem okolju za upravljanje prostorskih podatkov ETL (angl. *extract, transform, load*), natančneje z uporabo komercialnega programskega okolja *FME – Fetaure Manipulation Engine*, *SafeSoftware, Inc.* (SafeSoftware, 2020).

Zadnji del postopka 3D-modeliranja stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točka se je nanašal na 3D-rekonstrukcijo modela stavbe. Z orodji za obdelavo prostorskih podatkov v prostorskem ETL-okolju *FME, SafeSoftware, Inc*. smo izdelali topološko pravilen model stavbe v LOD2 glede na določila v standardu OGC CityGML (Open Geospatial Consortium, 2012). Sledila je ocena kakovosti končnega modela, ki smo jo izvedli s primerjalno analizo izdelanih modelov glede na vhodni oblak točk (relativna kakovost) in glede na neodvisno modeliran referenčni model (absolutna kakovost), ki je bil izdelan na podlagi podatkov, pridobljenih z neodvisno metodo zajema. Primerjavo smo opravili v odprtokodnem programskem okolju *CloudCompare ver. 2.11.*

3.3.3 3D-modeliranje

Procesni model za obdelavo UAV-fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranje stavb ter konceptualni model za spremljanje kakovosti, ki temelji na procesnem modelu, smo zasnovali na inovativnem modelu, ki omogoča grafično 3D-modeliranje stavb iz fotogrametričnega oblaka točk (Dreščeк et al., 2020). Vhodni podatek v postopku so fotogrametrične podobe (fotografije), zajete z daljinsko vodenim letalnikom – UAV. Čeprav bi za modeliranje stavb lahko uporabili tudi poševne fotografije, smo se omejili le na uporabo nadirnih fotografij, saj je postopek zajema, obdelave in kasnejšega modeliranja z dodatnimi poševnimi fotografijami precej kompleksnejši. 3D-modeliranje stavb smo izvedli v izbranem prostorskem ETL-okolju, natančneje v komercialnem programskem okolju *FME* podjetja *Safe Software, Inc.* (2020). Pri modeliranju smo se osredotočili na metode, ki temeljijo na podatkovnem pristopu (angl. *data-driven approach*). Streha je modelirana glede na njeno dejansko obliko, medtem ko podrobnejši elementi na strehi, na primer dimniki ali antene, niso

modelirani. Ker izhajamo iz nadirnih (navpičnih) posnetkov, so bile stavbe v oblaku točk celovito opisane le s točkami na strehah, medtem ko na fasadah ni bilo točk oziroma so bile prisotne le v manjši meri. Položaj, oblika in orientacija stavbe v državnem koordinatnem sistemu (D96/TM) so definirani s položajem zunanjega oboda strehe, zunanji zidovi stavbe so določeni z vertikalnimi ravninami, ki povezujejo obod strehe in teren. Rezultat postopka je vektorski 3D-model stavbe, skladen s standardom OGC CityGML ver. 2.0 (Open Geospatial Consortium, 2012), z ravnjo podrobnosti LOD2. Izdelan model je sestavljen iz topološko urejenih robnih ploskev, ki so združene v skupno prostorninsko predstavitev telesa v 3D-prostoru.

ETL je pristop k upravljanju podatkov, ki je na področju računalniške in informacijske tehnologije poznan že iz 70. let prejšnjega stoletja. Gre za proces, ki omogoča pridobivanje podatkov iz različnih virov, njihovo pretvorbo v enotno strukturo in nadaljnjo integracijo v skupno podatkovno bazo. Tovrstni procesi se izvajajo v skupnem programskem okolju, imenovanem ETL-okolje. Posebna različica ETL-okolja je prostorski ETL, ki omogoča integracijo tako prostorskih kot ostalih, neprostorskih podatkov. Orodja prostorskega ETL omogočajo, da združimo podatke različnih oblik zapisa (formatov) in iz raznolikih virov, omogočajo raznolike pretvorbe, na koncu pa lahko take podatke shranimo v obliki želenega ciljnega formata ali v ciljno podatkovno bazo. Tako je mogoče učinkovito uporabiti v osnovi raznovrstne podatke za različne poizvedbe in analize, tako za različne analize GIS kot v drugih sistemih za podporo odločanju (Astriani in Trisminingsih, 2016). Prostorsko ETL-okolje vsebuje poleg orodij za integracijo in pretvorbo podatkov tudi specifična orodja za obdelavo in analizo prostorskih ter ostalih podatkov, kot je iskanje in odprava geometrijskih ali topoloških napak v podatkih, dodajanje in spreminjanje opisnih podatkov itd. (SafeSoftware, 2020). S temi funkcionalnostmi prostorski ETL močno prispeva k medopravilnosti različnih prostorskih podatkovnih baz in prostorskih informacijskih sistemov.

Okolje prostorskega ETL omogoča tako pregledno modeliranje procesa kot tudi kasnejšo obdelavo podatkov s tem procesom, s čimer ima uporabnik dober pregled nad vmesnimi in končnimi rezultati. Eden od takih procesov je tudi 3D-modeliranje stavb na osnovi podatkov fotogrametričnega oblaka točk, ki ga bomo predstavili v tej nalogi. Proces, razvit v prostorskem ETL-okolju, ne omogoča le izvedbe 3D-modeliranja stavb, temveč tudi spremljanje kakovosti podatkov v konkretnem primeru 3D-modeliranja stavb v posameznih fazah procesa. Podrobno je mogoče spremljati kakovost rezultatov posameznih korakov v procesu izdelave 3D-modela stavbe.

3.4 Ocena kakovosti

Če želimo v postopku 3D-modeliranja stavb ustrezno spremljati kakovost podatkov, je treba kakovost ocenjevati v ključnih fazah procesa, kar omogoči zagotavljanje želene kakovosti posamezne faze

procesa in posledično končnega 3D-modela. V nadaljevanju opisujemo elemente kakovosti in merila, s katerimi smo v empiričnem delu raziskave preverjali kakovost prostorskih podatkov, pri čemer smo se osredotočali predvsem na položajno kakovost, popolnost in logično usklajenost podatkov. Merila so opredeljena v skladu z določili mednarodnih standardov ISO in slovenskih standardov SIST za geografske informacije, to sta SIST EN ISO 19157:2015 (ali ISO 19157:2013): Geografske informacije – Kakovost podatkov (SIST, 2015) ter SIST EN ISO 19107:2020 (ali ISO 19107:2019): Geografske informacije – Prostorska shema (SIST, 2020).

Kakovost oblaka točk smo analizirali z vidika položajne točnosti, in sicer na podlagi izračuna vrednosti korena srednjega kvadratnega pogreška *RMSE*. Položajno točnost oblaka točk v 3D-prostoru smo analizirali na kontrolnih točkah, ki v nasprotju z oslonilnimi točkami niso bile vključene v georeferenciranje redkega oblaka točk. Primerjali smo ocenjene položaje, to je koordinate kontrolnih točk iz oblaka točk, in referenčne vrednosti položajev istih točk, ki smo jih predhodno izmerili na terenu z neodvisno geodetsko izmero. Najprej smo izračunali razlike med pravimi in ocenjenimi vrednostmi položaja točk v državnem referenčnem koordinatnem sistemu D96/TM po vseh treh koordinatnih razlikah, to je Δx, Δy, Δz (enačba (1))[1]:

$$\Delta x = x_{ocenjena} - x_{prava},\ \ \Delta y = y_{ocenjena} - y_{prava}, \Delta z = z_{ocenjena} - z_{prava} \tag{1}$$

Sledil je izračun vrednosti *RMSE* za vsako koordinatno komponento ($RMSE_X$, $RMSE_Y$, $RMSE_Z$) z enačbami (2), kot so navedene v mednarodnem standardu SIST EN ISO 19157:2015 (SIST, 2015):

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i^2}{N}},\ \ RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta y_i^2}{N}}, RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta z_i^2}{N}}, \tag{2}$$

kjer oznaka *X* podaja smer vzhod–zahod, oznaka *Y* smer sever–jug, oznaka *Z* pa višino. Oznaka *N* pomeni število točk, ki so bile uporabljene za izračun vrednosti *RMSE*.

Sledil je še izračun skupnih vrednosti *RMSE* v 2D in 3D (enačbi (3) in (4)):

$$RMSE_{2D} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2} \tag{3}$$

[1] Kljub uporabi državnega referenčnega koordinatnega sistema (D96/TM, SVS2010), kjer koordinate označujemo z oznakami *e, n* in *H*, v tem delu uporabljamo splošne oznake za prostorski koordinatni sistem, kot so navedene v slovenskem in mednarodnem standardu SIST EN ISO 19157:2015.

$$RMSE_{3D} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2 + RMSE_Z^2} \quad (4)$$

V postopku ocenjevanja položajne kakovosti prepoznavanja stavb iz oblaka točk smo prav tako uporabili merilo kakovosti *RMSE*. Tako relativno kot absolutno položajno točnost 2D-oboda smo določili na podlagi koordinatnih razlik med vogalnimi točkami modeliranega 2D-oboda stavbe in referenčnih vrednosti položajev identičnih točk. Pri tem smo relativno položajno točnost ocenili glede na točke oboda, ki smo jih ročno identificirali kot vogale stavbe v oblaku točk. Za oceno absolutne točnosti smo kot referenčno vrednost uporabili položaje vogalnih točk oboda stavbe, izmerjene z neodvisno geodetsko metodo zajema podatkov. Za oba izračuna smo uporabili enačbe (1), (2) in (3), saj smo razlike izračunali le v smereh osi *X* in *Y*, rezultat ocene kakovosti je bila vrednost *RMSE* v dveh razsežnostih ($RMSE_{2D}$).

Za oceno kakovosti končnega 3D-modela stavbe smo analizirali položajno točnost, popolnost in topološko pravilnost 3D-modela. Položajno točnost smo ocenili tako z vidika relativne oziroma notranje kakovosti kot absolutne oziroma zunanje kakovosti. Relativno kakovost smo ocenili na podlagi položajnih razlik med izdelanim 3D-modelom in vhodnim oblakom točk. Za vsako točko v vhodnem oblaku točk smo izračunali najkrajšo razdaljo med modelom in najbližjo točko v oblaku točk. Izračun smo izvedli v odprtokodnem programskem okolju *CloudCompare, ver. 2.11* (CloudCompare, 2020) z orodjem *Cloud-to-Mesh Distance*.

Absolutno kakovost 3D-modela smo ocenili s primerjavo 3D-modela z referenčnim modelom, ki smo ga izdelali na osnovi prostorskih podatkov, pridobljenih z drugo, neodvisno metodo zajema podatkov. Referenčni model smo izdelali ročno na podlagi izmerjenih karakterističnih točk, ki ustrezno opišejo obliko in lego stavbe v prostoru. Točke smo zajeli z neodvisno geodetsko metodo, in sicer s klasično tahimetrično metodo izmere, s čimer smo pridobili referenčni model, ki je omogočal oceno absolutne kakovosti 3D-modela stavbe. Tudi oceno absolutne točnosti smo izvedli v programskem okolju *CloudCompare, ver. 2.11*. Najprej smo iz izdelanega 3D-modela generirali nov oblak točk z gostoto 20 točk/m^2, pri čemer smo uporabili orodje *Mesh/Sample points*. Nato smo nov generiran oblak točk primerjali z referenčnim modelom, kjer smo ponovno uporabili orodje *Cloud-to-Mesh Distance.* Pri oceni tako relativne kot absolutne položajne točnosti 3D-modelov stavb smo kot rezultat izračuna pridobili položajne razlike izdelanega modela od referenčnih vrednosti, ki smo jih grafično prikazali in izračunali njihove statistične ocene.

Popolnost 3D-modela smo preverili vizualno z analizo grafičnega izrisa relativnih in absolutnih položajih razlik izdelanega 3D-modela od:

i. vhodnega oblaka točk in

ii. referenčnega modela.

Topološko pravilnost izdelanega modela kot element logične usklajenosti smo preverili z odprtokodnim programom *val3Dity*, ki omogoča preverjanje geometrične in topološke pravilnosti podanega vektorskega 3D-modela glede na določila mednarodnega standarda ISO 19107 (Ledoux, 2013, 2018).

4 ANALIZA DEJAVNIKOV, KI VPLIVAJO NA KAKOVOST

V tem poglavju opisujemo rezultate podrobne analize dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk. Dejavnike obravnavamo skladno s tem, v katerem delu procesa vplivajo na kakovost, in jih lahko razdelimo na tri skupine:

- dejavniki vpliva na kakovost pri zajemu podatkov,
- dejavniki vpliva na kakovost pri obdelavi podatkov,
- dejavniki vpliva na kakovost pri 3D-modeliranju stavb.

V nadaljevanju vsako zgoraj navededno skupino dejavnikov kakovosti obravnavamo v ločenem podpoglavju, poglavje pa zaključimo s skupno razpravo in povzetkom o vseh prepoznanih dejavnikih vpliva na kakovost prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju stavb iz fotogrametričnega oblaka točk.

4.1 Dejavniki vpliva na kakovost pri zajemu podatkov

Razvoj zmogljivejše in cenovno dostopnejše računalniške tehnologije ter predhodna odkritja na področju računalniškega vida so v zadnjih desetih letih v fotogrametriji narekovali spremembe tako pri zajemu kot obdelavi fotogrametričnih posnetkov. Pri tem so imeli pomembno vlogo daljinsko vodeni letalniki, ki se so začeli uporabljati ne samo v vojaške, ampak tudi v številne civilne namene. Razvoj cenejših senzorjev za zajem podatkov in boljših algoritmov slikovnega ujemanja za obdelavo posnetkov in izdelavo 3D-fotogrametričnih oblakov točk je omogočil vse širšo uporabo letalnikov v fotogrametriji za potrebe različnih aplikacij (Colomina in Molina, 2014; Nex in Remondino, 2014; Dandois et al., 2015, Pajares, 2015; Singh in Frazier, 2018). Če se omejimo zgolj na zajem letalskih fotografij, so spremembe, povezane z uporabo daljinsko vodenih letalnikov, v primerjavi s klasično aerofotogrametrijo, opazne že pri izbiri strojne opreme in načinu snemanja. Strojna oprema je zaradi praktičnih zahtev omejena s težo bremena, ki jo letalnik lahko nosi, in zmogljivostjo baterij, ki omogočajo nemoteno delovanje senzorjev. Uporabljena strojna oprema mora biti manjša in lažja od klasične fotogrametrične, zato je pogosto omejena na manjši nemerski fotoaparat in merilne instrumente nižje natančnosti. Tudi z ekonomskega vidika je zaradi manjše stabilnosti platforme smiselno izbrati cenejšo opremo, ki bo ob določenih predpostavkah vseeno omogočala doseganje želenih rezultatov. Zaradi posebnosti uporabljene opreme je za dosego kakovostnih rezultatov, primerljivih z uveljavljenimi fotogrametričnimi izdelki, treba prilagoditi zajem podatkov, ki vključuje tako predhodno nastavljene parametre letenja in snemanja v fazi načrtovanja izmere kot tudi način izvedbe snemanja in nadaljnje postopke obdelave zajetih podatkov.

Iz znanstvenih objav in poročil, ki jih povzemamo v nadaljevanju, je razvidno, da se raziskovalci odločajo med različnimi začetnimi nastavitvami in parametri leta glede na namen snemanja ali namen uporabe podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, velikost snemalnega območja in značilnosti uporabljene snemalne opreme. Singh in Frazier (2018) sta analizirala znanstvene objave s področja uporabe letalnikov z vidika uporabljene snemalne opreme, parametrov leta, nadaljnjih obdelav in analiz. Naša analiza objav s tega področja je nadgradnja navedene raziskave, saj analiziramo najnovejše znanstvene objave z vidika vpliva posameznih vrednosti vhodnih parametrov na kakovost rezultatov pri uporabi daljinsko vodenih letalnikov, hkrati pa razširjamo analizo na celoten proces od zajema do končnega 3D-modela stavbe. Analiza znanstvenih objav, ki obravnavajo vplive različnih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov, pridobljenih z UAV-fotogrametrijo, je zasnovana na analizi objavljenih rezultatov eksperimentalnih testov in omogoča kvantitativno vrednotenje posameznih vplivov. Na podlagi rezultatov te analize bomo oblikovali priporočila o načinu zajema podatkov z daljinsko vodenimi letalniki, kar bo uporabljeno tudi v našem eksperimentalnem delu. Omejili se bomo na fotogrametrične podatke, zajete z daljinsko vodenim letalnikom, ki jih lahko uporabimo na področju topografskega modeliranja, 3D-modeliranja naravnega in grajenega okolja ter katastrov nepremičnin z nekajcentimetrsko položajno točnostjo. Pri tem bomo obravnavali daljinsko vodene letalnike, ki so lažji od 25 kilogramov in za zajem podatkov uporabljajo optične senzorje za zaznavanje objektov v elektromagnetnem spektru vidne svetlobe. Omejili se bomo na zajem podatkov v obliki georeferenciranega fotogrametričnega oblaka točk, kjer izvedemo posredno georeferenciranje podatkov preko dodatno izmerjenih oslonilnih točk.

Glavni dejavniki, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV-fotogrametrije, so (Nasrullah, 2016; Gindraux et al., 2017):

- uporaba nemerskih fotoaparatov (metoda kalibracije oziroma umerjanja, časovna stabilnost parametrov notranje orientacije, kakovost senzorja in objektiva, vrsta zaklopa idr.);
- kakovost fotografij (prostorska ločljivost, ostrina, kontrast, dinamični razpon, ustrezna tekstura idr.);
- parametri snemalne misije, ki definirajo fotogrametrični blok (vzdolžno in prečno prekrivanje fotografij, različne snemalne višine idr.);
- terenske oslonilne točke za namene georeferenciranja fotogrametričnega bloka (označitev točk, metoda izmere, število in njihova razporeditev v bloku idr.).

Te dejavnike smo analizirali po naslednjih sklopih:

- dejavniki, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij,
- dejavniki, ki so povezani s snemalno misijo,
- dejavniki, ki so povezani z oslonilnimi točkami za georeferenciranje oblaka točk.

4.1.1 Dejavniki vpliva, povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij

Med dejavniki vpliva, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij, v nadaljevanju podrobneje obravnavamo:

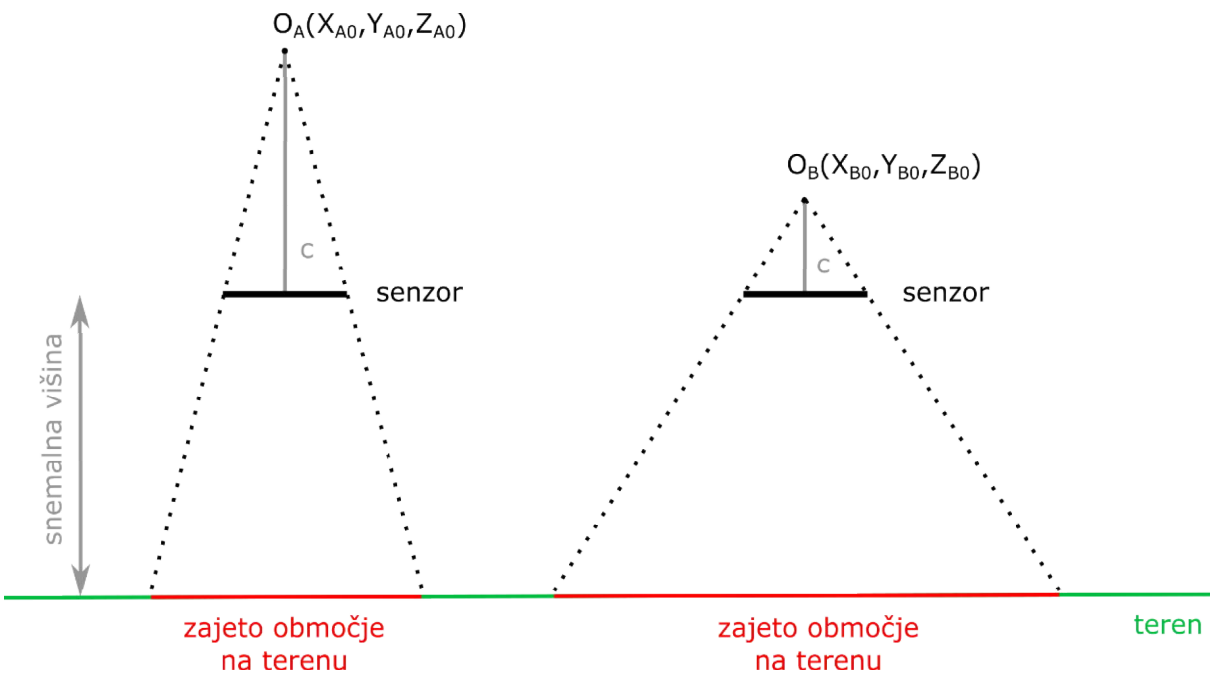
- geometrične lastnosti fotografij,
- radiometrične lastnosti fotografij,
- parametre notranje orientacije fotoaparata,
- vpliv vremenskih in svetlobnih razmer na kakovost fotografij.

Geometrične lastnosti fotografij

Digitalna fotografija je rastrska podoba, opredeljena kot matrika, ki jo sestavljajo vrstice in stolpci mrežnih celic oziroma slikovnih elementov (pikslov). Prostorska ločljivost pove, kolikšna je najmanjša velikost detajla, ki ga na podobi lahko prepoznamo (Oštir, 2006). Prostorska ločljivost fotografije je odvisna od velikosti slikovnega senzorja oziroma velikosti slikovnega elementa na senzorju, goriščne razdalje in oddaljenosti med fotoaparatom ter objektom, ki ga snemamo. Prostorska ločljivost fotografij je pomemben dejavnik, ki vpliva na geometrično kakovost prostorskih podatkov, pridobljenih z obdelavo fotogrametričnih podob ali pri nadaljnjem modeliranju tovrstnih podatkov. V fotogrametriji običajno opredelimo prostorsko ločljivost v obliki razdalje med središčema dveh sosednjih slikovnih elementov (angl. *ground sampling distance* – *GSD*), merjeno na terenu. Na letalnikih običajno uporabljamo nemerske fotoaparate, ki imajo v primerjavi z merskimi fotoaparati manjši senzor, zato je treba izbrati nižjo višino leta letalnika za dosego zadostne geometrične ločljivosti fotografij – običajno med 50 in 150 metrov. Zaradi nižje višine leta v primerjavi s klasičnim letalskim fotogrametričnim snemanjem lahko dobimo primerljivo ali celo boljšo prostorsko ločljivost zajetih fotografij, kar omogoča lažje prepoznavanje detajlov in ekstrakcijo detajlov na fotografijah (Mikrut, 2016).

Pomemben dejavnik, ki posredno vpliva na geometrično kakovost fotogrametrično zajetih podatkov, je goriščna razdalja fotoaparata. Iz splošnih zakonitosti fotogrametričnega snemanja je znano, da se pri uporabi fotoaparata s krajšo goriščno razdaljo in nespremenjenimi ostalimi parametri leta poveča zorni kot fotoaparata. To pomeni, da lahko z enim preletom letalnika zajamemo širše območje in s tem zmanjšamo čas letenja, kar je zaradi omejitve delovanja baterij na letalnikih precejšna prednost. Na drugi strani s tem pridobimo fotografije z manjšo prostorsko ločljivostjo, s čimer se poslabša geometrijska natančnost zajetih podatkov in zmanjša zmožnost prepoznavanja detajlov. V splošnem imajo fotoaparati s krajšo goriščno razdaljo večjo optično distorzijo, ki jo je treba ustrezno modelirati v postopku kalibracije in vrednosti upoštevati pri obdelavi podatkov (Mosbrucker et al., 2017). Goriščna razdalja je lastnost fotoaparata oziroma uporabljenega objektiva, ki poleg tega vpliva na merilo zajetih

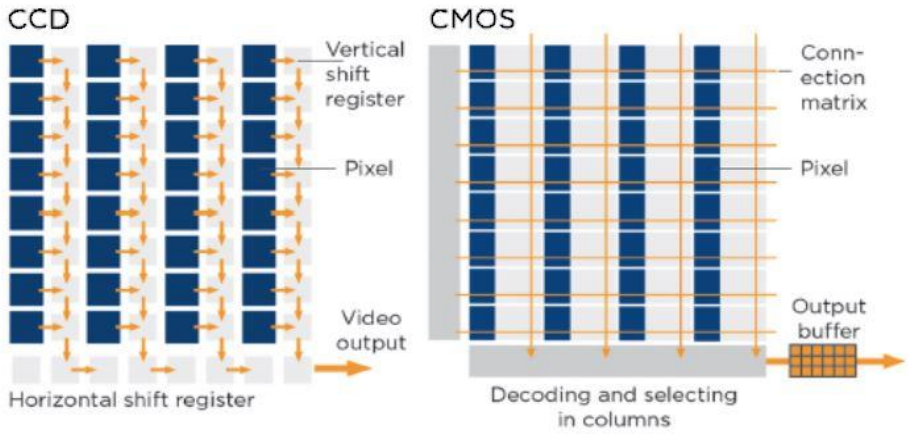
fotografij in posledično na velikost območja, ki ga zajamemo z enim posnetkom, kar vpliva na način izvedbe snemanja. Slika 10 prikazuje vpliv velikosti goriščne razdalje na zajeto snemalno območje. Ob snemanju na isti snemalni višini z uporabo fotoaparata z enako velikim slikovnim senzorjem, a različno goriščno razdaljo (c), se spremeni zorni kot fotoaparata in s tem površina zajetega območja na terenu.



Slika 10: Površina zajetega območja na terenu v odvisnosti od velikosti goriščne razdalje (c).
Figure 10: The area coverage in the field with respect to the value of focal length (c).

Pomembno vlogo pri izbiri fotoaparata, ki ga bomo uporabili pri snemanju, imajo značilnosti snemalnega območja. V splošnem velja, da se pri snemanju na območju, ki je v višinskem smislu bolj razgibano, kot je na primer v mestih in hribovitih območjih, odločamo za fotoaparate z ozkokotnim objektivom, torej daljšo goriščno razdaljo. Tako zmanjšamo možnost, da bi se velikost talnega slikovnega elementa na istem posnetku močno spreminjala. Za snemanja ravninskih območij, kjer ni prisotnih velikih sprememb višine terena, lahko uporabimo fotoaparate s širokokotnim objektivom. Tovrstna oprema omogoča, da celotno območje posnamemo hitreje z manj posnetki, s čimer lahko dosežemo višjo točnost predvsem v višinskem smislu (Rupnik et al., 2015). Na kakovost rezultatov v splošnem vpliva tudi sama kakovost uporabljenih objektivov in ne samo dolžina goriščne razdalje (Clapuyt et al., 2016).

Na kakovost zajetih fotografij vpliva tudi vrsta fotoaparata, natančneje način delovanja sestavnih delov glede na vrsto senzorja in vrsto zaklopa. V digitalnih fotoaparatih se podoba zajame na digitalnem senzorju, pri čemer glede na način delovanja ločimo senzor CCD (angl. *charge-coupled device*) in senzor CMOS (angl. *complementary metal-oxide semiconductor*). Slika 11 prikazuje zgradbo in način delovanja obeh senzorjev.



Slika 11: Zgradba in delovanje senzorjev CCD ter senzorjev CMOS. Skica je povzeta po von Fintel (2015).
Figure 11: The structure and operations of CCD and CMOS sensors. The figure is adopted from von Fintel (2015).

V zadnjih desetletjih preteklega stoletja so senzor CCD največkrat uporabljali v kakovostnih digitalnih fotoaparatih, saj je omogočal zajem radiometrično in geometrično bolj kakovostnih fotografij v primerjavi z do takrat razvitimi senzorji CMOS. Senzor CCD je v splošnem omogočal boljšo ločljivost fotografije, večji dinamični razpon radiometričnih vrednosti in manj prisotnosti šuma. Slabost senzorja CCD je, da je bilo njegovo delovanje počasnejše in energijsko bolj potratno v primerjavi s senzorjem CMOS. Na drugi strani je senzor CMOS deloval hitreje, za zajem fotografij je potreboval manj energije, celoten senzor je bil običajno manjši od senzorja CCD. Vendar pa so fotografije, zajete s senzorjem CMOS, imele slabšo ločljivost in radiometrično kakovost ter so vsebovale več šuma. Kljub posebnostim v delovanju obeh senzorjev se je razlika med njima z razvojem vse bolj zmanjševala, saj danes tudi senzorji CMOS omogočajo izdelavo kakovostnih fotografij. Zaradi energijsko učinkovitejšega delovanja in vse manj prisotnega šuma se v današnjih nemerskih fotoaparatih pogosteje uporabljajo senzorji CMOS (Litwiller, 2001; von Fintel, 2015).

Drugi dejavnik, ki je pogojen z vrsto fotoaparata, je način delovanja zaklopa. Pri tem ločimo na eni strani mehanski in elektronski zaklop ter na drugi strani globalni in pomični zaklop. Če je na letalniku nameščen lažji, cenejši nemerski fotoaparat, ta običajno vsebuje senzor CMOS s pomičnim zaklopom. Zaradi premikanja letalnika med zajemom fotografij in zaporednega zajema posameznih vrstic se na fotografiji pojavijo deformacije, ki so posledica pomičnega zaklopa (angl. *rolling shutter efect*). Pri nižjih višinah leta, do 50 metrov nad terenom, in hitrostih leta letalnika nad 10 m/s so deformacije zaradi pomičnega zaklopa večje in jih je smiselno upoštevati pri fotogrametrični obdelavi posnetkov za dosego večje kakovosti rezultatov. Prav tako je mogoče sistematične vplive zaradi pomičnega zaklopa zmanjšati z dodatnimi oslonilnimi točkami, enakomerno razporejenimi po celotnem snemalnem območju, ki jih vključimo v fotogrametrično obdelavo (Vautherin et al., 2016).

Radiometrične lastnosti fotografij

Vsak piksel, ki sestavlja rastrsko podobo, vsebuje podatek o vrednosti elektromagnetnega valovanja, odbitega od objektov in zaznanega s slikovnim senzorjem. Podatek o odbitem elektromagnetnem valovanju je shranjen v obliki radiometrične vrednosti piksla. Za pridobitev kakovostnih prostorskih podatkov je treba zagotoviti tudi ustrezno radiometrično kakovost zajetih fotografij, ki bodo omogočale kakovostno obdelavo in kasnejšo ekstrakcijo želenih informacij o pojavih, ki jih beležimo. Fotogrametrična obdelava fotografij temelji na slikovnem ujemanju točk na več posnetkih, ki je odvisno tudi od radiometrične kakovosti fotografij in ustrezne teksture na obravnavanih površinah (Meißner et al., 2017).

Za pridobitev fotografij, ki bodo podajale zanesljive informacije o opazovanih prostorskih objektih, je treba pred izvedbo snemanja izbrati prave vrednosti nastavitev fotoaparata, ki vplivajo na radiometrično kakovost. Z izbiro primernih nastavitev dosežemo, da so fotografije ustrezno osvetljene in ostre ter ne vsebujejo preveč šuma, ki kvari prepoznavanje podrobnosti na posnetkih. Osnovne nastavitve na fotoaparatu so čas ekspozicije, velikost odprtine zaslonke in stopnja občutljivosti senzorja (ISO). Poleg tega na radiometrično kakovost fotografij pomembno vplivata tudi globinska ostrina in fokusiranje. Globinska ostrina je opredeljena z območjem med najbližjimi in najbolj oddaljenimi objekti, ki se na sliki še upodobijo ostro. Na globinsko ostrino vpliva goriščna razdalja objektiva, odprtina zaslonke in razdalja med senzorjem ter snemanim objektom. V splošnem je območje globinske ostrine večje pri uporabi širokokotnih objektivov, manj odprti zaslonki in večji razdalji od snemanega objekta. Pri snemanju z daljinsko vodenim letalnikom se običajno odločamo za fokusiranje na fotografsko neskončnost, s čimer zagotovimo ostrino fotografij ne glede na izbrano snemalno višino ali stopnjo razgibanosti terena. Lastnosti fotografije, kot so geometrijska in radiometrična kakovost, osvetlitev in možnost prepoznavanja tekstur, vplivajo na uspešnost slikovnega ujemanja, ki potem vpliva tako na kakovost določitve parametrov notranje orientacije fotoaparata s samokalibracijo kot tudi na gostoto točk v fotogrametričnem oblaku točk in točnost izdelanega 3D-modela (Mosbrucker et al., 2017).

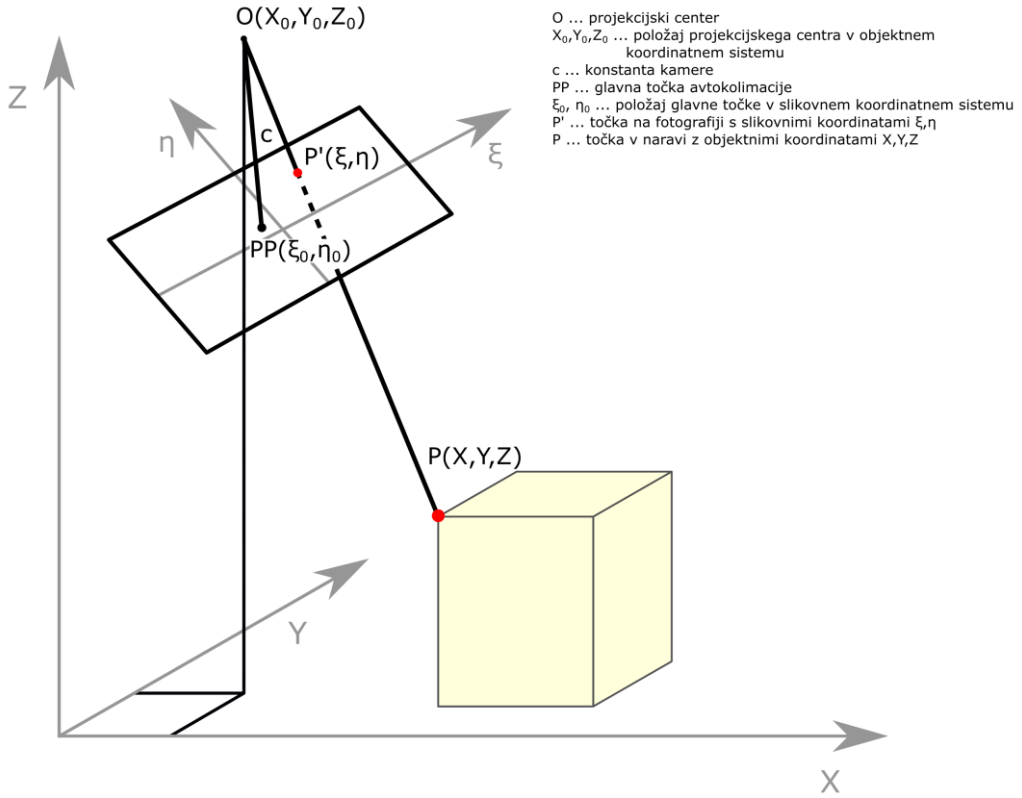
Na zmožnost prepoznavanja detajlov na zajetih fotografijah vpliva tudi ostrina slike (angl. *sharpness*). Zaradi gibanja letalnika so fotografije pogosto neostre (angl. *motion blur*) (Nasrullah, 2016). Neostrina je praviloma posledica dejstva, da so bile fotografije zajete med premikanjem senzorja. Na stopnjo neostrine fotografij vplivajo nastavitve fotoaparata, kot je čas ekspozicije, in parametri leta letalnika, kot sta hitrost in višina leta letalnika, ter tudi nagibi letalnika, ki nastanejo zaradi različnih zunanjih vplivov, na primer vetra. Nastanek neostrih fotografij zaradi premikanja fotoaparata med zajemom fotografije je očitnejši pri manjših razdaljah med fotoaparatom in objektom, ki ga snemamo. Sieberth et al. (2014, 2015) so analizirali vpliv uporabe neostrih fotografij v fotogrametrični obdelavi in preizkušali možnost odprave neostrine za zmanjšanje negativnega vpliva na kakovost rezultatov kasnejše obdelave.

Ugotovili so, da se s povečevanjem neostrine zmanjša točnost slikovnih koordinat, kar neposredno negativno vpliva na točnost določitve nadaljnjih parametrov v obdelavi, med drugim parametrov kalibracije, predvsem koordinat glavne točke. Ob tem so tudi ugotovili, da pri uporabi neostrih fotografij algoritmi slikovnega ujemanja, ki jih uporabimo v fotogrametrični obdelavi, niso zmožni zaznati tako velikega števila ujemajočih se veznih točk med prekrivajočimi se fotografijami, kot bi jih lahko zaznali z obdelavo ostrih fotografij. Večji kot je premik fotoaparata v času zajema fotografij, manj veznih točk je algoritem sposoben prepoznati. Ob uporabi neostrih fotografij so ugotovili ne le manjše število veznih točk, temveč tudi manjše število pravilno določenih veznih točk. Sieberth et al. (2016) so predlagali algoritem za samodejno prepoznavanje neostrih fotografij v nizu zajetih fotografij. Metode temeljijo na kvantitativni oceni stopnje neostrine z uporabo različnih postopkov geometrične in radiometrične obdelave digitalnih fotografij. Predlagani algoritem omogoča hitrejše prepoznavanje neostrih fotografij, vendar je postopek z vidika uporabnika še vedno precej zahteven. Zaznane neostre fotografije lahko nato obdelamo, tako da zmanjšamo neostrino ali pa jih celo odstranimo iz niza, s čimer lahko izboljšamo točnost obdelave in pridobljenih rezultatov. Pri tem pa je treba paziti, da imamo še vedno zagotovljen zadosten preklop med fotografijami za dosego ustrezne nadštevilnosti.

Parametri notranje orientacije fotoaparata

Za dosego merskih rezultatov zajema prostorskih podatkov iz fotografij je treba poznati notranjo geometrijo fotoaparata, s katerim so bili posnetki zajeti. Tako imenovane parametre notranje orientacije fotoaparata (krajše: notranja orientacija) potrebujemo, da lahko določimo slikovni koordinatni sistem, v katerem merimo slikovne koordinate. Osnovni parametri notranje orientacije so položaj glavne točke na fotografiji, goriščna razdalja oziroma konstanta kamere in distorzije objektiva. Poleg tega predvsem pri nemerskih fotoaparatih določamo še nekatere druge parametre, kot so nepravokotnost koordinatnih osi, različna merila v smeri koordinatnih osi. Postopek, s katerim določamo parametre notranje orientacije fotoaparata, imenujemo kalibracija fotoaparata.

Za pridobitev 3D-položaja objekta na fotografiji je treba poleg notranje orientacije, ki je načeloma enaka za vse fotografije, zajete z istim fotoaparatom in ob istih nastavitvah, poznati tudi zunanjo orientacijo posnetkov. Parametre zunanje orientacije (krajše: zunanja orientacija) običajno določamo z izravnavo snopa slikovnih žarkov v bloku fotografij (angl. *bundle block adjustment*; krajše: izravnava bloka fotografij), pri čemer moramo poznati objektne koordinate ustreznega števila oslonilnih točk. Parametri zunanje orientacije opisujejo položaj in zasuk posnetka v trenutku zajema v izbranem objektnem koordinatnem sistemu. Slika 12 prikazuje razmerje med slikovnimi (ξ, η) in objektnimi (X, Y, Z) koordinatami izbrane točke (Kraus, 2007).



Slika 12: Razmerje med slikovnimi in objektnimi koordinatami točke (Kraus, 2007).
Figure 12: The relationship between image and object coordinates of a point (Kraus, 2007).

Osnovni načini kalibracije fotoaparata so: laboratorijska kalibracija, kalibracija s testnimi polji in samokalibracija. Redkeje se uporabljajo tudi nekatere druge metode, kot je kalibracija z uporabo poznanih oblik v prostoru, na primer navpičnice na objektu, prostorske linije (Luhmann et al., 2014).

Merske fotoaparate v klasični fotogrametriji kalibrira proizvajalec z laboratorijsko kalibracijo, za katero je potreben poseben laboratorij z ustrezno opremo, zato tega uporabnik ne more izvajati sam. Zunanja orientacija fotografij se določi kasneje s postopkom aerotriangulacije preko znanih koordinat oslonilnih točk v prostorskem referenčnem koordinatnem sistemu. V klasični fotogrametriji sta postopka izračuna notranje in zunanje orientacije ločena, saj vsak od njiju zahteva specifično geometrijo bloka fotografij za dosego kakovostnih rezultatov. V UAV-fotogrametriji uporabljamo manjše, lažje in cenejše nemerske fotoaparate, pri katerih so sestavni deli sistema manj geometrično stabilni, zato laboratorijska kalibracija ni primerna. Kalibracijo moramo izvajati pogosteje in na drugačne načine.

Pri kalibraciji s testnimi polji se uporabljajo polja posebej označenih točk (tarč), ki so razporejene v ravnini ali več ravninah, pri čemer poznamo lokalne koordinate teh točk ali razdalje med njimi. Kalibracijo lahko izvajamo ločeno od objekta obdelave ali hkrati s fotografiranjem samega objekta; v tem primeru to imenujemo kalibracija in-situ oziroma ob delu (angl. *on-the-job calibration, in-situ calibration*). Ta način kalibracije se uporablja predvsem pri terestričnih bližnjeslikovnih aplikacijah.

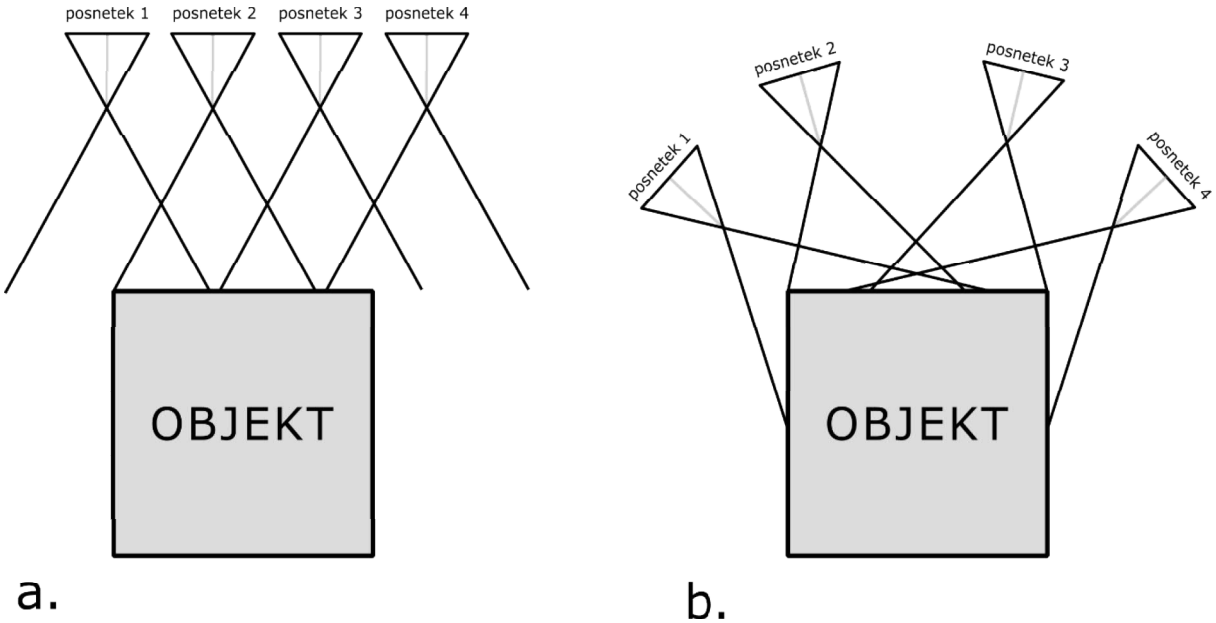
Pri samokalibraciji uporabimo dobro določljive podrobnosti na objektu ali površju (značilke), ki niso posebej označene. Zelo je pomembno, da pri fotografiranju zagotovimo ustrezno razporeditev fotografij, ki zagotavlja dobro geometrijo presekov slikovnih žarkov (Luhmann et al., 2016). Takšno geometrijo zagotavljajo predvsem konvergentni posnetki, česar pa pri izključno nadirnem načinu fotografiranja ne moremo zagotoviti. Če je le mogoče, v blok fotografij vključimo konvergentne posnetke. Če to ni mogoče, se geometrija bloka lahko utrdi s kombinacijo različnih konfiguracij fotografiranja, na primer snemanjem na dveh višinah, snemanjem v različnih smereh ipd. Nadaljnji pomemben pogoj za uspešnost metode samokalibracije je, da se nastavitve na fotoaparatu med fotografiranjem ne spreminjajo in tudi objekt fotografiranja se ne sme premikati. V osnovi za izvedbo samokalibracije ne potrebujemo znanih referenčnih (objektnih) koordinat. Parametri notranje orientacije se lahko izračunajo zgolj iz geometrijsko določene oblike objekta. Če pa imamo na razpolago oslonilne točke, izmerjene v objektnem koordinatnem sistemu, se v izravnavi hkrati določijo tudi parametri zunanje orientacije. Če nas zanima le pravo merilo modela, ne pa tudi njegovo pravilno geolociranje, je treba poznati najmanj eno dolžino v objektnem prostoru. Pomembno je upoštevati tudi dejstvo, da netočnost parametrov notranje orientacije povzroča znatne sistematične napake v fotogrametričnih oblakih točk in izpeljanih izdelkih (James in Robson, 2014).

V praksi so se v UAV-fotogrametriji uveljavili trije načini določitve parametrov notranje orientacije – to so predhodna kalibracija fotoaparata, kalibracija fotoaparata s samokalibracijo v okviru samega projekta in kombinacija obeh pristopov. Prvi predvideva izvedbo kalibracije v ločenem postopku od terenskega zajema fotografij v predhodni kalibraciji, v kateri se parametri notranje orientacije izračunajo iz fotografij, zajetih na različnih oddaljenosti od izbranega objekta in s konvergentnimi osmi fotografij (Nex in Remondino, 2014). V drugem primeru se kalibracija izvede kot postopek samokalibracije (angl. *self-calibration*), ki je del glavne fotogrametrične obdelave, v okviru katere hkrati določimo tako notranjo kot zunanjo orientacijo. Pri tretjem pristopu kalibracije fotoaparata se upošteva kombinacija predhodne kalibracije in samokalibracije. Zaradi primerljivosti kakovosti rezultatov, ki jih dosežemo s prvim in drugim načinom kalibracije, ter dejstva, da kombinacija obeh postopkov ne omogoča bistveno boljših rezultatov, se običajno največkrat odločamo za izbiro enega od prvih dveh pristopov. Za dosego kakovostnih rezultatov kalibracije pa je treba poznati in upoštevati zakonitosti posameznega načina določitve parametrov notranje orientacije (Colomina in Molina, 2014).

Harwin et al. (2015) so s primerjavo različnih načinov kalibracije nemerskih fotoaparatov, nameščenih na letalnikih, analizirali vpliv izbrane metode kalibracije fotoaparata na točnost fotogrametričnega oblaka točk. Poleg nastavitev in lastnosti uporabljenega fotoaparata, geometrije zajetih fotografij ter razporeditve, natančnosti in točnosti oslonilnih točk je kalibracija ključnega pomena pri poznavanju vpliva slučajnih in sistematičnih pogreškov v fotogrametričnem oblaku točk. Z oceno točnosti na kontrolnih točkah so izvedli primerjavo treh načinov kalibracije, in sicer predhodne kalibracije z

uporabo šahovnice, predhodne kalibracije na testnem polju in postopka samokalibracije, ki ga izvedemo med obdelavo zajetih fotografij in v katerem so parametri notranje orientacije določeni skupaj z zunanjo orientacijo v postopku izravnave bloka fotografij. Rezultati raziskave so pokazali najboljšo točnost fotogrametričnega oblaka točk, če v obdelavo pri izvedbi samokalibracije vključimo poševne fotografije (angl. *oblique images*). Če so bile v obdelavo vključene zgolj navpične oziroma nadirne fotografije, je bila dosežena točnost oblaka točk pri samokalibraciji in predhodno izvedeni robustni kalibraciji primerljiva.

Kakovost določitve parametrov notranje orientacije in njen vpliv na kakovost pridobljenega fotogrametričnega oblaka točk sta raziskovala tudi Hastedt in Luhmann (2015), ki sta dokazala, da so parametri notranje orientacije pri cenejših, nemerskih fotoaparatih med seboj zelo korelirani, kar je posledica nestabilnosti posameznih komponent teh fotoaparatov. Pri uporabi metode samokalibracije je treba za natančno in zanesljivo določitev parametrov notranje orientacije zagotoviti dobro geometrijo bloka fotografij. Pri tem je kot dobra geometrija bloka mišljena konfiguracija fotografij, ki vsebuje navpične in poševne fotografije (slika 13).



Slika 13: Shematski prikaz dveh primerov geometrije bloka posnetkov: (a) »šibka« geometrija, kjer imajo posnetki medsebojno vzporedne osi, (b) »močna« geometrija, kjer so osi posnetkov med seboj konvergentne.

Figure 13: Two examples of image block geometry: (a) weak geometry of image block with parallel images, (b) strong geometry of image block where image axis are convergent.

Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi James in Robson (2014), ki sta preverjala vpliv sistematičnih pogreškov na kakovost fotogrametričnih izdelkov pri obdelavi bloka fotografij s približno vzporednimi osmi fotoaparata in uporabi postopka samokalibracije. Pri uporabi zgolj fotografij, ki imajo vzporedne osi, so ocenjene vrednosti radialne distorzije zelo povezane s kakovostjo pridobljenih rezultatov

fotogrametrične obdelave, kot je digitalni model višin. Če v izravnavo blokov ne vključimo oslonilnih točk, se pogrešek določitve radialne distorzije v postopku kalibracije močno izrazi kot sistematični pogrešek digitalnega modela reliefa, ki se kaže v obliki notranjih deformacij fotogrametričnega oblaka točk oziroma kot učinek kupole (angl. *doming efect*), pri katerem se teren, ki je v resnici raven, modelira v obliki kupole. Pogrešek radialne distorzije in učinek kupole v digitalnem modelu površja, izdelanem iz fotografij s približno vzporednimi osmi, sta med seboj povezana in ju ni mogoče ločiti, če nimamo na voljo dodatnih informacij o terenu ali objektu, ki ga snemamo. Za odstranitev ali vsaj zmanjšanje napake zaradi učinka kupole James in Robson (2014) predlagata, da se v izravnavo vključijo dobro razporejene oslonilne točke, tako na sredini študijskega območja kot na njegovih robovih. Dodatno predlagata uporabo poševnih fotografij, ki prispevajo k boljši geometriji bloka fotografij. Druga možnost je izvedljiva predvsem pri uporabi letalnikov v obliki večrotorskih snemalnih sistemov, pri katerih je mogoče spreminjati naklon fotoaparata in tako zajeti poševne fotografije. Pri uporabi letalnikov s fiksnimi krili, pri katerih običajno ne moremo spreminjati naklona fotoaparata, je mogoče notranje deformacije oblaka točk odstraniti z dodatnim prečnim preletom z zajemom nadirnih fotografij na drugačni višini nad terenom.

Podoben učinek dobimo pri snemanju razgibanega terena, kjer razdalja med letalnikom in terenom ni konstantna, temveč se spreminja po snemalnem območju, s čimer dobimo boljšo geometrijo bloka fotografij in posledično robustnejšo določitev parametrov notranje orientacije pri uporabi samokalibracije (Gerke in Przybilla, 2016). Do podobnih ugotovitev sta prišla Griffiths in Burningham (2019), ki sta v svoji raziskavi primerjala točnost oblaka točk, zajetega na ravninskem območju snemanja na osnovi zgolj nadirnih fotografij. Če sta uporabila zgolj samokalibracijo in majhno število oslonilnih točk, so bili rezultati slabši od dobljenih, če sta predhodno izvedla predkalibracijo. Zaradi ravnega terena in uporabe zgolj nadirnih fotografij v podobnem merilu je bila geometrija mreže zajetih fotografij razmeroma slaba, kar je povzročilo sistematične napake pri določitvi parametrov notranje orientacije. Za dosego točnejših rezultatov pri snemanju ravnih terenov in z uporabo zgolj nadirnih fotografij je treba torej zagotoviti zadostno število oslonilnih točk za georeferenciranje in uporabiti kontrolne točke za nadzor kakovosti rezultatov. Za celovito odpravo deformacij oblaka točk, ki nastanejo kot posledica sistematičnih napak pri določitvi notranje orientacije, pa priporočata dodatno izvedbo predkalibracije.

Cilj nekaterih raziskav je ugotavljanje časovne stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparatov. Cramer et al. (2017) so med seboj primerjali vrednosti kalibracijskih parametrov, ki so jih določili z večkratno kalibracijo. Primerjavo so izvedli za več različnih digitalnih fotoaparatov, in sicer za kompaktni, brezzrcalni *DSLM* (angl. *digital single lens mirrorless*) in zrcalnorefleksni fotoaparat *DSLR* (angl. *digital single-lens reflex*) ter rezultate primerjali z merskim fotoaparatom. Po večkratni kalibraciji v laboratoriju ob nadzorovanih pogojih snemanja so ugotovili, da je mogoče opaziti razlike v vrednosti

parametrov med več zaporednimi kalibracijami, iz česar lahko sklepamo o mehanski nestabilnosti testiranih fotoaparatov.

S prisotnostjo optičnih distorzij na fotografijah se močno poslabša točnost končnih fotogrametričnih izdelkov. Radialna distorzija je zelo odvisna od goriščne razdalje, ki določa zorni kot fotoaparata. Z zmanjševanjem goriščne razdalje povečamo zorni kot, hkrati pa povečamo radialno distorzijo in zmanjšamo merilo zajete podobe. Ta vpliv je najopaznejši pri širokokotnih (angl. *wide-angle fisheye*) objektivih, ki imajo izjemno širok zorni kot, kar omogoča hitrejši zajem večjih snemalnih območij, a so fotografije zaradi prisotnosti distorzij močno popačene in so na isti fotografiji prisotne različne vrednosti prostorske ločljivosti (Strecha et al., 2015). Za dosego višje točnosti fotogrametričnega izdelka moramo zagotoviti ustrezno kalibracijo in popravke optičnih distorzij upoštevati v nadaljnji obdelavi. V splošnem velja, ne glede na vrednost goriščne razdalje, da je pri izbiri objektiva za fotogrametrična snemanja primerneje izbrati objektiv s fiksno goriščno razdaljo in nastavitev fiksnega fokusa, s čimer zmanjšamo vpliv spreminjajoče se gorišče razdalje in se izognemo neostrim fotografijam (Mosbrucker et al., 2017).

Vpliv vremenskih in svetlobnih razmer na kakovost fotografij

Na geometrično in radiometrično kakovost končnega fotogrametričnega izdelka, kot sta ortofoto in 3D-model z dodanimi teksturami, vplivajo tudi vremenske in svetlobne razmere, v katerih nastanejo vhodni posnetki. Slabše vremenske razmere, kot je močna oblačnost, megla ali celo rahel dež, povzročijo slabo osvetlitev ali premajhen kontrast fotografij. Takšne fotografije so slabše vizualne kakovosti, saj je razpon radiometričnih vrednosti slikovnih elementov manjši kot pri zajemu fotografij v jasnem vremenu in ob zadostni naravni svetlobi. Na fotografijah, zajetih v slabših svetlobnih razmerah, je težje prepoznati posamezne detajle in je zato težje določiti vezne točke. Wierzbicki et al. (2015) so na podlagi preizkusa ugotovili, da se z uporabo fotografij, zajetih v slabših vremenskih razmerah, kar za 20 % zmanjša število prepoznanih veznih točk v primerjavi z obdelavo fotografij, zajetih v dobrih vremenskih in svetlobnih razmerah. Prav tako se pri uporabi takšnih fotografij poslabšata točnost izravnave bloka posnetkov in točnost izdelanega digitalnega modela reliefa ter posledično ortofota. Iz fotografij s slabšo ali spremenljivo radiometrično kakovostjo prav tako ni mogočne izdelati kakovostnega mozaika ortofotov. Pomanjkanje veznih točk vpliva tudi na slabšo popolnost izdelanega fotogrametričnega oblaka točk, zaradi česar se lahko zniža kakovost 3D-modela z vidika popolnosti ali poenostavitve modela.

Na kakovost obdelave in algoritmov slikovnega ujemanja vpliva tudi prisotnost šuma. Večja kot je vrednost razmerja med signalom in šumom (angl. *signal-to-noise ratio*), več veznih točk je algoritem slikovnega ujemanja sposoben zaznati in upoštevati pri nadaljnji obdelavi. Kedzierski in Wierzbicki (2015) sta podala objektivno merilo za oceno radiometrične kakovosti fotografij v obliki vrednosti

indeksa ocene kakovosti fotografije (angl. *image quality assessment index value*), ki jo lahko izračunamo za vsako uporabljeno fotografijo. Avtorja predlagata izračun te ocene pred izvedbo slikovnega ujemanja, saj lahko tako že pred obdelavo izločimo fotografije s slabo ali zelo slabo radiometrično kakovostjo. S tem dobimo dobro določene vezne točke. Slabost tega pristopa je predvsem v tem, da z izločanjem fotografij izgubimo določen delež podatkov in posledično nimamo več zagotovljenega zadostnega prekrivanja med sosednjimi fotografijami. Če je le mogoče, snemanje izvajamo v dobrih vremenskih razmerah, kar omogoča doseganje boljših rezultatov pri nadaljnji fotogrametrični obdelavi.

Dandois et al. (2015) so na podlagi eksperimentov določili najprimernejše parametre in pogoje snemanja, ki omogočajo pridobitev rezultatov ustrezne kakovosti pri snemanju gozdnih površin in spremljanju strukture gozda. Poleg predlagane višine leta in zadostnega preklopa med fotografijami so potrdili, da na točnost in popolnost pridobljenega fotogrametričnega oblaka točk vplivajo tudi vremenske razmere med snemanjem.

Zunanje razmere vplivajo tudi na geometrično kakovost podatkov. Tukaj velja omeniti predvsem prisotnost senc na fotografijah. Če snemanje na terenu poteka dlje, se lahko spremeni položaj sonca ali celo vremenske razmere, kar povzroči spremembo položaja senc ali celo osvetlitve fotografij. To lahko negativno vpliva tako na delovanje algoritmov za slikovno ujemanje (Rock et al., 2011) kot tudi na samodejno prepoznavanje objektov na fotografiji. Zaradi slabšega slikovnega ujemanja fotografij je pridobljen fotogrametrični oblak točk lahko močneje notranje deformiran in nepopoln, kar negativno vpliva na kakovost izdelkov, pridobljenih iz takega oblaka točk, kot je digitalni model terena. Zato se poskušamo takim situacijam na terenu, če je le mogoče, izogniti (Martensson in Reshetyuk, 2017). Prav tako je mogoče v fazi predobdelave fotografij izvesti katero od radiometričnih operacij za odstranitev senc na fotografijah in tako izboljšati končno točnost fotogrametričnih izdelkov (Shahbazi et al., 2015).

4.1.2 Dejavniki vpliva, ki so povezani s snemalno misijo

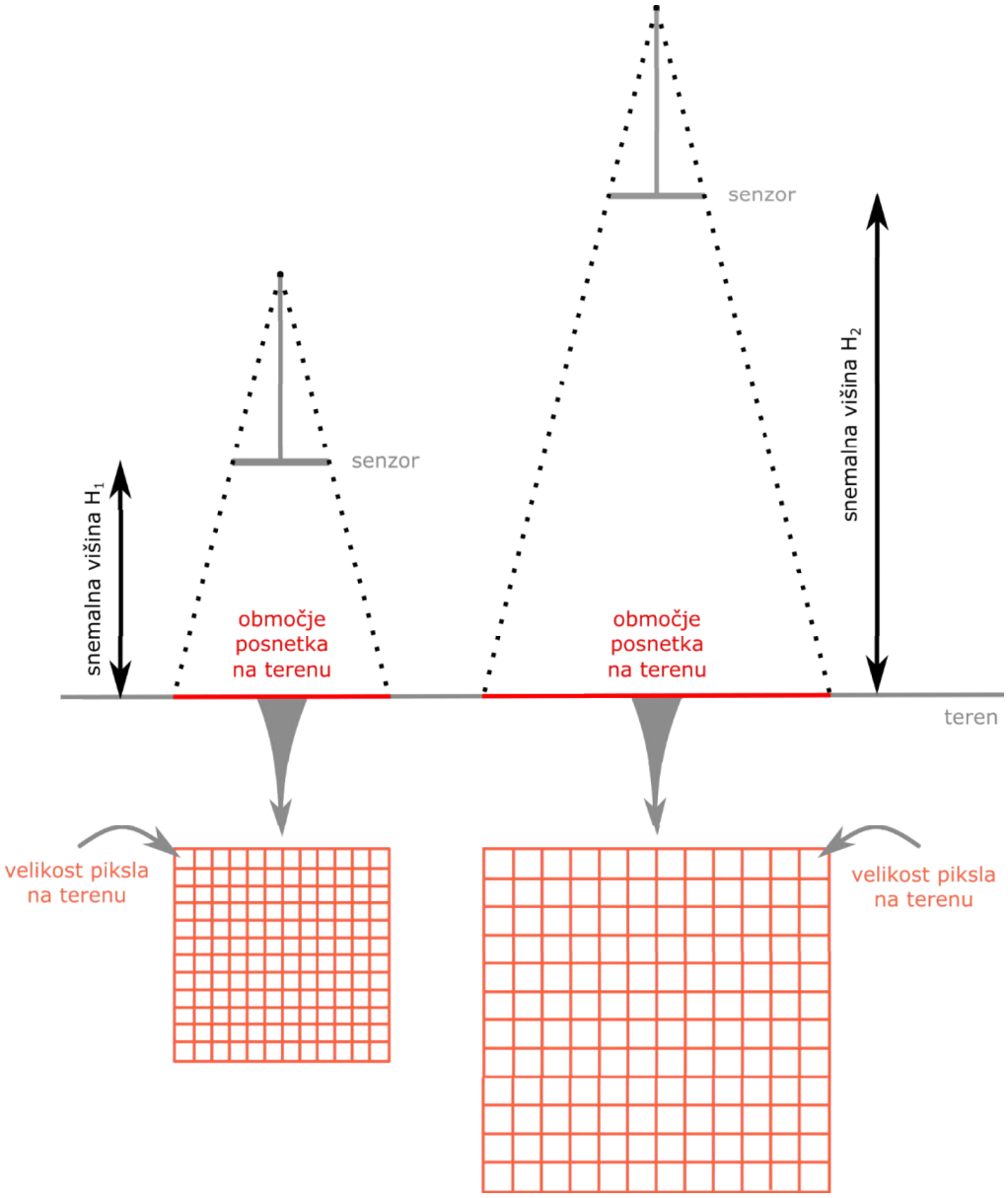
V fazi zajema podatkov z UAV vplivajo na kakovost zajetih podatkov tudi dejavniki, ki so povezani z izvedbo snemalne misije in jih obravnavamo med načrtovanjem izvedbe zajema podatkov. V nadaljevanju bomo podrobneje analizirali naslednje dejavnike vpliva, povezane z izvedbo snemalne misije:

- višino leta in prostorsko ločljivost fotografij,
- prekrivanje med fotografijami,
- geometrijo bloka fotografij.

Višina leta in prostorska ločljivost fotografij

Namen uporabe prostorskih podatkov opredeljuje zahtevano podrobnost zajetih posnetkov. Prostorska ločljivost fotografij je zelo pomemben parameter pri načrtovanju snemanja z letalnikom. Pri izbranem fotoaparatu na prostorsko ločljivost fotografij neposredno vpliva višina leta (Nasrullah, 2016). Velikokrat avtorji raziskav na področju UAV-fotogrametrije svoje izsledke podajajo glede na snemalno višino (James in Robson, 2014; Dandois et al., 2015; Gerke in Przybilla, 2016; Griffiths in Burningham, 2019). Prostorska ločljivost neposredno vpliva na prepoznavanje najmanjših podrobnosti na fotografiji, posredno pa tudi na končno geometrično točnost izdelkov. Pri snemanju z letalniki je torej oddaljenost od snemanega objekta opredeljena kot višina leta nad terenom, ki pomeni vertikalno oddaljenost letalnika od terena v času snemanja. Ob uporabi istega slikovnega senzorja imajo fotografije, zajete na višji višini, slabšo prostorsko ločljivost, kar se odraža v prostorski ločljivosti fotografije (slika 14). Vpliva prostorske ločljivosti fotografij na položajno točnost izdelkov ni mogoče ločeno in jasno ovrednotiti, saj na položajno točnost izdelkov vpliva še veliko drugih dejavnikov. V večini raziskav avtorji ugotavljajo, da se z višjo višino leta položajna točnost izdelkov manjša (Santise et al., 2014; Dandois et al., 2015). Včasih so rezultati tudi manj jasni glede tega (Nasrullah, 2016), vendar, kot že povedano, lahko drugi dejavniki prevladajo, kot so na primer slabše svetlobne razmere, veter ipd., in so rezultati slabši od pričakovanj. V raziskavah, ki smo jih preučili, se največkrat izbira prostorska ločljivost fotografij v razponu od 1 do 5 centimetrov.

Rock et al. (2011) so z analizo digitalnih modelov površja, izdelanih iz fotografij, zajetih na različnih višinah od 50 do 550 metrov nad terenom, ugotovili, da se s povečevanjem višine leta slabša točnost na kontrolnih točkah modela, s katerimi so ocenjevali kakovost. Hkrati priznavajo, da se pri letu letalnika na nižjih višinah, v njihovem primeru med 50 in 70 metri, lahko pojavijo odstopanja od pričakovanih rezultatov zaradi spremenjenih radiometričnih vrednosti na fotografijah. Prav tako je treba poudariti, da je med snemanjem na nizki višini za pokritje želenega območja snemanja treba zajeti več fotografij, kar traja dlje in je časovno potratno, hkrati pa lahko povzroči spremembo položaja senc, ki negativno vplivajo na kakovost določitve 3D-modela. Z vidika kakovosti višina leta letalnika pomembno vpliva na gostoto točk v fotogrametričnem oblaku. Višina neposredno vpliva na prostorsko ločljivost posnetkov, saj se z višino leta manjša ločljivost posnetka pri uporabi enakega slikovnega senzorja. Za dosego višje prostorske ločljivosti in posledično višje gostote oblaka je treba torej izvesti snemanje na nižji višini ali uporabiti senzor, ki omogoča višjo prostorsko ločljivost (Dandois et al., 2015).



Slika 14: Vpliv višine leta na prostorsko ločljivost posnetka ob uporabi enakega slikovnega senzorja.
Figure 14: The impact of flight altitude on spatial resolution in the case of using the same image sensor.

Pri odločitvi o snemalni višini je treba za dosego želene natančnosti in točnosti podatkov upoštevati lastnosti izbrane strojne opreme kot tudi druge parametre leta letalnika. Nižja višina snemanja zagotavlja dobro prepoznavanje detajlov na fotografijah in končnih izdelkih. Pri tem pa se je treba zavedati, da letenje na nižjih višinah podaljša čas letenja, s tem lahko spremembe svetlobnih in drugih razmer bolj vplivajo na radiometrično kakovost fotografij ter posledično na kakovost slikovnega ujemanja. Z večjo podrobnostjo in velikim številom posnetkov se tudi podaljša čas fotogrametrične obdelave.

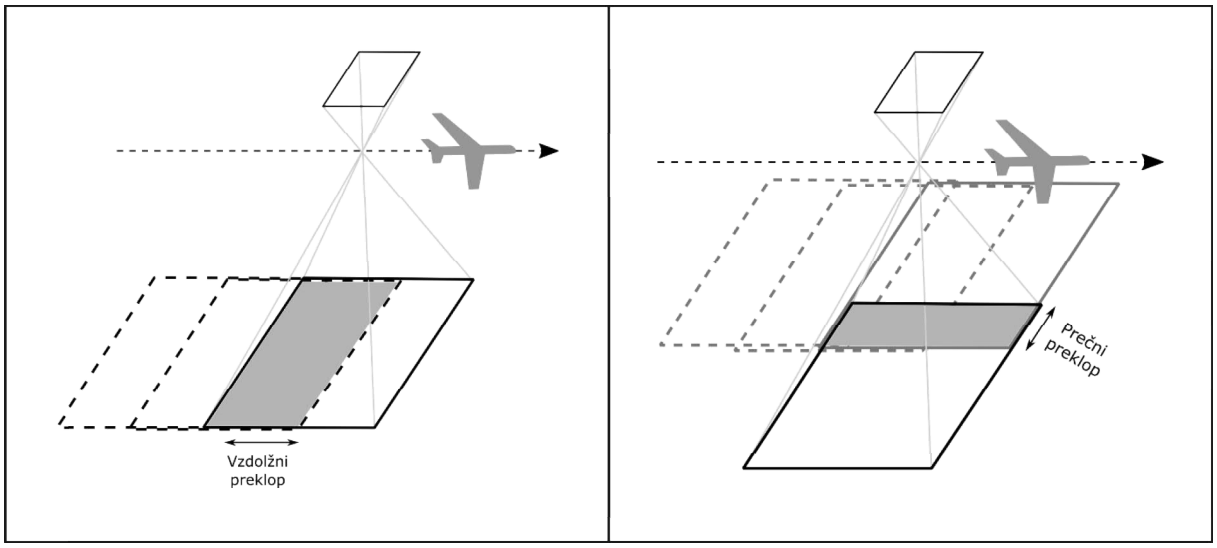
V nekaterih raziskavah so ugotovili, da lahko višina snemanja drugače vpliva na ravninsko in višinsko točnost. Agüera-Vega et al. (2017a) so ugotovili, da višina leta letalnika ne vpliva bistveno na ravninsko točnost prostorskih podatkov, zajetih z letalnikom, če je prostorska ločljivost fotografij boljša od

zahtevane položajne točnosti rezultatov. Na drugi strani so ugotovili, da ima višina leta večji vpliv na višinsko točnost rezultatov, saj se s povečanjem snemalne višine zmanjša višinska točnost rezultatov. Do podobnih rezultatov sta prišla tudi Udin in Ahmad (2014), ko sta primerjala točnosti ortofotov, izdelanih iz UAV-posnetkov. Tudi v tem primeru se ravninska točnost ortofota s spreminjanjem višine ni bistveno spreminjala, medtem ko se je višinska točnost digitalnega modela terena z višino leta zmanjševala. Pri primerjavi zadnjih dveh prispevkov je treba poudariti, da so bile v obeh primerih v absolutnem smislu dosežene različne končne točnosti fotogrametričnih izdelkov, kar je posledica več dejavnikov, med drugim velikosti snemalnega območja, vrste uporabljene strojne opreme in velikosti prekrivanja fotografij.

Prekrivanje fotografij

Prekrivanje (uporablja se tudi izraz *preklop*) fotografij je torej naslednji zelo pomemben parameter leta letalnika pri načrtovanju snemanja. Prekrivanje fotografij se podaja v odstotkih glede na smer leta (vzdolžno in prečno). Prekrivanje med posnetki v vzdolžni smeri omogoča ustvarjanje stereo učinka med sosednjimi posnetki. Prekrivanje med posnetki v prečni smeri služi povezovanju posnetkov v enoten blok.

Za pridobitev 3D-položaja objekta, ki ga zajamemo s fotografijami, se mora objekt nahajati vsaj na dveh fotografijah. Za rekonstrukcijo 3D-modela je treba ob upoštevanju matematičnih zakonitosti centralne projekcije zagotoviti zadostno prekrivanje oziroma preklop med fotografijami tako v vzdolžni kot tudi prečni smeri glede na smer premikanja platforme s fotoaparatom (slika 15). Teoretično bi bilo dovolj, da bi bile fotografije zajete s 50-odstotnim prekrivanjem v smeri leta, s čimer bi bila vsaka točka na terenu prikazana na dveh fotografijah. Pri klasičnem aerofotogrametričnem snemanju je zaradi premikanja snemalne platforme in možnih nagibov zaradi zunanjih vplivov bolj smiselno načrtovati večje prekrivanje, zato običajno znašata vrednosti vzdolžnega prekrivanja 60 % in prečnega prekrivanja 30 % (Kraus, 2007). Pri fotogrametričnem snemanju z daljinsko vodenim letalnikom je snemalni sistem manj stabilen in zato bolj podvržen zunanjim vplivom, hkrati pa zahteva fotogrametrična obdelava posnetkov, zajetih z letalnikom, večjo nadštevilnost zajetih podatkov, zato je treba pri snemanju z letalnikom zagotoviti večje prekrivanje med fotografijami, tako v vzdolžni kot prečni smeri.



Slika 15: Vzdolžno (levo) in prečno (desno) prekrivanje fotografij.
Figure 15: Forward (left) and side (right) image overlap.

Kot sta navedla Colomina in Molina (2014), je treba ob uporabi letalnika že v fazi načrtovanja snemanja predvideti večje prekrivanje kot pri klasičnem letalskem snemanju, s čimer zagotovimo zadostno nadštevilnost med prekrivajočimi se fotografijami in preprečimo premajhno prekrivanje, ki lahko nastane kot posledica nestabilnega leta letalnika zaradi različnih zunanjih vplivov. V strokovni literaturi najdemo priporočila, da naj bi pri snemanjih z daljinsko vodenimi letalniki uporabljali preklop vsaj 70 % v vzdolžni in vsaj 50–60 % v prečni smeri glede na smer letenja letalnika (Colomina and Molina, 2014; Nex in Remondino, 2014; Rupnik et al., 2015; Mosbrucker et al., 2017; Singh in Frazier, 2018).

Rosnell in Honkavaara (2012) sta v svoji raziskavi analizirala kakovost fotogrametričnih oblakov točk, pridobljenih z daljinsko vodenimi letalniki, in dokazala vpliv prekrivanja med sosednjimi fotografijami na točnost določitve parametrov zunanje orientacije fotografij in posledično na točnost določitve točk v oblaku točk. Z večjim vzdolžnim prekrivanjem se poveča število veznih točk med sosednjimi fotografijami, kar omogoči večje število opazovanj in posledično večjo nadštevilnost določitve podrobnosti na fotografijah.

Dandois et al. (2015) so v fazi načrtovanja snemanja spreminjali razdaljo med sosednjimi linijami preleta letalnika, tako da so z različnimi konfiguracijami leta dobili različne vrednosti prekrivanja prečno glede na smer premikanja letalnika, in sicer so izbrali vrednosti prečnega prekrivanja 20, 40, 60 in 80 %. Za vsako vrednost prečnega prekrivanja so izvedli več ponovitev snemanja in nato med seboj primerjali dobljene natančnosti ter točnosti rezultatov v obliki fotogrametričnega oblaka točk. Nato so analizirali še vpliv prekrivanja vzdolž smeri leta letalnika. Tovrstno testiranje so izvedli tako, da so izbrano študijsko območje posneli z visoko vrednostjo vzdolžnega prekrivanja (96 %), nižje vrednosti prekrivanja pa so dobili z izločanjem vmesnih fotografij. Izvedli so več obdelav z različnimi vrednostmi

vzdolžnega prekrivanja, najvišja je bila 96 %, najnižja pa 60 %, in nato za vsak preklop primerjali točnost rezultatov. V več ponovitvah snemanja z enakimi nastavitvami prečnega prekrivanja so ugotovili, da sicer nižja vrednost prečnega prekrivanja vpliva na nižjo gostoto fotogrametričnega oblaka točk, vendar prečno prekrivanje ne vpliva bistveno na položajno točnost določitve 3D-modela. Na drugi strani so pri različnih vrednostih vzdolžnega prekrivanja ugotovili, da obstaja visoka statistična povezanost med prekrivanjem in odstopanji 3D-modela od pravih vrednosti. Podobno so tudi pri vzdolžnem prekrivanju ugotovili povezanost med velikostjo prekrivanja in gostoto fotogrametričnega oblaka točk. Večje kot je prekrivanje, več veznih točk lahko algoritem slikovnega ujemanja zazna med prekrivajočimi se fotografijami, kar posledično pomeni večjo gostoto točk v oblaku točk.

Iz teh ugotovitev so izhajali Torres-Sanchez et al. (2018), ki so potrdili vpliv vzdolžnega prekrivanja med fotografijami in višine leta na gostoto točk v izdelanem fotogrametričnem oblaku točk. Ta povezava je bila očitnejša na nižji višini leta (50 m), medtem ko je bila povezanost med prekrivanjem in gostoto točk manj izrazita na snemalni višini 100 metrov. S preizkusom so dokazali tudi odvisnost trajanja obdelave od števila fotografij, ki jih vključimo v obdelavo. Za dosego večjega prekrivanja je treba zajeti in kasneje obdelati več fotografij, s čimer se bistveno podaljša čas, potreben za pridobitev končnega rezultata. Podobno kot pri gostoti oblaka točk je tudi pri trajanju obdelave povezanost izrazitejša pri obdelavi fotografij, zajetih na višini 50 metrov, kot pri obdelavi fotografij s snemalne višine 100 metrov, kar moramo pripisati višji prostorski ločljivosti fotografij in zato zahtevnejši obdelavi. Večji preklop zagotavlja večjo gostoto oblaka točk in posledično večjo kakovost tako z vidika popolnosti kot tudi točnosti pridobljenega oblaka točk, hkrati po negativno vpliva na trajanje terenskega dela za zajem fotografij in trajanje ter zahtevnost kasnejše obdelave, zato je pred izvedbo terenskega dela vedno smiselno razmisliti o optimalnem razmerju med stopnjo prekrivanja, višino leta in želeno končno kakovostjo pridobljenih rezultatov.

Na podlagi eksperimentalnih primerov so Dandois et al. (2015) in Torres-Sanchez et al. (2018) ugotovili, da je za dosego zadostne popolnosti oblaka točk ter nekajcentimetrske točnosti ob hkratni optimizaciji trajanja zajema in obdelave podatkov smiselno pri snemanju na višini od 50 do 60 metrov zagotoviti vzdolžno prekrivanje 80–85 % in prečno prekrivanje vsaj 60 %. Če snemamo na višji višini, je lahko vzdolžno prekrivanje nekoliko višje (do 90 %), vendar se s tem podaljša čas zajema istega območja, trajanje obdelave podatkov pa še ni bistveno daljše. Pri višjih vrednostih prekrivanja se zahtevnost obdelave zelo poveča, hkrati pa ne dobimo bistveno kakovostnejših rezultatov. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Rupnik et al. (2015), ki so na več primerih uporabe navpičnih in poševnih fotografij testirali natančnost, popolnost ter učinkovitost obdelave fotogrametričnega oblaka točk pri različnih vrednostih prekrivanja med fotografijami. S povečanim prekrivanjem se sicer podaljšata čas zajema posnetkov na terenu in trajanje obdelave, a zaradi višje nadštevilnosti pripomore k boljši natančnosti in točnosti rezultatov. Iz rezultatov so sklepali, da vrednosti vzdolžnega prekrivanja 80 % in prečnega prekrivanja

60 % daje najboljše razmerje med doseženo natančnostjo in točnostjo rezultatov ter obsegom dela na terenu in zahtevnostjo obdelave.

Geometrija bloka fotografij

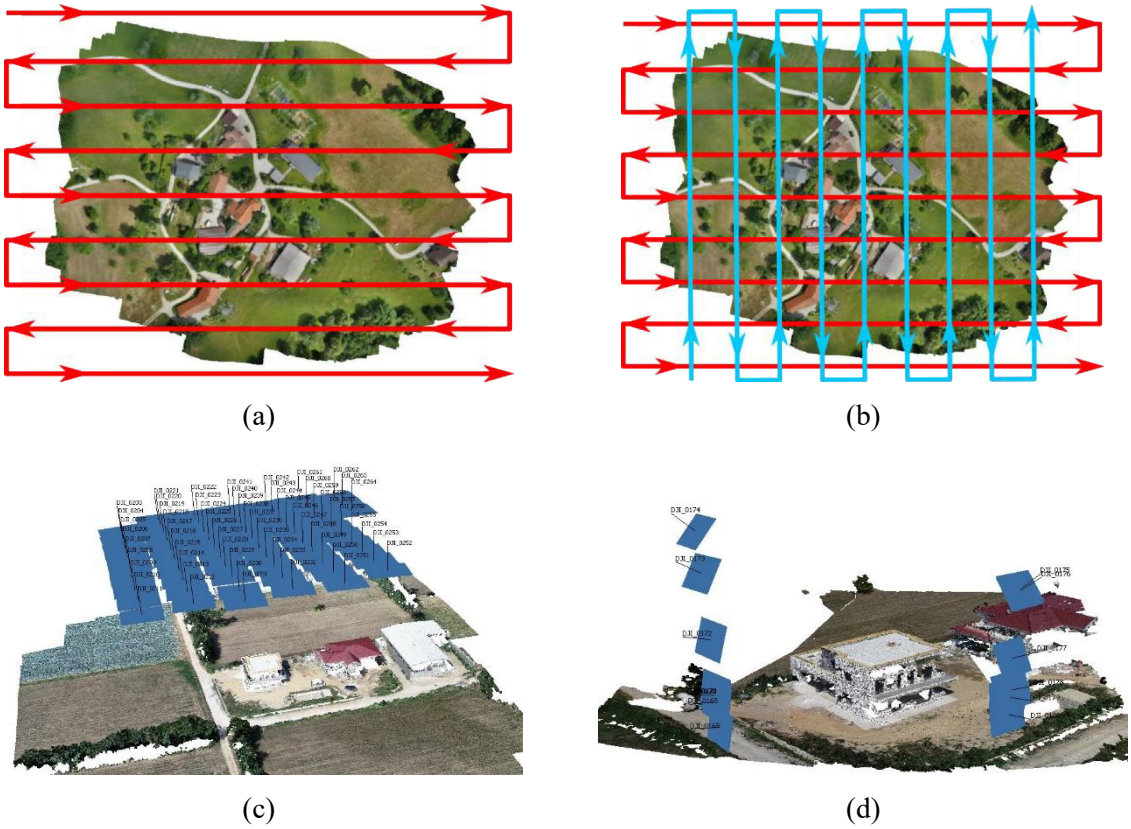
Na točnost določitve 3D-modela iz fotografij, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, vpliva tudi geometrija bloka fotografij, ki določa medsebojno lego in orientacijo fotografij, uporabljenih za izdelavo 3D-modela. Ustrezna geometrija bloka fotografij omogoča pridobivanje točnih in zanesljivih rezultatov, ki jih pridobimo na podlagi meritev v izdelanem fotogrametričnem oblaku točk ali nadaljnjem 3D-modelu (Nocerino et al., 2013).

V klasičnem letalskem fotogrametričnem snemanju zajamemo fotografije tako, da so si osi fotografij med seboj vzporedne, navpične. Tako medsebojno geometrijo osi fotografij pogosto uporabljamo tudi pri snemanju z letalnikom, s čimer optimiziramo delo na terenu, saj v najkrajšem času posnamemo želeno območje na terenu. Ob uporabi nemerskega fotoaparata, nameščenega na letalniku, se pri klasični (nadirni) geometriji bloka fotografij lahko pojavi učinek kupole, ki smo ga opisali že v poglavju o kalibraciji fotoaparata. Ta sistematični pogrešek je pri 3D-modeliranju posebej očiten, ko so osi zajetih fotografij med seboj vzporedne in nimamo na voljo dovolj oslonilnih točk, ki bi zmanjšale ta učinek. Kot predlagata James in Robson (2014), je poleg vključitve oslonilnih točk mogoče tovrsten sistematični vpliv zmanjšati tudi z nekoliko spremenjenim blokom fotografij, in sicer z dodanimi poševnimi fotografijami ali z dodatnim letom letalnika prečno na prvotno smer letenja.

Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi Gerke in Przybilla (2016), ki sta ugotovila izboljšavo kakovosti izdelanih 3D-modelov z vključitvijo dodatnih fotografij, zajetih v prečni smeri glede na prvotno smer letenja na drugačni višini od prvotne, s čimer dobimo spremenjeno geometrijo bloka fotografij (slika 16a, slika 16b). Harwin et al. (2015), ki so med seboj primerjali različne načine kalibracije, so prav tako ugotovili, da dodatne poševne fotografije izboljšajo položajno kakovost izdelanih oblakov točk (slika 16c, slika 16d), če ob tem zagotovimo zadostno prekrivanje med fotografijami in zadostno število oslonilnih točk, razporejenih po snemalnem območju.

S primerjavo rezultatov, pridobljenih iz različnih geometrij blokov fotografij, je bilo ugotovljeno, da omogoča visoka stopnja nadštevilnosti v smislu prekrivanja fotografij in konvergentne osi zajetih fotografij doseganje višje zanesljivosti rezultatov fotogrametrične obdelave. To je posebej očitno pri 3D-modeliranju, če namreč navpičnim fotografijam dodamo še poševne in hkrati v fotogrametrično obdelavo v postopek izravnave posnetkov s snopi vključimo tudi ustrezno izmerjene in po celotnem snemalnem območju enakomerno razporejene oslonilne točke, dobimo rezultate, ki so bolj zanesljivi in hkrati vsebujejo manj notranjih deformacij. Na drugi strani pa je treba upoštevati, da se zaradi dodatnih

poševnih fotografij podaljša izvedba terenskega dela, za zagotovitev ustrezne geometrije bloka fotografij je treba posebno pozornost posvetiti zajemu fotografij, saj le tako omogočimo uspešno slikovno ujemanje, poleg tega moramo za kakovostne rezultate uporabiti kompleksnejše algoritme fotogrametrične obdelave (Nocerino et al., 2013; Nex in Remondino, 2014).



(a) (b)

(c) (d)

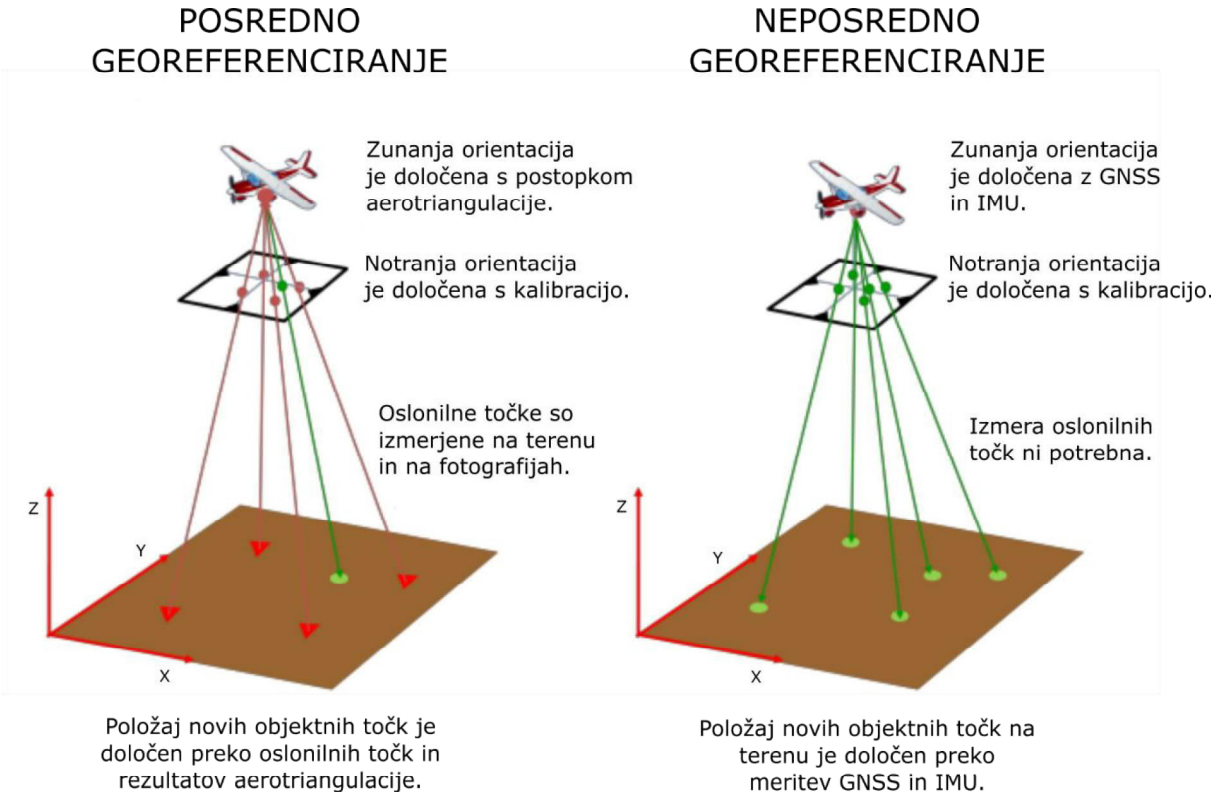
Slika 16: Različni načini zajema fotografij, ki določajo geometrijo bloka fotografij: (a) osnovna smer leta letalnika; (b) osnovnemu preletu letalnika je dodan prečni prelet na drugačni višini; (c) geometrijo mreže sestavljajo zgolj nadirne fotografije; (d) nadirnim fotografijam dodamo poševne fotografije.

Figure 16: Different geometry of image acquisition influencing the image block geometry: (a) basic flight direction of UAV, (b) additional flight in the cross direction to basic direction, (c) geometry of image block contains only nadir imagery, (d) nadir image block can be enhanced with oblique imagery.

4.1.3 Dejavniki vpliva, ki so povezani s posrednim georeferenciranjem oblaka točk

S fotogrametrično obdelavo fotografij, zajetih z letalnikom, v prvem koraku pridobimo rezultate v obliki fotogrametričnega oblaka točk, katerega položaj v prostoru je lahko poljuben. Za uporabo rezultatov v merske namene je treba oblak točk georeferencirati v izbran prostorski koordinatni sistem, s čimer dobimo pravo merilo, položaj in orientacijo oblaka točk v prostoru. To lahko naredimo s postopkom direktnega oziroma neposrednega georeferenciranja, pri katerem so parametri zunanje orientacije posnetkov znani ali pridobljeni hkrati z zajemom fotografij. Tovrsten način georeferenciranja zahteva uporabo kakovostnih senzorjev za pozicioniranje na letalniku, kot sta sprejemnik GNSS in inercialna merilna enota IMU. Druga možnost je indirektno oziroma posredno georeferenciranje, pri katerem je

položaj fotogrametričnega oblaka točk opredeljen v ciljnem koordinatnem sistemu preko znanih koordinat oslonilnih točk. Za izvedbo posrednega georeferenciranja je treba poznati koordinate teh točk tako v slikovnem kot ciljnem koordinatnem sistemu. Prve dobimo z meritvami ustrezno označenih točk na fotografijah, druge določimo z neodvisnimi opazovanji na terenu, na primer z GNSS-izmero ali tahimetrično izmero. Slika 17 prikazuje primerjavo med obema načinoma georeferenciranja oblaka točk.



Slika 17: Primerjava posrednega in neposrednega georeferenciranja (povzeto po Mian et al., 2015).
Figure 17: A comparison between indirect and direct georeferencing. The source of the figure: Mian et al. (2015).

V začetnem obdobju uporabe letalnikov v fotogrametriji so bile oslonilne točke uporabljene šele v drugi fazi fotogrametrične obdelave, ko se je že izdelan 3D-model na osnovi podobnostne transformacije transformiral iz tako imenovanega modelnega v želeni ciljni koordinatni sistem. V tem primeru se pogosto zgodi, da dobimo model, ki je notranje deformiran in posledično slabše točnosti. Položaj točk modela se na oslonilnih točkah dobro prilega pravim vrednostim koordinat ciljnega koordinatnega sistema, z oddaljenostjo od oslonilnih točk pa se pojavijo odstopanja. Sodobnejši algoritmi obdelave posnetkov, zajetih z letalnikom, omogočajo vključitev koordinat oslonilnih točk kot opazovanj neposredno v izravnavo bloka fotografij, s čimer se zmanjšajo notranje deformacije modela (Nocerino et al., 2013; Nex in Remondino, 2014; Gerke in Przybilla, 2016). Ker je pri uporabi letalnikov še vedno bolj razširjena uporaba posrednega georeferenciranja, se bomo v nadaljevanju osredotočili zgolj na to vrsto georeferenciranja. Sledi povzetek znanstvenih objav, v katerih so avtorji analizirali vpliv števila

oslonilnih točk in njihove razporeditve po območju, ki ga želimo zajeti z letalnikom, na kakovost rezultatov fotogrametrične obdelave.

Harwin et al. (2015) so poleg drugih vplivov primerjali točnosti oblakov točk, pridobljenih z vključitvijo različnega števila oslonilnih točk v izravnavo posnetkov. Najprej so v obdelavo vključili pet oslonilnih točk, od tega so bile štiri razporejene na vsakem vogalu, ena pa v središču snemalnega območja velikosti 0,1 hektarja, in primerjali točnosti na kontrolnih točkah. Nato so v obdelavo dodali dodatne oslonilne točke, enakomerno razporejene po istem snemalnem območju; druga obdelava je vključevala skupno 13 oslonilnih točk. Rezultati analize točnosti v obliki vrednosti korena srednjega kvadratnega pogreška *RMSE* na kontrolnih točkah so pokazali, da uporaba večjega števila oslonilnih točk omogoča doseganje višje točnosti fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer je izboljšanje izrazitejše za višine. Manjše število oslonilnih točk ima večji vpliv na višinsko točnost oblaka točk predvsem takrat, ko so oslonilne točke izmerjene z manjšo točnostjo. Podobno sta Reshetyuk in Mårtensson (2016) pri izdelavi digitalnega modela terena na območju velikosti 2,4 hektarja analizirala točnost aerotriangulacije posnetkov za pridobitev fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer sta prav tako preverjala vpliv različnega števila oslonilnih točk. Na podlagi rezultatov sta ugotovila, da se s povečevanjem števila oslonilnih točk povečuje točnost izvedene aerotriangulacije. Z večjim številom oslonilnih točk, enakomerno razporejenih po celotnem območju, se zmanjšajo predvsem odstopanja na sredini območja, s čimer se zmanjša učinek kupole, ki nastane v primeru premajhnega števila oslonilnih točk. Tudi Gerke in Przybilla (2016) podajata podobne ugotovitve na podlagi rezultatov eksperimentalnih testov na dveh snemalnih območjih. S povečanjem števila oslonilnih točk na robovih območja na 17 točk na prvem območju in 18 točk na drugem območju, razporejenih po celotnem območju, ne le na robovih, sta prav tako opazila izboljšavo točnosti izravnave posnetkov, ki je bila še posebej očitna pri višinski komponenti koordinat kontrolnih točk.

Vpliv različnega števila in razporeditve oslonilnih točk na kakovost fotogrametričnih izdelkov so analizirali tudi Sanz-Ablanedo et al. (2018). Snemalno območje, na katerem so izvajali analizo, je bilo v primerjavi s prej navedenimi objavami večje, saj je obsegalo kar 1225 hektarjev (12,25 km^2). S postopnim dodajanjem enakomerno razporejenih oslonilnih točk, od začetnih treh do končne 101 oslonilne točke, so izvajali izravnavo posnetkov in primerjali izračunane vrednosti RMSE tako na oslonilnih kot na kontrolnih točkah. Izkazalo se je, da se z večanjem števila oslonilnih točk izboljša točnost georeferenciranja. Pri velikem številu oslonilnih točk se je ravninska točnost stabilizirala na okoli enkratne vrednosti povprečne prostorske ločljivosti vhodnih posnetkov, višinska točnost pa pri dvakratniku vrednosti povprečne prostorske ločljivosti, ob upoštevanju enakomerne prostorske razporeditve oslonilnih točk po celotnem študijskem območju.

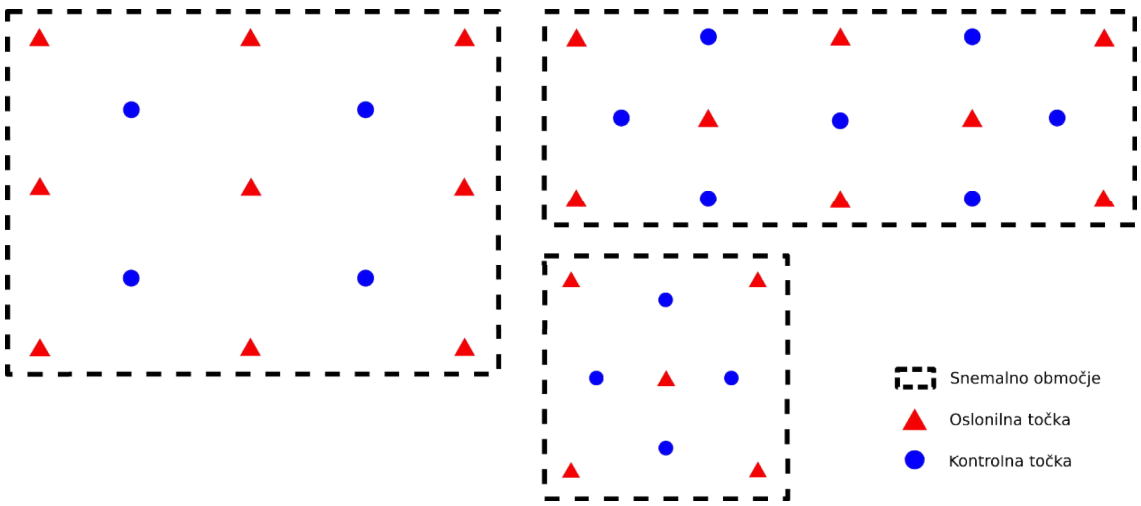
Število in razporeditev oslonilnih točk ne vplivata samo na kakovost fotogrametričnega oblaka točk, ampak posledično tudi na izdelke, ki jih pridobimo z nadaljnjo obdelavo oblaka točk. Več avtorjev je analiziralo vpliv števila oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja, ki ga izdelamo iz posnetkov, zajetih z letalnikom (Shahbazi et al., 2015; Tonkin in Midgley, 2016; Agüera-Vega et al., 2017b; Coveney in Roberts, 2017; Gindraux et al., 2017; Martínez-Carricondo et al., 2018). Med njimi sta Tonkin in Midgley (2016) analizirala ponovljivost in robustnost določitve modela površja ob uporabi različnega števila oslonilnih točk. V praktičnem preizkusu sta na območju velikosti 14,5 hektarja izdelala več digitalnih modelov površja, ki so se med seboj razlikovali po številu uporabljenih oslonilnih točk v postopku izravnave posnetkov s snopi in georeferenciranja oblaka točk. Primerjava je pokazala, da odstopanja med višino na modelu površja in višino, izmerjeno z GNSS, že ob uporabi vsaj štirih kontrolnih točk znašajo med 5,9 in 7,6 centimetra, kar je znotraj položajne točnosti določitve koordinat oslonilnih točk na terenu, na podlagi katerih so bili modeli površja georeferencirani. Koordinate oslonilnih točk so bile na terenu izmerjene z metodo, ki ni bistveno natančnejša od izdelanega modela površja, kar pomeni omejitev pri določitvi površja z višjo točnostjo. Prav zato izrazito povečevanje števila oslonilnih točk med izračunanimi modeli površja od začetnih štirih do končnih 101 ni bistveno pripomoglo k boljši točnosti določitve modela površja. Za ustreznejšo analizo vpliva števila oslonilnih točk na višinsko točnost digitalnega modela površja je smiselno oslonilne točke izmeriti z višjo točnostjo od pričakovane točnosti modela površja, s čimer se vpliv števila oslonilnih točk na višinsko točnost izdelanega modela površja vidneje izrazi. Tudi Shahbazi et al. (2015) so analizirali točnost digitalnega modela reliefa z upoštevanjem različnega števila oslonilnih točk in ugotovili, da več oslonilnih točk, ki so enakomerno razporejene po snemalnem območju, omogoča doseganje višje točnosti rezultatov. Če ni mogoče zagotoviti zadostnega števila oslonilnih točk, je treba upoštevati zahtevo, da se točke nahajajo na takih lokacijah na snemalnem območju, da so vidne na čim več fotografijah, ki jih zajamemo z letalnikom. Podobno raziskavo so izvedli Gindraux et al. (2017), ki so na treh nekoliko večjih snemalnih območjih, velikosti med 1,4 km^2 in 6,9 km^2, analizirali vpliv števila in razporeditve oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja. Avtorji so podali optimalno število oslonilnih točk glede na velikost snemalnega območja za dosego visoke točnosti rezultatov, zajetih z letalnikom, in sicer ta znaša za višinsko komponento 17 točk/km^2, za ravninsko pa 7 točk/km^2. Ob upoštevanju vsaj tolikšnega števila oslonilnih točk, enakomerno razporejenih po snemalnem območju, so dosegli ravninsko položajno točnost rezultatov reda velikosti prostorske ločljivosti vhodnih fotografij, višinska položajna točnost je bila slabša in je znašala približno 2,5 velikosti prostorske ločljivosti vhodnih fotografij. Nadaljnje dodajanje oslonilnih točk ni prispevalo k višji točnosti modela, kar je v skladu z ugotovitvami v prispevkih Sanz-Ablanedo et al. (2018) ter Tonkin in Midgley (2016). Pri tem poudarjamo, da je treba pri izbiri ustreznega števila oslonilnih točk upoštevati tako površino območja, na katerem želimo zajeti podatke, kot tudi prostorsko ločljivost posnetkov, ki jih bomo uporabili v obdelavi, saj tudi ta dejavnika vplivata na odločitev o številu oslonilnih točk in njihovi razporeditvi za dosego ustrezne kakovosti rezultatov.

Tonkin in Midgley (2016) ter Gindraux et al. (2017) so analizirali vpliv razporeditve oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja. V obeh objavah avtorji ugotavljajo, da omogoča enakomerna in dovolj gosta razporeditev oslonilnih točk dosego homogene točnosti modela po celotnem območju, saj se s povečevanjem oddaljenosti od najbližje oslonilne točke poslabša lokalna točnost izdelanega modela površja. Odstopanja modela od pravih vrednosti so bila največja v predelih snemalnega območja, ki so bili najbolj oddaljeni od najbližje oslonilne točke. Avtorji obeh prispevkov podajajo zelo primerljive rezultate z vidika slabše točnosti pri neenakomerni prostorski razporeditvi oslonilnih točk, saj je v obeh primerih na oddaljenosti 100 metrov od najbližje oslonilne točke znašalo višinsko odstopanje modela 10 centimetrov, medtem ko je bilo na oddaljenosti 250 metrov to odstopanje že približno 40 centimetrov. To sovpada z ugotovitvami drugih avtorjev, ki priporočajo razporeditev oslonilnih točk na zunanjem obodu snemalnega območja, hkrati pa naj bodo točke enakomerno razporejene tudi znotraj območja, saj s tem zagotovimo boljšo višinsko točnost in preprečimo notranje deformacije modela (James in Robson, 2014; Gerke in Przybilla, 2016; Martínez-Carricondo et al., 2018).

Zelo podobne rezultate navajajo tudi Agüera-Vega et al. (2017b) v raziskavi vpliva števila oslonilnih točk na ravninsko točnost ortofota in višinsko točnost digitalnega modela površja, pridobljenega iz posnetkov z letalnikom. Na snemalnem območju velikosti 17,6 hektarja so izvedli več obdelav posnetkov z upoštevanjem od 4 do 20 oslonilnih točk. V obravnavanem testu so ugotovili, da je mogoče najboljšo točnost doseči pri uporabi 15 in 20 oslonilnih točk, in sicer okoli 3 centimetre pri ravninskih koordinatah in okoli 5 centimetrov pri višinah. Podobne srednje vrednosti točnosti so bile ugotovljene tudi pri uporabi zgolj 10 točk, vendar je bila v tem primeru dosežena slabša natančnost z večjo razpršenostjo rezultatov. Tudi v tej raziskavi je uporaba 15 oslonilnih točk pomenila optimalno razmerje med številom oslonilnih točk in doseženo točnostjo rezultatov oziroma razmerje med časom in vloženim delom, ki ga porabimo na terenu za natančno izmero oslonilnih točk, ter kakovostjo rezultatov, ki jih pridobimo s fotogrametrično obdelavo. Če primerjamo rezultate raziskav Coveney in Roberts (2017) ter Agüera-Vega et al. (2017b) lahko vidimo, da so izračunane točnosti ortofota in digitalnega modela reliefa primerljive ob upoštevanju razmerja med velikostjo snemalnega območja in številom oslonilnih točk.

Analizo vpliva števila in razporeditve oslonilnih točk na točnost ortofota in digitalnega modela površja so izvedli tudi Martínez-Carricondo et al. (2018). Tudi v tem primeru se je točnost rezultatov povečevala z dodajanjem dodatnih oslonilnih točk. V raziskavi so poleg števila oslonilnih točk na izbranem snemalnem območju velikosti 17,6 hektarja podrobno analizirali točnost rezultatov tako glede na število kot na razporeditev oslonilnih točk. Ne glede na število oslonilnih točk je bila najboljša ravninska točnost ortofota dosežena pri razporeditvi oslonilnih točk po robu snemalnega območja, ki je pri dovolj velikem številu oslonilnih točk znašala približno 3,5 centimetra in je bila na obravnavanem območju dosežena pri 20 oslonilnih točkah oziroma z vsaj eno točko na vsakih 84 metrov. Višinska točnost

digitalnega modela površja je bila pri vseh številih in razporeditvah oslonilnih točk slabša od ravninske točnosti ortofota in je v najbolj gostih razporeditvah oslonilnih točk znašala okrog 4,3 centimetra, in sicer je bila pridobljena na osnovi 30 oslonilnih točk. V splošnem je najboljšo višinsko točnost, ne glede na število oslonilnih točk, dala enakomerna razporeditev točk po celotnem snemalnem območju. Na podlagi rezultatov analize so avtorji predlagali optimalno razmerje med številom oslonilnih točk in točnostjo rezultatov, ki jo lahko dosežemo ob uporabi danega letalnika za zajem posnetkov ter z izmero območja primerljive velikosti, in sicer znaša to razmerje 0,5–1 oslonilna točka/ha. Podano razmerje je skladno z rezultati raziskav drugih avtorjev (Agüera-Vega et al., 2017b; Coveney in Roberts, 2017), ki so pridobili podobne vrednosti števila oslonilnih točk glede na površino, pri katerih je bila dosežena najvišja točnost rezultatov, in se z dodajanjem dodatnih oslonilnih točk ni izboljševala. Za dosego dobre položajne točnosti bi bila gostota točk lahko nižja, ker pa na podlagi istih podatkov v obdelavi izdelamo tako ortofoto kot digitalni model površja, je treba zagotoviti tolikšno število oslonilnih točk, da dobimo tudi ustrezno točnost modela površja. Gindraux et al. (2017) so sicer predlagali precej nižje zahtevano število oslonilnih točk/ha, vendar so analizirali točnost izdelkov na precej večjem snemalnem območju. Pri določitvi oslonilnih točk je treba poleg števila upoštevati tudi njihovo razporeditev. Kot je razvidno iz rezultatov, moramo za dosego ustrezne ravninske in višinske točnosti fotogrametričnih izdelkov točke razporediti po celotnem snemalnem območju, tako na robu kot po sredini, poleg tega morajo biti točke po območju razporejene enakomerno (slika 18).



Slika 18: Primeri enakomerne razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk po snemalnem območju v odvisnosti od njegove velikosti in oblike.

Figure 18: Examples of even distribution of ground control points over the acquisition field depending on the size and shape of the field.

Zanimivo raziskavo točnosti fotogrametričnih izdelkov, izdelanih iz podatkov, zajetih z letalnikom, so izvedli Galván Rangel et al. (2018). Z vidika števila in razporeditve oslonilnih točk so primerjali ustreznost ortofota in digitalnega modela višin glede na zahteve treh standardov, ki opredeljujejo zahtevano točnost fotogrametričnega izdelka, in sicer so uporabili standard NMAS (angl. *National map*

accuracy standard), standard ASPRS (angl. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) in standard NSSDA (angl. *National standard for spatial data accuracy*) (Galván Rangel et al., 2018). Ugotovili so, da enakomerna razporeditev oslonilnih točk po robovih območja in v njegovi notranjosti, ob upoštevanju zadostnega prekrivanja ter dovolj visoki natančnosti določitve koordinat oslonilnih točk, omogoča izdelavo fotogrametričnih izdelkov s položajno točnostjo, ki je skladna z zahtevami izbranih standardov. Hkrati so ugotovili, da na ravninsko točnost vplivajo zgolj točke na robovih snemalnega območja. S povečevanjem števila točk na robovih se ravninska točnost izboljšuje, dodatne točke v sredini območja pa ne pripomorejo bistveno k višji točnosti, kar je skladno z ugotovitvami iz klasične fotogrametrije. Oslonilne točke na sredini snemalnega območja pa močno vplivajo na višinsko točnost, zato je treba za ustrezno višinsko točnost poleg točk na robovih snemalnega območja zagotoviti tudi točke znotraj območja (slika 18). S tem se zmanjša učinek kupole, kar so dokazali tudi drugi avtorji (James in Robson, 2014; Gerke in Przybilla, 2016; Martínez-Carricondo et al., 2018). Galván Rangel et al. (2018) so predlagali tudi optimalno število oslonilnih točk, ki omogoča doseganje optimalne točnosti glede na ostale parametre snemanja, in sicer so za ravninsko točnost opredelili 0,07 točk/ha in za višinsko točnost 0,10 točk/ha. Z nadaljnjim dodajanjem oslonilnih točk po snemalnem območju se točnost izdelkov ni bistveno izboljšala, zato vključevanje večjega števila oslonilnih točk od predlaganega na tovrstnem območju ni smiselno. Rezultati so primerljivi z ugotovitvami drugih avtorjev, ki so izvajali snemanje razmeroma velikih območjih (Gindraux et al., 2017; Sanz-Ablanedo et al., 2018).

4.2 Dejavniki vpliva na kakovost pri obdelavi podatkov

Zajemu podatkov na terenu sledi obdelava, s katero iz zajetih podatkov pridobimo podatke in informacije o prostorskih entitetah, ki jih opazujemo. Če želimo iz fotografij, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, izdelati 3D-model stavbe v merilu in v prostorskem referenčnem koordinatnem sistemu, je postopek sestavljen iz obdelave fotografij in iz obdelave fotogrametričnega oblaka točk. Rezultat je fotogrametrični oblak točk v prostorskem referenčnem koordinatnem sistemu, ki ga bo mogoče uporabiti v postopku modeliranja stavb. V prvem delu tega poglavja opisujemo postopke obdelave fotografij z uporabo algoritmov grajenja strukture iz gibanja in gostega slikovnega ujemanja ter dejavnike, ki vplivajo na kakovost obdelave v tej fazi procesa izdelave 3D-modela. V drugem delu obravnavamo algoritme za obdelavo fotogrametričnega oblaka točk in analiziramo njihov vpliv na kakovost rezultatov obdelave.

4.2.1 Obdelava fotografij

Za izdelavo vektorskega 3D-modela stvarnega prostora na osnovi fotogrametričnega oblaka točk je treba po terenskem snemanju z letalnikom in zajemu dodatnih prostorskih podatkov, kot so koordinate

oslonilnih točk, izvesti ustrezno fotogrametrično obdelavo zajetih fotografij, da pridobimo fotogrametrični oblak točk. Fotogrametrično obdelavo za pridobitev oblaka točk običajno izvedemo v specializiranih programskih okoljih, ki uporabljajo algoritme grajenja strukture iz gibanja (SfM) in algoritme gostega slikovnega ujemanja. Rezultat je rekonstrukcija prostora oziroma snemalnega območja v obliki 3D-oblaka točk.

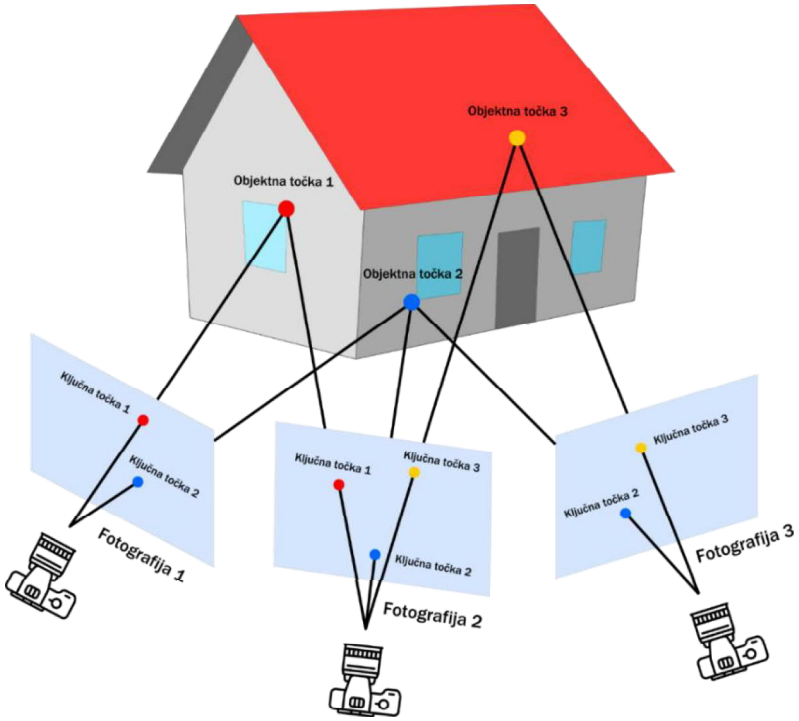
Pred fotogrametrično obdelavo je treba zajete podatke pripraviti in urediti v ustrezno obliko. Pred tem lahko izvedemo predhodno obdelavo fotografij, ki bo omogočala lažjo in kakovostnejšo obdelavo ter pridobitev boljših rezultatov. Odločitev o izvedbi predobdelave in izbiri postopkov je odvisna od značilnosti snemalnega projekta ter zajetih podatkov, zato ni mogoče enoznačno opredeliti, katere postopke je treba izvesti pred glavno obdelavo. Z namenom izboljšave zajetih fotografij lahko izvedemo različne radiometrične popravke slikovnih elementov fotografij, kot so uravnavanje svetlosti, izboljšava kontrasta ali ostrine fotografij. Prav tako je mogoče iz niza fotografij izločiti neostre fotografije, zaradi katerih bi se zmanjšala kakovost končnih rezultatov, ali jih deloma maskirati, s čimer izločimo objekte na fotografijah, ki jih nočemo prikazati v 3D-modelu – sem se na primer uvršča odprava premičnih objektov na fotografijah, kot so avtomobili. V tej fazi lahko izvedemo tudi geometrijsko prevzorčenje fotografij na želeno prostorsko ločljivost ali pretvorbo fotografij v ustrezen datotečni format, primeren za obdelavo v izbranem programskem okolju. Pred glavno fotogrametrično obdelavo je nadalje mogoče izvesti predhodno kalibracijo merske opreme na podlagi predhodno zajetih podatkov na testnem polju. Elemente notranje orientacije lahko uporabimo kot vhodne podatke pri izvedbi glavne fotogrametrične obdelave (Harwin et al., 2015).

Struktura iz gibanja

Z izrazom grajenje strukture iz gibanja (angl. s*tructure from motion – SfM*) poimenujemo postopek, s katerimi z obdelavo fotografij hkrati pridobimo podatke o položaju in orientaciji zajetih fotografij ter 3D-podatke oziroma »strukturo« objekta, ki jo določimo na fotografijah. Postopek, ki omogoča samodejno in hkratno določitev parametrov notranje ter zunanje orientacije in geometrije snemalnega območja, je bil razvit že v 80. letih prejšnjega stoletja v okviru odkritij na področju računalniškega vida. V zadnjem desetletju se je postopek uveljavil tudi v fotogrametriji, kjer je poleg vizualizacije pomemben tudi merski vidik uporabe 3D-modelov objektov, izdelanih z uporabo algoritmov grajenja strukture iz gibanja (Apollonio et al., 2014).

Postopek grajenja strukture iz gibanja je prvi del fotogrametrične obdelave, s katerim lahko hkrati določimo 3D-položaje veznih točk v fotogrametričnem oblaku točk in parametre zunanje orientacije zajetih fotografij. Vključuje samodejne postopke prepoznavanja identičnih točk na prekrivajočih se delih fotografij, njihovo povezovanje in izdelavo redkega fotogrametričnega oblaka točk brez nujnega

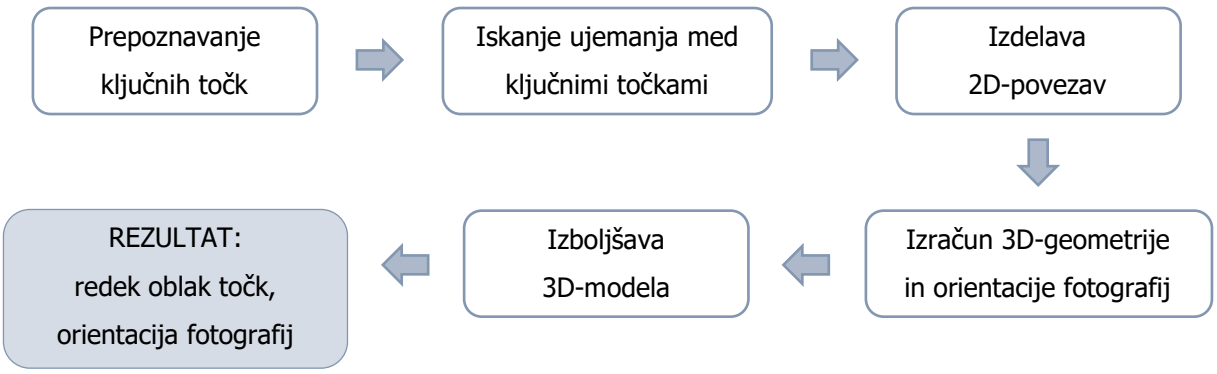
predhodnega poznavanja zunanje orientacije fotografij, kot je to značilno za klasično fotogrametrično obdelavo. Slednja je temeljila na določitvi 3D-položaja točk na fotografijah preko znane notranje orientacije merskega fotoaparata in zunanje orientacije fotografij, ki je bila bodisi poznana ali pa posredno določena preko znanih položajev oslonilnih točk v referenčnem (objektnem) koordinatnem sistemu (Kraus, 2007). Algoritmi grajenja strukture iz gibanja ne zahtevajo predhodno znanih parametrov notranje in zunanje orientacije, temveč omogočajo, da na osnovi velikega števila prekrivajočih se fotografij z iterativnimi postopki slikovnega ujemanja pridobimo 3D-strukturo snemalnega območja ter hkrati ob tem določimo parametre tako notranje kot tudi zunanje orientacije fotografij (Westoby et al., 2012). Prav tako pri snemanju ni treba uporabiti klasičnih merskih fotoaparatov s stabilno geometrijo in predhodno določenimi parametri notranje orientacije, kot smo vajeni pri snemanjih v klasični fotogrametriji, temveč je mogoče uporabiti tudi nemerske fotoaparate, za katere med postopkom grajenja strukture iz gibanja izvedemo tako imenovano samokalibracijo. Takšen način kalibracije se je v preteklosti že uporabljal pri bližnjeslikovni fotogrametriji, v zadnjih letih pa se je uveljavil tudi na področju uporabe letalnikov (Colomina in Molina, 2014). Slika 19 prikazuje splošen pristop k zajemu fotografij za uporabo v SfM-MVS fotogrametriji.



Slika 19: Zajem fotografij za uporabo v SfM-MVS fotogrametriji (povzeto po Piermattei, 2016).
Figure 19: Image acquisition in the case of SfM-MVS photogrammetry (adopted from Piermattei, 2016).

V splošnem je postopek grajenja strukture iz gibanja sestavljen iz naslednjih korakov (slika 20) (Snavely et al., 2006; Furukawa in Hernández, 2013):

1. *Prepoznavanje značilk za točke na eni fotografiji:* algoritem poišče značilke za ključne točke (angl. *keypoints*) na vsaki posamezni fotografiji v nizu. Za vsako ključno točko se poleg njene lokacije izračuna tako imenovani lokalni opis (deskriptor).
2. *Iskanje ujemanja med ključnimi točkami v paru fotografij:* s primerjavo lokalnih deskriptorjev ključnih točk se poiščejo slikovna ujemanja na dveh fotografijah. Vsak par točk, katerih deskriptorja se zadostno ujemata, dobi oznako slikovno ujemajočih se točk (angl. *image correspondences*), ki jih v fotogrametriji imenujemo vezne točke (angl. *tie points*). V okviru izračunanih ujemajočih se parov točk se nato iterativno izločijo morebitno grobo pogrešena ujemanja.
3. *Izdelava 2D-povezav med ujemajočimi se pari veznih točk:* po določitvi ujemajočih se točk med dvema fotografijama se ta ujemanja sestavijo v tako imenovane 2D-povezave, ki določajo povezan niz ujemajočih se točk na vseh fotografijah v bloku, kjer se točke pojavijo.
4. *Izračun parametrov zunanje orientacije fotografij in rekonstrukcija 3D-položajev veznih točk:* na osnovi veznih točk in 2D-povezav med njimi se določijo 3D-položaji veznih točk ter parametri zunanje orientacije kamere. V primeru samokalibracije se izračunajo tudi parametri notranje orientacije kamere.
5. *Izboljšava 3D-modela z izravnavo bloka posnetkov:* v zadnjem koraku se 3D-koordinate veznih točk in izračunana orientacija vključijo v skupno izravnavo, tako da se minimizirajo popravki merjenih slikovnih koordinat veznih točk. Rezultat postopka je redek oblak točk z znanimi 3D-položaji veznih točk v poljubnem koordinatnem sistemu, položaj in orientacija vhodnih fotografij ter ob izvedbi samokalibracije tudi parametri notranje orientacije.



Slika 20: Splošni koraki v postopku strukture iz gibanja (Furukawa in Hernández, 2013).
Figure 20: The basic steps in the structure-from-motion workflow (Furukawa and Hernández, 2013).

Georeferenciranje tako pridobljenega oblaka točk lahko izvedemo na koncu fotogrametrične obdelave z uporabo prostorske podobnostne transformacije med koordinatnim sistemom, v katerem je bil določen položaj fotogrametričnega oblaka točk s postopkom grajenja strukture iz gibanja, in izbranim ciljnim (objektnim) koordinatnim sistemom. Transformacija se izvede z identifikacijo položajev oslonilnih točk

v oblaku točk in znanih ali predhodno določenih koordinat oslonilnih točk. Drugi, bolj priporočljiv postopek je hkratna izvedba georeferenciranja in grajenja strukture iz gibanja, ko v iterativni izračun izravnave bloka posnetkov kot opazovanja vključimo koordinate položajev oslonilnih točk na terenu. S tem v izdelavo fotogrametričnega oblaka točk vpeljemo dodatne geometrijske pogoje, s katerimi zmanjšamo notranje deformacije modela, do katerih običajno pride, če oslonilne točke niso vključene v izravnavo in izdelavo 3D-modela snemalnega območja v obliki oblaka točk.

Z razvojem področja računalniškega vida se je razvilo več različnih algoritmov, ki omogočajo prepoznavanje značilk za točke na enem posnetku, ki je prvi korak pri grajenju strukture iz gibanja. Najširše uporabljeni algoritem za prepoznavanje ključnih točk je algoritem SIFT (angl. *scale-invariant feature transform*) (Lowe, 2004), ki omogoča prepoznavanje točk na fotografijah ne glede na spremembo merila, zasuke in različno osvetlitev vhodnih fotografij ter izračun deskriptorjev za vsako ključno točko. Na podlagi algoritma SIFT so se razvile njegove dodatne različice, kot sta Affine-SIFT (Morel in Yu, 2009) in GLOH (Mikolajczyk in Schmid, 2005), ki naj bi ob večjih razlikah v merilu fotografij omogočala boljše rezultate v smislu prepoznavanja večjega števila ujemajočih se točk. Drugi podobni algoritmi so še SURF (angl. *speeded up robust features*) (Bay et al., 2006), BRIEF (angl. *binary robust independent elementary features*) (Calonder et al., 2010), DAISY (Tola et al., 2010) itd.

Z vidika kakovosti se algoritmi med seboj razlikujejo po učinkovitosti in robustnosti delovanja v primeru raznolikih vhodnih fotografij, časa, potrebnega za obdelavo, uspešnosti pri identifikaciji ujemajočih se točk med fotografijami in uspešnosti pri prepoznavanju ter izločanju grobo pogrešenih ujemajočih se točk. Delovanje algoritmov je zato treba primerjati z vidika rezultatov obdelave istega podatkovnega niza. Bianco et al. (2018) so primerjali šest različnih odprtokodnih programskih rešitev za izvedbo grajenja strukture iz gibanja na več različnih podatkovnih nizih, in sicer so primerjali algoritme *COLMAP, OpenMVG*, *Theia*, *VisualSFM*, *Bundler* in *MVE*. Rezultati raziskave so pokazali, da se uporabljeni algoritmi med seboj razlikujejo tako v točnosti in natančnosti določitve redkega oblaka točk kot tudi v številu značilnih točk, ki jih je posamezen algoritem prepoznal pri grajenju strukture iz gibanja. Razlike so se pokazale v vrednostih zunanje orientacije uporabljenih fotografij, ki se določijo v postopku izdelave redkega oblaka točk. V prispevku je bilo poudarjeno, da na uspešnost izvedbe algoritma in kakovost rezultatov grajenja strukture iz gibanja vplivajo tudi lastnosti snemanega objekta ali prostorske entitete, saj sta prisotnost enolične teksture ter simetrična in »preprosta« oblika objekta negativno vplivali na število prepoznanih točk v redkem oblaku točk. Pomanjkljivost obravnavane primerjave algoritmov za naše potrebe je, da so podatkovni nizi vsebovali le sintetično generirane terestrične fotografije manjših objektov in ne fotografij stvarnega prostora na večjem snemalnem območju, ki jih dobimo pri topografskem kartiranju z letalnikom. Podobno primerjavo več odprtokodnih algoritmov (*VisualSFM*, *OpenMVG*, *MVE*, *COLMAP*) in ene komercialne programske rešitve (*Agisoft Photoscan*) za grajenje strukture iz gibanja so izvedli Martell et al. (2018), kjer so uporabili dva realna

podatkovna niza, in sicer posnetke letalnika za dve izbrani stavbi na terenu. Algoritmi so se med seboj razlikovali tako po času, potrebnem za obdelavo izbranega podatkovnega niza, kot po položajni točnosti rezultatov v obliki oblaka točk.

Rezultati navedenih objav kažejo, da izbira algoritma grajenja strukture iz gibanja vpliva na rezultat obdelave. Žal so ti algoritmi velikokrat v obliki uporabniško »neprijaznih« odprtokodnih rešitev ali del kompleksnih komercialnih programskih okolij za fotogrametrično obdelavo, zato ima uporabnik redko možnost vplivati na njihovo delovanje. Pri odprtokodnih rešitvah je običajno še mogoče pridobiti informacije o posameznih korakih in načinu delovanja. Pri komercialnih programskih okoljih, ki jih v praksi največkrat uporabljamo, je to težje oziroma največkrat nemogoče, zato uporabnik ne ve, kateri algoritmi so uporabljeni in kako delujejo. Mogoča je le analiza končnih rezultatov obdelave in njihova primerjava z rezultati iz drugih programskih okolij ali z rezultati, ki smo jih pridobili z natančnejšimi metodami izmere, kot so ALS, TLS, tahimetrična izmera ipd.

Izdelava gostega oblaka točk

Naslednji korak v fotogrametrični obdelavi je izdelava gostega oblaka točk (MVS), ki podrobneje podaja geometrijo s 3D-modelom obravnavanega območja ali objekta v obliki oblaka točk. Gost oblak točk pridobimo iz fotografij z znanim položajem in orientacijo v prostorskem referenčnem koordinatnem sistemu. Izdelava takega oblaka točk se običajno izvede v specializiranih fotogrametričnih programskih okoljih, v katerih sta postopek grajenja strukture iz gibanja in postopek izdelave gostega oblaka točk združena v zaključeno celoto (SfM-MVS). Po izvedbi grajenja strukture iz gibanja pridobimo podatke o znanih 3D-koordinatah redkega oblaka točk in parametre notranje ter zunanje orientacije fotografije, vse to pa je vhodni podatek za nadaljnjo izdelavo gostega oblaka točk.

V klasični fotogrametriji se na podlagi stereo zajema določijo 3D-koordinate le posameznim značilnim točkam na prekrivajočih se fotografijah. V SfM-MVS fotogrametriji pa se izvede gosto slikovno ujemanje (angl. *dense image matching*), s katerim se določijo 3D-koordinate ujemajočih se točk preko ujemanja vseh pikslov na fotografijah, s čimer dobimo gost 3D-fotogrametrični oblak točk, ki podrobno prikazuje snemalno območje ali objekt. Algoritmi za gosto slikovno ujemanje, ki so poznani tudi na področju računalniškega vida, najprej poiščejo medsebojno ujemajoče se točke na dveh ali več fotografijah. Nato se preko poznavanja medsebojne lege fotografij in ob upoštevanju načela kolinearnosti slikovnih točk na fotografijah in položaja točke v prostoru določijo 3D-koordinate točk v oblaku točk. Najprej se za vsak piksel določi tako imenovana globina (angl. *depth*), ki pomeni relativno oddaljenost vsakega piksla do točke na terenu, ki jo opisuje. Skupna podoba z izračunanimi globinami za vsak piksel na fotografiji sestavlja globinsko karto (angl. *depth maps*). S primerjavo vrednosti globin pikslov na različnih fotografijah, ki ponazarjajo isto točko v prostoru, se določijo karte odstopanj (angl.

disparity maps), preko katerih se nato ob upoštevanju geometrijskih pogojev izračunajo 3D-položaji točk v prostoru in ustvari gost oblak točk (Remondino et al., 2014).

Poznamo več različnih načinov izračuna ujemanja med piksli, med drugim s primerjavo absolutnih ali kvadriranih razlik v intenziteti pikslov, preko normalizirane prečne korelacije med vrednostmi pikslov, s primerjavo pikselskih deskriptorjev, z izračunom gradienta itd. Z vidika načina iskanja ujemajočih se točk ločimo algoritme, ki temeljijo na pristopu iskanja identičnih točk na dveh fotografijah oziroma stereoparu (angl. *stereomatching*), ki se nato prevede na identifikacijo ujemajočih se točk znotraj celotnega bloka fotografij, ali iskanju ujemajočih točk na več fotografijah hkrati (angl. *multi-view stereomatching*).

V splošnem so algoritmi gostega slikovnega ujemanja na stereoparih sestavljeni iz štirih korakov, in sicer po Szeliski (2011, str. 478): »(1) analize ujemanja stroškov (angl. *matching cost computation*), (2) združevanja stroškov (angl. *matching cost computation*), (3) izračuna odstopanj za posamezen piksel (angl. *disparity computation and optimization*), (4) popravka vrednosti odstopanj (angl. *disparity refinemen*t).« Obstaja veliko različic predlaganega splošnega postopka gostega slikovnega ujemanja. Algoritmi gostega slikovnega ujemanja z uporabo stereopara se ločijo na lokalne in globalne. Prvi iščejo ujemajoče se točke znotraj predhodno opredeljenega manjšega območja pikslov, medtem ko globalni algoritmi za določitev 3D-položaja točk v prostoru izvedejo minimizacijo tako imenovane energijske funkcije (Szeliski, 2011; Hosseininaveh Ahmadabadian et al., 2013). Med najpogosteje uporabljene algoritme slikovnega ujemanja na stereoparih v SfM-MVS fotogrametriji sodi algoritem SGM (angl. *semi-global matching algorithm*) (Hirschmüller, 2008), ki omogoča izračun gostega oblaka točk iz stereoparov z znano zunanjo in notranjo orientacijo. Najprej se za vsak piksel prve fotografije izračunajo slikovna ujemanja s piksli na drugi fotografiji, na podlagi ujemanj se nato določi stroškovna funkcija, ki upošteva globalni pogoj gladkosti intenzitet pikslov na globinski karti. Sledi iskanje minimuma globalne energijske funkcije za določitev 3D-točk in odstranjevanje napačno določenih ujemajočih se točk ter morebitnega šuma, ki nastane pri izračunu (Hirschmüller, 2011). Med algoritmi, ki ujemajoče se piksle iščejo na več fotografijah hkrati, se je v fotogrametriji uveljavil algoritem PMVS (angl. *patch-based multi-stereo view*) (Furukawa in Ponce, 2008). Vhodni podatki za algoritem so fotografije, redek oblak točk in parametri zunanje orientacije fotografij. Algoritem poišče ujemajoče se piksle na več fotografijah z uporabo normalizirane križne korelacije, s čimer se kreirajo redka ujemajoča območja. Nato se iterativno izvedeta korak razširjanja območij ujemajočih se pikslov na sosednje piksle in korak filtriranja. Končen rezultat je gost oblak točk z znanimi 3D-koordinatami snemalnega območja.

Izbira algoritma gostega slikovnega ujemanja vpliva na rezultate obdelave, kar potrjujejo ugotovitve v več znanstvenih objavah. Med prvimi je primerjavo algoritmov na istem podatkovnem nizu na področju fotogrametrije predstavil Haala (2013). Ugotovil je, da omogočajo algoritmi gostega slikovnega

ujemanja podrobno, zanesljivo in točno določitev snemalnega površja, vendar pa se uporabljeni algoritmi med seboj močno razlikujejo tako glede zahtevanega časa obdelave kot glede rezultatov v mejnih primerih – to so na primer vodne površine, prisotnost senc ipd., ki povzročijo napačno slikovno ujemanje ali visoko prisotnost šuma. Primerjavo več različnih okolij za gosto slikovno ujemanje na podatkovnih nizih, zajetih s stereofotoaparatom, so izvedli tudi Hosseininaveh Ahmadabadian et al. (2013). Kot glavne dejavnike, ki vplivajo na delovanje algoritmov ter posledično na točnost in popolnost pridobljenih rezultatov, so izpostavili kakovost vhodnih fotografij, predvsem ustrezno merilo, prekrivanje in vpadni kot med sosednjimi fotografijami, ter ustrezno radiometrično kakovost fotografij. Remondino et al. (2014) so primerjali rezultate fotogrametrične obdelave v več odprtokodnih in komercialnih programskih okoljih na različnih tipih podatkovnih nizov. Ugotovili so, da je za kakovostne rezultate obdelave fotografij z izbranim algoritmom za gosto slikovno ujemanje treba zagotoviti kakovostne vhodne fotografije in izbrati primerne nastavitve obdelave glede na lastnosti podatkovnega niza, ki ga obdelujemo. Poudarili so, da je obdelava močno odvisna od nastavitve parametrov obdelave, kar se izkaže kot prednost za izkušene uporabnike, saj lahko parametre ustrezno priredijo tipu snemalnega območja ali objekta, hkrati pa to otežuje pridobitev kakovostnih rezultatov manj izurjenim uporabnikom. Za kakovostne rezultate obdelave gostega slikovnega ujemanja je treba pozornost nameniti predvsem rekonstrukciji majhnih elementov glede na celotno velikost snemalnega območja ali objekta, ostrih robov in območij s sencami. Poleg navedenih dejavnikov sta Haala in Cavegn (2016) kot pomemben dejavnik, ki vpliva na točnost in popolnost določitve 3D-modela z gostim slikovnim ujemanjem, izpostavila teksturo površine, saj algoritmi običajno dajo slabše rezultate slikovnega ujemanja na območjih s pomanjkljivo ali enolično teksturo.

4.2.2 Obdelava fotogrametričnega oblaka točk

V nadaljnjem koraku obdelave je treba izdelan fotogrametrični oblak točk dodatno obdelati in pripraviti za kasnejšo uporabo v procesu 3D-modeliranja prostorskih entitet. Med postopke obdelave oblaka točk med drugim uvrščamo filtriranje, segmentacijo in klasifikacijo. Izbira metode posameznega postopka prav tako vpliva na končno kakovost izdelanega rastrskega ali vektorskega 3D-modela stvarnega prostora.

Segmentacija

Oblak točk sestavlja veliko število točk, ki imajo določen položaj v 3-razsežnem koordinatnem sistemu s koordinatami točk, le te pa na preprost način opisujejo položaj, obliko, velikost in orientacijo snemalnega območja. Posamezna točka v oblaku točk lahko poleg koordinat vsebuje tudi dodatne atribute, ki olajšajo prepoznavanje ter interpretacijo izdelanega oblaka točk. Za uspešno prepoznavanje in pomensko razločevanje točk, ki določajo posamezne entitete v oblaku točk, je smiselno izvesti

postopek segmentacije, s katerim se oblak točk razdeli na manjše skupine točk oziroma segmente, ki določajo pomensko zaključene enote znotraj oblaka točk. Segmentacija se izvede s prepoznavanjem točk v oblaku točk, ki imajo skupno eno ali več lastnosti, bodisi glede na njihove geometrijske bodisi radiometrične vrednosti. Točke v zaključeni skupini z istimi ali podobnimi lastnosti sestavljajo en segment, ki ponazarja izbrano entiteto v oblaku točk (Grilli et al., 2017).

Glede na objave v literaturi ločimo naslednje metode segmentacije oblaka točk (Grilli et al., 2017):

- segmentacija s prepoznavanjem robov (angl. *edge-based segmentation*): v oblaku točk se naprej določijo mejni robovi med različnim območji, sledi združevanje točk, ki jih obdaja isti rob in tvorijo isti segment. Robovi se določijo na temelju sprememb lastnosti lokalnih ploskev, ki jih definirajo točke v oblaku točk; v analizi lastnosti lokalnih ploskev se najpogosteje uporabljajo geometrijske značilnosti ploskev, kot so normala, gradient ali ukrivljenost ploskve. Tovrstne metode delujejo razmeroma hitro, vendar so lahko rezultati v primeru nepopolnih oblakov točk ali pri velikih razlikah v gostoti točk omejene kakovosti;
- segmentacija razširjanja območij (angl. *region growing segmentation*): segmenti se določijo z združevanjem točk, ki imajo podobne geometrijske ali radiometrične lastnosti, s čimer dobimo več izoliranih območij v oblaku točk. Območja se lahko kreirajo iz začetnih majhnih skupin točk, ki se postopoma širijo, ali z začetno uvrstitvijo vseh točk v isto skupino in nato s postopno delitvijo na manjše skupine glede na predhodno določene mejne vrednosti izbrane lastnosti, na podlagi katere se območja določajo. V primerjavi s segmentacijo s prepoznavanjem robov je metoda razširjanja območij odpornejša proti prisotnosti posameznih grobo pogrešenih točk v oblaku točk in neenakomerni gostoti oblaka točk. Posebno pozornost pri tej metodi je treba nameniti ustrezni izbiri začetnih točk in mejnih vrednosti lastnosti, na podlagi katerih segmentiramo oblak točk;
- segmentacija s prileganjem modelov (angl. *model-fitting segmentation*): metoda temelji na predpostavki, da je mogoče objekte v prostoru opisati z geometrijsko preprostejšimi oblikami in telesi, kot so ravnina, valj, krogla ipd. S prileganjem modelov v oblak točk se točkam, ki jih je mogoče opisati z enim od predvidenih oblik ali teles, pripiše skupen segment. Najpogostejši metodi za iskanje najboljšega prileganja modelov v oblaku točk sta Houghova transformacija in algoritem RANSAC (angl. *random sample consensus*), ki delujeta relativno hitro in sta odporni proti prisotnosti večjih odstopanj v vhodnih podatkih;
- hibridna metoda segmentacije: v segmentaciji je mogoče uporabiti kombinacijo več različnih metod, s čimer izboljšamo končne rezultate;
- metode z uporabo strojnega učenja in umetne inteligence: z razvojem zmogljivejše strojne opreme so se tudi v fotogrametriji začele pogosteje uporabljati metode, ki za segmentacijo uporabljajo pristope strojnega učenja in umetne inteligence. Med metodami strojnega učenja se med drugim uporabljajo hierarhično gručenje, metoda k-povprečja (angl. *k-means*), metoda

povprečnega zamika (angl. *mean shift*), metoda podpornih vektorjev (angl. *support vector machines*) itd. Metode z algoritmi strojnega učenja so pri segmentaciji običajno uspešnejše od ostalih metod, ki temeljijo na matematičnih in geometričnih predpostavkah, je pa njihova uporaba računsko zahtevnejša. V zadnjih letih je tako na področju računalništva in fotogrametrije vse več pozornosti namenjene razvoju novih metod, ki za semantično segmentacijo oblaka točk uporabljajo globoko učenje oziroma globoke nevronske mreže (angl. *deep neural networks*) (Zhang et al., 2019).

Klasifikacija

Klasifikacija oblaka točk je postopek razvrščanja posameznih delov oblaka točk v predhodno določene skupine. V klasifikaciji oblaka točk ali označevanju oblaka točk (angl. *point cloud labelling*), kot postopek včasih tudi poimenujemo, določimo, kaj posamezen del oblaka točk prikazuje glede na predhodno določeno klasifikacijsko shemo. Tako je v oblaku točk lažje prepoznati in interpretirati posamezne stvarne entitete v prostoru ter jih nadalje uporabiti v modeliranju. Klasifikacija se lahko izvede na ravni točke, kjer se vsaki posamezni točki določi ustrezen razred, v katerega spada. Nekatere med temi metodami si pri določevanju razreda za izbrano točko običajno pomagajo z okolico točke oziroma prostorsko odvisnostjo med točkami, ki pripadajo istemu razredu. Tak pristop klasifikacije oblaka točk pogosto poimenujemo tudi pomenska ali semantična segmentacija (angl. *semantic segmentation*). Drug pristop temelji na objektni klasifikaciji, pri kateri se najprej izvede segmentacija oblaka točk na segmente, ki vsebujejo množico točk s podobnimi značilnostmi. Sledi klasifikacija z razvrščanjem segmentov v predhodno določene razrede. Pri metodah, ki uporabljajo nadzorovano strojno učenje, je bistvenega pomena postopek učenja modela. Ker oblak točk sestavlja veliko število nestrukturiranih podatkov, ki so pogosto neenakomerne gostote, je postopek klasifikacije zelo zahteven proces in zato ena od glavnih raziskovalnih tem na področju fotogrametrije, daljinskega zaznavanja, računalniškega vida in robotike (Niemeyer et al., 2014; Weinmann et al., 2015; Hackel et al., 2018).

Metode klasifikacije oblakov točk se najbolj razlikujejo med seboj po stopnji nadzora, ki ga ima operater nad izvajanjem klasifikacije točk v posamezne razrede (Rouhani et al., 2017). Glede na uporabljen pristop so Grilli et al. (2017) metode klasifikacije razvrstili v naslednje tri skupine:

- nadzorovana klasifikacija: razvrščanje v razrede se izvede na osnovi predhodnega učenja vzorčnih podatkov. Uporabnik na podlagi vzorčnih podatkov nauči model klasifikacije, kaj opisuje posamezen podatek v oblaku točk, nato se preko modela klasificira preostali del oblaka točk. Pri teh metodah je zaradi kompleksnosti sestave oblaka točk treba v proces učenja vključiti velike količine podatkov, da je končen rezultat klasifikacije ustrezne kakovosti;
- nenadzorovana klasifikacija: te metode ne predvidevajo začetnega učenja modela, temveč se klasifikacija izvede na osnovi podanih parametrov algoritma. Prednost teh metod je, da

uporabniku ni treba predhodno določiti učnih vzorcev za posamezen razred, vendar pa lahko zaradi manjšega vpliva uporabnika na potek klasifikacije rezultati bistveno odstopajo od predvidene razvrstitve v razrede;

- interaktivni pristop: tovrstne metode v celotnem iterativnem postopku zahtevajo aktivnost uporabnika, ki preko navodil v posameznih korakih usmerja potek določevanja in razvrščanja segmentov v razrede. Pristop zahteva več uporabnikovega vloženega dela, a hkrati omogoča, da se klasifikacija izvede na želeni način.

Kakovost izvedene klasifikacije se oceni z vidika tematske točnosti klasificiranih točk v želene razrede in se največkrat prikaže v obliki matrike napak (angl. *confusion matrix*), s katero prikažemo pravilnost izvedene klasifikacije glede na referenčne vrednosti, in z izračunom ostalih meril točnosti klasifikacije, ki jih dobimo posredno preko vrednosti v matriki napak, kot so natančnost, priklic, F-ocena.

Razvoj novih metod segmentacije in klasifikacije oblaka točk je še vedno aktualna tema, tako na področju fotogrametrije kot tudi računalništva. Za lažjo primerjavo med metodami in oceno vpliva metode na uspešnost rezultata klasifikacije se na obeh področjih objavljajo različni primerjalni testi, kjer lahko razvijalci na prosto dostopnem podatkovnem nizu prostorskih podatkov, to je oblaku točk, analizirajo uspešnost svoje metode in jo primerjajo z drugimi. Za področje fotogrametrije in daljinskega zaznavanja so pomembni predvsem primerjalni testi, ki vsebujejo oblake točk iz realnih okolij večjih razsežnosti (na primer realni podatki laserskega skeniranja mesta ali pokrajine). Realni podatki omogočajo ustrezno ovrednotenje uspešnosti izbrane metode klasifikacije za uporabo v nadaljnjih aplikacijah. Iz rezultatov nekaterih primerjalnih testov lahko vidimo, da so metode različno uspešne pri segmentaciji in klasifikaciji oblaka točk. Na uspešnost klasifikacije ne vplivajo zgolj izbira metode klasifikacije in nastavitve njenih parametrov, temveč tudi značilnosti območja in objektov, ki jih oblak točk opisuje (Niemeyer et al., 2014; Hackel et al., 2018).

4.3 Dejavniki vpliva na kakovost pri 3D-modeliranju stavb

V nadaljevanju podrobno opisujemo procese v fazi izdelave 3D-modela prostora na osnovi UAV-fotogrametričnega oblaka točk, kjer se omejimo na modeliranje stavb. Ob tem posebej izpostavljamo dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelanega 3D-modela stavbe v tej fazi procesa. Poudarek je na analizi metod za rekonstrukcijo oziroma 3D-modeliranje stavb, ki kot glavni vhodni podatek uporabljajo UAV-fotogrametrični georeferenciran oblak točk, ciljni model pa je topološko urejen vektorski model stavbe, skladen s standardom OGC CityGML.

Prvi pomemben dejavnik, ki vpliva na kakovost rezultata 3D-modeliranja stavb, je kakovost vhodnih podatkov. Kakovost fotogrametričnega oblaka točk in dejavniki, ki jih moramo upoštevati, da dobimo

oblak točk zadostne kakovosti, so bili obravnavani v poglavjih 4.1 in 4.2. Za pridobitev vektorskega 3D-modela stavbe ustrezne točnosti je treba najprej zagotoviti vhodne podatke ustrezne kakovosti. Absolutna položajna točnost fotogrametričnega oblaka točk neposredno vpliva na položajno točnost končnega 3D-modela in posledično tudi na rezultate nadaljnjih prostorskih analiz, v katerih uporabimo tak 3D-model. Prav tako je popolnost izdelanega 3D-modela lahko odvisna od popolnosti vhodnega oblaka točk. Lahko se zgodi, da je stavba, ki jo želimo modelirati, deloma zastrta z drugimi elementi (na primer z vegetacijo), zaradi česar je oblak točk v zastrtih delih stavbe nepopoln, kar ima lahko za posledico napačen 3D-model. Nekatere pomanjkljivosti vhodnih podatkov v smislu nepopolnosti oblaka točk je sicer mogoče odpraviti z izbrano metodo modeliranja ali z izborom pravih nastavitev parametrov modeliranja. Posamezne metode modeliranja lahko kljub pomanjkljivim podatkom z uporabo predhodno definiranih oblik rekonstruirajo model, skladen z zahtevano kakovostjo. V drugih metodah ustrezne nastavitve parametrov modeliranja omogočijo regularizacijo geometrijsko nepopolnih ali topološko napačnih modelov. Vendar so te rešitve lahko uspešne le v posameznih primerih in v omejenem obsegu, saj v splošnem ni mogoče odpraviti slabosti ali pomanjkljivosti vhodnih podatkov (Oude Elberink in Vosselman, 2011).

Poleg točnosti in popolnosti oblaka točk je pomembna lastnost, ki vpliva na kakovost končnega modela, gostota oblaka točk. Oblak točk mora biti dovolj gost, da je mogoče v njem prepoznati in nadalje rekonstruirati stavbo. Določitev teoretične gostote ALS-oblaka točk za topografsko kartiranje so preučevali Triglav Čekada et al. (2010). Pri kartiranjih v večjih merilih, kot je na primer 1 : 1000, ima točnost vhodnih podatkov večji vpliv kot pri manjših merilih. Gostota oblaka točk vpliva tako na geometrijsko točnost kot tudi na popolnost zajetih objektov v smislu določitve podrobne oblike objekta. Poleg tega gostota oblaka točk vpliva na tematsko točnost, saj zadostna gostota omogoča ustrezno prepoznavanje in ločevanje med raznovrstnimi objekti, ki so zajeti v oblaku točk. Do podobnih zaključkov smo prišli tudi v naši raziskavi Drešček et al. (2020), kjer je bil analiziran vpliv gostote točk na določitev oboda stavbe na podlagi UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Rezultati so pokazali, da gostota oblaka točk vpliva predvsem na popolnost določitve obrisa stavbe, ki jo štejemo kot enega od vmesnih korakov določitve 3D-modela stavbe iz prostorskih podatkov.

Drugi pomemben dejavnik, ki vpliva na kakovost končnega 3D-modela stavbe, so ciljna stopnja podrobnosti in predpostavke o končnem 3D-modelu, ki jih sprejmemo pred začetkom modeliranja. Stopnja podrobnosti 3D-modela stavbe določa raven generalizacije geometrijskih in semantičnih lastnosti izdelanega modela. Višja stopnja podrobnosti modela pomeni boljšo natančnost določitve modela ali njegovih delov in manjšo stopnjo generalizacije v postopku modeliranja, s čimer je model skladnejši z dejanskim stanjem objekta v realnem svetu. Kljub temu pa višja stopnja podrobnosti ne pomeni nujno višje točnosti modela in nadaljnje višje točnosti rezultatov prostorskih analiz, ki jih izvedemo s takimi modeli. V marsikaterem primeru uporabe 3D-modela ni smiselno modelirati modelov

v višji stopnji podrobnosti, ki zahteva več napora pri izdelavi, saj višja stopnja podrobnosti ne pripomore k višji kakovosti rezultatov uporabe 3D-modela. K višji točnosti in zanesljivosti rezultatov uporabe 3D-modelov bolj pripomore višja točnost vhodnih podatkov, na podlagi katerih nastane 3D-model (Biljecki et al., 2018). Dodatno na kakovost izdelanega 3D-modela stavbe vplivajo tudi predpostavke o tem, kakšen model želimo izdelati. V opredeljenih stopnjah podrobnosti modelov stavb v standardu OGC CityGML niso določena stroga pravila, temveč le minimalne zahteve o posameznih detajlih, ki naj jih model v izbrani stopnji podrobnosti vsebuje. Poleg stopnje podrobnosti je treba v postopku modeliranja izbrati posamezne predpostavke, kateri elementi naj bodo del končnega 3D-modela, kar pa tudi vpliva na kakovost izdelanega modela. Znotraj iste stopnje podrobnosti imamo namreč lahko več podrazličic modela iste stavbe, ki vse ustrezajo določilom za izbrano stopnjo podrobnosti, a se med seboj razlikujejo v posameznih vidikih geometrijske ali semantične predstavitve modela. Položaj stavbe v LOD1 ali LOD2 je lahko definiran bodisi z obliko, ki jo določa obris stika stavbe s terenom (zemljišče pod stavbo), bodisi z obliko, ki jo dobimo z obrisom roba strehe, kar vpliva na položaj in obliko modela. Prav tako so stavbe v LOD2 lahko modelirane s streho s preprosto obliko ali pa ima preprosta oblika dodane dodatne elemente na strehi, kot so frčade ali dimniki. Predpostavke o modeliranju torej celovito vplivajo na kakovost 3D-modela, tako na njegovo točnost in natančnost kot tudi na uporabnost ter primernost za izbrano aplikacijo ali analizo (Biljecki et al., 2016).

Vektorsko 3D-modeliranje stavb iz prostorskih podatkov, natančneje iz fotogrametričnega oblaka točk, za pridobitev 3D-modela v LOD2 je sestavljeno iz več zaporednih faz modeliranja, in sicer prepoznavanja stavb, izdelave oboda stavb, rekonstrukcije streh, izdelave in regularizacije modelov. Na koncu sledi še ocena kakovosti izdelanih 3D-modelov (Dorninger in Pfeifer, 2008). Ključna dva koraka v procesu 3D-modeliranja stavb sta (i) prepoznavanje stavb, vključno z rekonstrukcijo oboda stavbe, in (ii) rekonstrukcija 3D-modela (Awrangjeb et al., 2013), zato ju bomo v nadaljevanju podrobneje predstavili, saj je izbira metode v posameznem koraku modeliranja eden od ključnih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost 3D-modela stavbe.

4.3.1 Prepoznavanje stavb in določitev oboda stavb

Pri modeliranju, kjer se kot vhodni podatek uporablja oblak točk, je treba pred izdelavo modela stavb pozornost naprej nameniti prepoznavanju stavb v oblaku točk. Prva možnost je, da s segmentacijo in klasifikacijo celoten oblak točk razdelimo na posamezne razrede točk, kot je opisano v poglavju 4.2.2. Za nadaljnje modeliranje izberemo samo točke razreda stavb in jih uporabimo v 3D-modeliranju. Pogosteje se uporabi druga možnost, ko se vhodni oblak točk najprej loči na točke na terenu in točke nad terenom. V drugem koraku pa se analizirajo zgolj točke nad terenom, med katerimi se poiščejo tiste, ki prestavljajo stavbe (Zhang et al., 2006). V nadaljevanju se bomo osredotočili na drugo skupino metod.

Pri metodah za prepoznavanje stavb neposredno iz oblaka točk običajno naprej uporabimo enega od uveljavljenih algoritmov filtriranja oblaka točk, s katerim se določijo točke terena. Pri tem lahko med drugim uporabimo morfološke filtre, filtriranje na osnovi izračuna naklona med sosednjimi točkami ali na osnovi interpolacije med točkami (Mongus et al., 2014). Podrobno primerjavo med različnimi algoritmi filtriranja točk terena sta izvedla že Sithole in Vosselman (2004). Ko so točke terena odstranjene, je treba za prepoznavanje stavb v oblaku točk analizirati vse preostale točke, ki opisujejo objekte nad terenom. Prepoznavanje stavb oziroma točk, ki opisujejo stavbe v oblaku točk, najpogosteje izvedemo z analizo površine, ki jo določajo točke v oblaku točk, in sicer s prileganjem ravnin. Pri tem izhajamo iz predpostavke, da so stavbe sestavljene iz večjih ravnih površin, kar omogoča, da jih ločimo od naravnih objektov. Za ločevanje točk, ki opredeljujejo stavbe, in tistih, ki opredeljujejo vegetacijo, se pri oblaku točk ALS uporablja razlika med prvim in zadnjim odbojem laserskega žarka (Pfeifer et al., 2007; Sohn et al., 2008). Slednje v primeru fotogrametričnega oblaka točk ni mogoče, lahko pa za ločevanje teh dveh kategorij točk uporabimo radiometrične vrednosti točk oziroma različne vegetacijske indekse, ki jih izračunamo na podlagi barve točk v oblaku točk (Dai et al., 2017). Za ločevanje točk med točkami, ki opredeljujejo stavbe in vegetacijo, se lahko uporabijo tudi različni morfološki operatorji, ki omogočajo prepoznavanje značilnih vzorcev v oblaku točk (Mongus et al., 2014), ali algoritmi strojnega učenja, ki omogočajo nadzorovano klasifikacijo.

Pri nekaterih metodah za prepoznavanje stavb v oblaku točk najprej za celoten oblak točk izdelamo rastrsko podobo digitalnega modela površja (DMP) in rastrsko podobo digitalnega modela reliefa (DMR). Za izločitev točk, ki opredeljujejo teren, se izračuna normaliziran digitalni model površja (nDMP), ki pomeni razliko med DMP in DMR. Sledi prepoznavanje stavb in izločanje vegetacije z iskanjem značilnih oblik ali na podlagi drugih lastnosti med vsemi objekti nad terenom (Pfeifer et al., 2007; Grigillo in Kanjir, 2012).

Ko so točke, ki opisujejo stavbo, prepoznane, sledi modeliranje obodov stavbe. Če podatki o obodu stavbe niso na voljo ali niso zadostne točnosti, jih je treba ustvariti iz oblaka točk. Za generiranje 2D-poligona ali 2D-linijskega oboda stavbe se uporabljajo različni algoritmi, med drugim algoritem RANSAC (Jarzabek-Rychard, 2012), Houghova transformacija (Widyaningrum et al., 2019), algoritem konveksnih lupin (angl. *convex hull algorithm*) (Sampath in Shan, 2007), algoritem oblike alfa (angl. *alpha shape algorithm*) (dos Santos et al., 2019), ali kombinacija različnih algoritmov (Albers et al., 2016). Obsežen pregled metod za prepoznavanje stavb in generiranje obodov iz oblakov točk ALS so predstavili Tomljenović et al. (2015).

Za preučevanje vpliva metode prepoznavanja stavb iz oblaka točk na kakovost modeliranja stavbe je treba izvesti primerjavo rezultatov pri uporabi različnih metod na istem podatkovnem nizu. S tem izločimo vpliv kakovosti vhodnih podatkov in se osredotočimo le na vpliv uporabljene metode. Z

namenom analize kakovosti različnih metod nastajajo v okviru različnih strokovnih organizacij pobude, ki ponujajo prosto dostopne podatkovne nize, na katerih se izvajajo testi in primerjave rezultatov različnih metod ter algoritmov. Takih pobud je precej na področju računalništva, kar nekaj jih je tudi v fotogrametriji. Ena od takih je pobuda organizacije ISPRS za področje prepoznavanja in rekonstrukcijo stavb na osnovi oblaka točk (Rottensteiner et al., 2014).

4.3.2 Izdelava 3D-modela stavbe

Druga pomembna faza v procesu modeliranja stavbe je izdelava 3D-modela iz oblaka točk. Ko imamo v oblaku točk prepoznane točke, ki so klasificirane kot stavbe, ali so v oblaku točk določena območja, kjer so stavbe, sledi postopek 3D-rekonstrukcije oziroma 3D-modeliranja stavb. Na kakovost končnega modela vpliva izbira metode 3D-modeliranja in ciljne oblike. Metode tako imenovane 3D-rekonstrukcije stavb na osnovi prostorskih podatkov se med seboj razlikujejo glede na predhodne podatke o obliki stavbe, ki jo rekonstruiramo, kar vpliva na pristop izdelave 3D-modela. Prva skupina so metode, ki temeljijo na tako imenovanem modelnem pristopu (angl. *model-driven approach*), druga skupina pa so metode, ki uporabljajo podatkovni pristop (angl. *data-driven approach*) (Tarsha-Kurdi et al., 2007).

Modelni pristop

Metode z modelnim pristopom, imenujemo jih tudi parametrične metode, izhajajo iz prileganja predhodno določenih modelov, to je ploskev, v oblak točk. Metode imajo predhodno definirano knjižnico z naborom možnih modelov stavb, največkrat gre za standardne oblike streh, ki jih v postopku modeliranja primerjamo z geometrijo oblaka točk. Gre za problem določitve ustrezne oblike strehe obravnavane stavbe z eno od predhodno določenih standardnih oblik ali kombinacijo več oblik v primeru kompleksnejše stavbe. Za posamezno stavbo ali za vsak njen del, če je oblika kompleksnejša, se iz oblaka točk izračunajo parametri, ki opisujejo položaj, obliko, višino in orientacijo stavbe v prostoru. Sledi primerjava izračunanih parametrov s predhodno definiranimi modeli in iskanje oblike modela, ki se najbolj prilega vhodnim podatkom. Če ima stavba več delov, se vsi deli na koncu združijo v skupno, topološko urejeno celoto (Kada in McKinley, 2009). Modeliranje stavbe se pri tem izvede na podlagi prostorskih ali geomorfoloških parametrov, ki opisujejo obliko stavbe. Prva skupina parametrov opisuje obris stavbe na tleh ali obod strehe, kar podaja informacijo o lokaciji, orientaciji in velikosti stavbe v referenčnem koordinatnem sistemu v dveh razsežnostih. Druga skupina parametrov določa obliko stavbe v 3D-prostoru, ki ga ta zavzema (Tarsha-Kurdi et al., 2007). Maas in Vosselman (1999) sta 3D-model stavbe določila na podlagi parametrov, kot so dolžina, širina in višina stavbe ter njena orientacija v prostoru, ki sta jih pridobila iz oblaka točk. Huang et al. (2013) so razvili metodo, ki na podlagi statističnih parametrov točk v oblaku točk za vsak del strehe izbere eno od preprostih oblik, ki se nato

na podlagi izbranih pravil združijo v celoto. Zheng in Weng (2015) sta za modeliranje oblike strehe, ki so najbolje prilega predhodno določenim modelom, uporabila metodo odločitvenih dreves, medtem ko so Henn et al. (2013) to nalogo izvedli z metodo podpornih vektorjev.

Metode izdelave 3D-modelov stavb z modelnim pristopom so primerne, ko je oblak točk redek ali nepopoln. Dobra lastnost teh metod je dejstvo, da omogočajo topološko pravilno 3D-rekonstrukcijo modela kljub pomanjkanju podatkov. V splošnem te metode omogočajo relativno hiter način 3D-rekonstrukcije stavb, uspešne so predvsem na območjih, kjer imamo preprostejše oblike streh. Slabost metod z modelnim pristopom je, da omogočajo le rekonstrukcijo oblik, ki so predhodno predvidene (Dorninger in Pfeifer, 2008). Nabor možnih oblik 3D-modelov in način, kako se izvede prilaganje oblik v oblak točk in nato izbor najprimernejše oblike, so ključni dejavniki, ki vplivajo na kakovost 3D-modela pri uporabi metod z modelnim pristopom.

Podatkovni pristop

Druga skupina metod temelji na podatkovnem pristopu, kjer se 3D-modeliranje stavb izvaja neposredno iz oblaka točk. Z uporabo zahtevnih operacij segmentacije se oblak točk za vsako stavbo razdeli na posamezne dele oziroma segmente strehe ali fasade. Izdelava 3D-modela stavbe se izvede neposredno iz oblaka točk, s prileganjem osnovnih geometrijskih elementov na točke, ki določajo dele strehe ali fasade stavbe. Prileganje teh geometrijskih elementov, največkrat ravnin, za posamezne dele stavbe se izvede z uporabo naprednih algoritmov za prepoznavanje značilnih geometrijskih oblik v oblaku točk, kot so algoritem RANSAC (Tarsha-Kurdi et al., 2008), 3D-Houghova transformacija (Oude Elberink in Vosselman, 2009) in algoritem razširjanja območij (Rottensteiner, 2003). Po določitvi posameznih delov stavbe se nadalje uredijo topološki odnosi med njimi, kot so preseki in skoki med posameznimi deli strehe ali fasade. Ob upoštevanju geometrije posameznih delov stavbe in topologije med temi deli se z združevanjem izdela končen 3D-model stavbe. Rezultat modeliranja je 3D-model, ki se ne nanaša na neko predhodno določeno obliko, kar omogoča izdelavo tudi kompleksnejših oblik. Sohn et al. (2008) so predstavili metodo s podatkovnim pristopom, ki v oblaku točk ne išče ravnin, ampak določi značilne linije in točke, ki geometrijsko in topološko definirajo 3D-model. Metode s podatkovnim pristopom modeliranja stavb s prileganjem osnovnih oblik v oblak točk se uporabljajo tako za modeliranje streh kot fasad za pridobitev končnega 3D-modela stavb (Wen et al., 2019).

Metode, pri katerih se uporablja podatkovni pristop, običajno omogočajo izdelavo poljubnih oblik modelov stavb, ki jih ni treba predhodno predvideti, kot to velja pri modelnem pristopu (Rottensteiner, 2003). Te metode so primerne, ko imamo na voljo oblak točk z relativno visoko gostoto točk, ki podrobno opredeljujejo geometrijo vseh delov stavb, ki jih želimo modelirati. Zaradi razvoja tehnologije je v današnjih dneh gostota oblakov točk že pri uporabi sodobnih ALS-oblakov točk precej visoka, pri

uporabi UAV-tehnologije pa lahko dobimo zelo gost fotogrametrični oblak točk, zato se te metode pogosto uporabljajo za rekonstrukcijo stavb v LOD2 ali celo LOD3 (Malihi et al., 2018; Wen et al., 2019). Slabost teh metod je, da so zelo odvisne od točnosti samega oblaka točk, saj napake v oblaku neposredno vplivajo na določitev značilnih ravnin 3D-modela. Izdelani modeli so lahko hitro podvrženimi topološkim nepravilnostim, ki nastanejo kot posledica prileganja ravnin v nepopoln ali netočen oblak točk (Awrangjeb et al., 2013). Na kakovost 3D-modela zelo vpliva segmentacija oblaka točk, saj se hitro lahko zgodi, da končen model ni skladen z dejanskim stanjem zaradi nad- ali podsegmentacije oblaka točk. Prav tako se točnost končnega modela zelo poslabša ali pa je model topološko nepravilen, če del stavbe ni prikazan v oblaku točk – na primer zaradi vegetacijske ovire pri fotogrametričnem oblaku točk, ko drevo prekrije del strehe. Metode s podatkovnim pristopom so praviloma tudi računsko zahtevnejše in zato težje uporabne za 3D-modeliranje večjih območij (Tarsha-Kurdi et al., 2007).

Kakovost 3D-modela stavbe je pri uporabi teh metod zelo odvisna od nastavitve parametrov obdelave, ki so običajno pogojeni z lastnostmi vhodnega oblaka točk (na primer gostoto, popolnostjo) in obliko objektov, ki jih želimo modelirati (na primer kompleksnostjo arhitekture). Za topološko pravilne 3D-modele je treba pogosto uporabiti postopke generalizacije, ki model nekoliko poenostavijo, kar vpliva tudi na končno kakovost 3D-modela. Težavam, ki nastanejo zaradi nepopolnosti oblaka točk, pa se lahko izognemo z dodatnimi postopki regularizacije v posameznih fazah modeliranja z upoštevanjem geometrijskih in topoloških pravil za izdelavo pravilnega 3D-modela. Če v postopek modeliranja vključimo dodatne prostorske podatke, kot so obrisi stavb ali dodaten oblak točk, lahko to prispeva k pravilnejši obliki modela. Na drugi strani pa postopki generalizacije in regularizacije toliko posplošijo model, da se lahko poslabša točnost njegove oblike in položaja glede na vhodne podatke. Na kakovost 3D-modela vpliva seveda tudi kakovost dodatnih podatkov, kot so obodi stavb, ki jih uporabimo v modeliranju. Če obodi niso položajno točni ali njihova popolnost ni ustrezna, se to odraža tudi na 3D-modelu. Slabost metod s podatkovnim pristopom je pogosto veliko število specifičnih pravil za rekonstrukcijo kompleksnejših modelov, ki zmanjšajo robustnost in uporabnost metod za različne tipe študijskih območij (Sohn et al., 2008).

Kombinirani pristopi

Poleg obeh opisanih skupin metod za 3D-modeliranje stavb poznamo tudi metode, ki izkoriščajo tako modelni kot podatkovni pristop rekonstrukcije stavb. Ena takih je metoda, ki jo predlagata Oude Elberink in Vosselman (2009). V prvem delu metoda izkorišča podatkovni pristop, kjer se oblak točk za vsako stavbo razdeli na posamezne dele stavbe glede na dele strehe. Za vsak del se poišče preprosta geometrijska oblika (ravnina), ki streho najbolje definira. Nato pa se na podlagi topoloških odnosov med ravninami izdelajo površine, ki opisujejo obliko strehe. Sledi uporaba načela modelnega pristopa, ko se

izdelane površine primerjajo s predhodno definiranimi ciljnimi oblikami, ki opisujejo možne oblike streh. Na podlagi najboljšega ujemanja med izdelanimi in ciljnimi geometrijskimi oblikami se streha stavbe modelira skladno s predhodno določenimi pravili v tako imenovanem ciljnem grafu in na podlagi dejanskih podatkov o položaju, orientaciji in obliki strehe iz oblaka točk.

Za 3D-modeliranje stavb so se poleg metod, ki temeljijo na rekonstrukciji s parametričnimi oblikami (modelni pristop), in metod, ki izhajajo iz segmentacije oblaka točk na posamezne dele (podatkovni pristop), razvile tudi metode, ki stavbe rekonstruirajo iz poenostavljene mreže nepravilnih trikotnikov – TIN, izdelane iz vhodnega oblaka točk. 3D-model v obliki nepravilne mreže trikotnikov lahko izdelamo relativno hitro, ob visoki gostoti oblaka točk je mogoče v njem prikazati številne podrobnosti, z dodajanjem tekstur pa omogoča zelo realističen prikaz 3D-modela stavb. Slabost takih modelov je njihova računska zahtevnost zaradi velikega števila podatkov in nezmožnost strukturiranja objektov, saj je težko razlikovati med posameznimi entitetami v modelu. Zahtevno strukturo podatkov rešujejo metode za poenostavljanje mreže nepravilnih trikotnikov, ki opisuje površje modela. Na podlagi predhodno določenih geometrijskih pravil in semantičnih predpostavk se lahko v mreži zmanjša število ploskev in s tem poenostavi celoten model (Wahl et al., 2008). To je uporabno pri vizualizaciji, predvsem v uporabniških rešitvah, ki podatke izrisujejo v realnem času. Slabost takih modelov je dejstvo, da površje modela opisuje množica ploskev, ki pa ne vsebujejo semantičnih atributov, kaj ploskev prikazuje (Xiong et al., 2014).

Nekatere metode ne glede na uporabljen pristop modeliranja stavb poleg vhodnih podatkov v obliki oblaka točk uporabijo tudi dodatne prostorske podatke, kot so obrisi stavb iz drugih prostorskih podatkovnih baz, na primer iz topografskih ali katastrskih baz (Brenner, 2000; Maas in Vosselman, 1999; Schwalbe et al., 2005; Kada in McKinley, 2009; Oude Elberink in Vosselman, 2009). Obrisi stavb olajšajo prepoznavanje stavb v oblaku točk, njihovo segmentacijo in pripomorejo k boljši kakovosti rekonstruiranega modela v smislu topološke pravilnosti končnega 3D-modela.

Podobno kot pri metodah za prepoznavanje stavb je bila na pobudo organizacije ISPRS narejena primerjava metod za 3D-rekonstrukcijo stavb z uporabo istih podatkovnih nizov, s čimer je mogoče objektivno primerjati uspešnost izbrane metode (Rottensteiner et al., 2014). Kot vhodni podatki so bili na voljo oblak točk ALS in klasični fotogrametrični letalski posnetki. Za rekonstrukcijo stavb je bil v metodah uporabljen bodisi le oblak točk ali le digitalni model površja, izdelan iz oblaka točk, bodisi samo letalske fotografije ali pa je bila uporabljena kombinacija oblaka točk in letalskih fotografij. Rezultat modeliranja je bil pri vseh metodah vektorski 3D-model stavb, ki ustreza stopnji podrobnosti LOD2 glede na definicijo standarda OGC CityGML. Primerjava med metodami je pokazala, da obravnavane metode omogočajo relativno pravilno rekonstrukcijo 3D-modelov stavb, medtem ko se popolnost rezultatov med izbranimi metodami precej razlikuje. V splošnem je bilo opazno, da so

največje težave pri prepoznavanju in rekonstrukciji majhnih detajlov na strehah. Prav tako je bilo opaziti, da tip arhitekture stavb na posameznem študijskem območju močno vpliva na kakovost izdelanih modelov z izbrano metodo.

4.4 Razprava glede dejavnikov, ki vplivajo na kakovost 3D-modeliranja stavb

Glede na predstavljene raziskave lahko vidimo, da imajo vhodni parametri pri zajemu prostorskih podatkov z daljinsko vodenim letalnikom velik vpliv na kakovost rezultatov v celotnem procesu izdelave 3D-modela stavbe. Kakovost vhodnih podatkov je ključna pri doseganju želene natančnosti, točnosti in zanesljivosti končnih rezultatov, saj vpliva na kakovost rezultatov vmesnih faz obdelave podatkov: tako obdelave fotografij kot nadalje 3D-modeliranja. Ker točnosti in natančnosti vhodnih podatkov praviloma ni mogoče izboljšati z nadaljnjimi postopki obdelave podatkov, moramo za dosego želene točnosti rezultatov ustrezno pozornost nameniti načrtovanju in izvedbi zajema prostorskih podatkov, kjer moramo doseči zahtevano kakovost.

Če se omejimo na zajem prostorskih podatkov z daljinsko vodenim letalnikom z nemerskim fotoaparatom in SfM-MVS fotogrametrijo s posrednim georeferenciranjem, je treba v fazi zajema podatkov za doseganje želene kakovosti rezultatov največjo pozornost nameniti trem ključnim sklopom dejavnikov, ki jih povzemamo v nadaljevanju besedila. Rezultate dela raziskave, v kateri smo podrobno analizirali dejavnike, ki vplivajo na kakovost podatkov v fazi zajema, smo predstavili tudi v objavi Kosmatin Fras et al. (2020).

Prvi sklop so dejavniki, ki opredeljujejo prostorsko ločljivost in radiometrično kakovost zajetih fotografij ter kakovost izvedbe kalibracije. Kalibracija je izredno pomembna, ker vpliva na kakovost nadaljnje obdelave in določitve 3D-geometrije obravnavanega območja, saj se z njo med drugim določijo sistematične napake, ki jih upoštevamo pri nadaljnjem delu. Pri izbiri fotoaparata se raje odločamo za fotoaparate s fiksno goriščno razdaljo, nastavitvijo fokusa v neskončnost in nizko vrednostjo občutljivosti senzorja (ISO). Za snemanje ravninskih območij izberemo fotoaparat s krajšo goriščno razdaljo, medtem ko je za razgibane terene in mestna območja primerneje uporabiti fotoaparat z daljšo goriščno razdaljo, s čimer se izognemo prevelikim razlikam v prostorski ločljivosti na eni fotografiji. Kljub vsemu se izogibamo uporabi fotoaparata z močno širokokotnim objektivom. Prostorsko ločljivost izberemo glede na zahtevano točnost rezultatov, pri čemer je treba poznati geometrijske lastnosti senzorja in skladno z njimi določiti višino leta letalnika za dosego želene ločljivosti posnetkov. Zaradi nestabilnosti merske opreme in visoke korelacije med parametri notranje ter zunanje orientacije je smiselno v okviru postopka grajenja strukture iz gibanja izvesti tudi samokalibracijo, ki omogoča ustrezno upoštevanje modeliranih sistematičnih vplivov notranje geometrije fotoaparata na zajete fotografije.

Drugi sklop dejavnikov vpliva na kakovost podatkov, pridobljenih z daljinsko vodenimi letalniki, so parametri leta, predvsem prekrivanje fotografij in geometrija bloka fotografij, ki vplivajo tako na položajno točnost kot tudi popolnost in gostoto izdelanega oblaka točk. Za dosego kakovostnih rezultatov je treba zagotoviti zadostno prekrivanje v vzdolžni in prečni smeri glede na smer leta. Iz predstavljenih raziskav lahko sklepamo, da je prekrivanje vsaj 80 % v vzdolžni in 60–70 % v prečni smeri optimalno razmerje med doseženo točnostjo rezultatov ter terenskim delom, ki je potrebno za izvedbo meritev s tolikšnim prekrivanjem fotografij. Če povečamo prekrivanje v obeh smereh, je mogoče doseči natančnejše in točnejše rezultate, vendar to zahteva več časa in vloženega dela tako pri zajemu kot obdelavi podatkov. Na kakovost rezultatov vpliva nadalje geometrija bloka fotografij. Rezultati raziskav kažejo, da je mogoče doseči boljšo kakovost končnih rezultatov pri uporabi SfM-MVS fotogrametrije, če v postopek poleg nadirnih fotografij vključimo tudi poševne fotografije. Z razgibano geometrijo bloka fotografij se namreč zmanjša učinek kupole, ki lahko nastane ob neustrezno modeliranih elementih notranje orientacije fotoaparata. Poleg točnosti omogoča konvergentna geometrija bloka fotografij višjo zanesljivost končnih rezultatov. Če pri posameznem snemanju z letalnikom v projekt ni mogoče dodati poševnih fotografij, je smiselno več pozornosti nameniti izmeri oslonilnih točk. Zadostno število in ustrezna razporeditev oslonilnih točk omogočata kakovostno georeferenciranje oblaka v izbran prostorski referenčni koordinatni sistem, s tem pa hkrati zmanjšamo vpliv sistematičnih pogreškov zaradi napačno modeliranih parametrov notranje orientacije.

Posredno georeferenciranje z uporabo oslonilnih točk, predvsem njihovo število, razporeditev, ustrezna označitev in natančnost izmere, je tretji sklop dejavnikov, ki ključno vplivajo na kakovost pri zajemu podatkov z daljinsko vodenimi letalnikom. Za dosego kakovostnih rezultatov je treba zagotoviti oslonilne točke tako na robu območja, s čimer bo dosežena ustrezna položajna točnost oblaka, kot na sredini snemalnega območja, kar bo pripomoglo k ustrezni višinski točnosti rezultatov. Prav tako je pomembno, da so točke enakomerno in dovolj gosto razporejene po območju, s čimer dosežemo homogeno točnost oblaka točk. Zelo pomembno je, da oslonilne točke izmerimo z ustrezno metodo in s tem zagotovimo ustrezno točnost in natančnost izmerjenih koordinat oslonilnih točk in posledično tudi končnih rezultatov.

V fazi obdelave fotografij in nadaljnje obdelave oblaka točk so dejavniki, ki vplivajo na kakovost rezultatov, predvsem kakovost vhodnih podatkov, tip in lastnosti snemalnega območja ali objekta ter parametri obdelave. Kakovost vhodnih podatkov vključuje tako geometrično in radiometrično kakovost fotografij kot dejavnike zajema fotografij, kot so geometrija mreže, prekrivanje med fotografijami in zunanji pogoji med snemanjem. Tip snemalnega območja ali vrsta objekta, ki ga hočemo zajeti, določa način izvedbe zajema posnetkov, da bo kasnejša obdelava fotografij uspešna. Lastnosti snemalnega območja ali objekta, ki vplivajo na kakovost obdelave fotografije za pridobitev fotogrametričnega oblaka točk, so enolična tekstura in ponavljajoči se vzorci, prisotnost senc in zastrtih območij, morebitna

prisotnost premikajočih se objektov. Vse našteto negativno vpliva na kakovost obdelave fotografij, zato se poskušamo tem okoliščinam izogniti, če je to mogoče. Pogosto se pri snemanju v realnih razmerah tem okoliščinam ne moremo popolnoma izogniti, zato poskušamo vsaj zmanjšati njihov vpliv. To storimo z načinom snemanja, kot je povečanje prekrivanja med fotografijami, vključitev dodatnih konvergentnih smeri snemanja ali dodajanje večjega števila oslonilnih točk. Na kakovost rezultatov obdelave fotografij vplivajo tudi parametri obdelave, ki vključuje algoritme grajenja strukture iz gibanja in algoritme gostega slikovnega ujemanja.

V fazi modeliranja je treba za zagotavljanje ustrezne kakovosti 3D-modela pozornost nameniti naslednjim dejavnikom: kakovosti vhodnih podatkov, izbiri stopnje podrobnosti modela in izbiri metode modeliranja stavb. Kakovost vhodnih podatkov je ključni dejavnik, saj določa začetno kakovost, iz katere izhajamo pri oceni kakovosti vmesnih rezultatov modeliranja in na kateri temelji kakovost končnega modela. Stopnja podrobnosti modela določa stopnjo geometrijske in semantične podrobnosti modela. Izbira stopnje podrobnosti določa, koliko bo izdelan model skladen z entiteto iz realnega sveta. Ključen vpliv na kakovost 3D-modela stavbe v fazi modeliranja ima tudi izbira metode modeliranja. V splošnem se metode 3D-modeliranja stavb iz oblakov točk delijo na metode, ki uporabljajo modelni pristop, in metode, ki temeljijo na podatkovnem pristopu. Metode z modelnim pristopom imajo predhodno definirane oblike stavb oziroma streh, zato je z njimi lažje izdelati geometrijsko in topološko pravilne modele. Uporabne so pri redkejših oblakih točk, hkrati pa so tudi običajno manj občutljive za morebitne manjkajoče ali grobo pogrešene točke v oblaku točk, ki opisujejo stavbo ali njen del, če le odstopanje od prave vrednosti ni preveliko. Metode so običajno računsko manj zahtevne in primernejše za uporabo, ko modeliramo stavbe na večjih območjih. Glavna pomanjkljivost teh metod je, da je treba pred modeliranjem predvideti možne oblike stavb oziroma streh, zato zahtevajo nekaj predznanja o možnih oblikah stavb na obravnavanem območju. Pri drugi skupini metod za modeliranje stavb iz oblaka točk se uporablja podatkovni pristop, kjer se rekonstrukcija modela izvede neposredno iz oblaka točk, s prileganjem preprostih geometrijskih elementov v posamezne dele oblaka točk. Z določevanjem medsebojnih odnosov med posameznimi segmenti se izdela končni 3D-model stavbe. Ključen korak pri uporabi teh metod je segmentacija oblaka točk stavbe na posamezne dele. Metode s podatkovnim pristopom so primerne tudi za rekonstrukcijo stavb s kompleksnejšo obliko, saj ni treba predhodno predvideti oblike stavbe. Zaradi neposrednega prileganja manjših geometrijskih elementov v oblak točk za posamezne dele stavbe so običajno 3D-modeli ob uporabi teh metod zelo približajo dejanski obliki stavbe. Slednje je lahko tudi pomanjkljivost teh metod, saj je ob morebitnih napakah v podatkih ali manjkajočih delih oblaka točk končen rezultat nepopoln ali geometrijsko in topološko nepravilen. Z generalizacijo in regularizacijo sicer lahko deloma ali v celoti odpravimo te napake, vendar s tem pridobimo morda preveč posplošen model. Dodatna omejitev teh metod je močna odvisnost od nastavitev parametrov obdelave v postopku segmentacije in iskanja prilegajočih se oblik v oblaku točk, zaradi česar so metode manj robustne za uporabo v različnih okoljih in na večjih območjih. Kljub

razvoju različnih metod za delno ali v celoti samodejno 3D-modeliranje stavb na osnovi oblakov točk ostaja tematika še vedno aktualna, predvsem v smislu, kako z izbranim postopkom modeliranja pridobimo geometrijsko in topološko pravilen 3D-model stavb ali drugih entitet v prostoru (Rottensteiner et al., 2014).

Na podlagi podrobnega pregleda dosedanjih znanstvenih objav smo identificirali ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v postopku 3D-modeliranja stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk, od začetnega zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom do izdelave georeferenciranega topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavbe z ravnjo podrobnosti LOD2 glede na določila standarda OGC CityGML. S tem lahko potrdimo prvo zastavljeno hipotezo, ki pravi, da *je mogoče identificirati ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah opisanega postopka 3D-modeliranja stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk*. Pri tem poudarjamo, da so bili dejavniki identificirani glede na predlagani postopek 3D-modeliranja. Ob spremembi postopka je treba dejavnike ustrezno opredeliti glede na uporabljeni postopek 3D-modeliranja stavb.

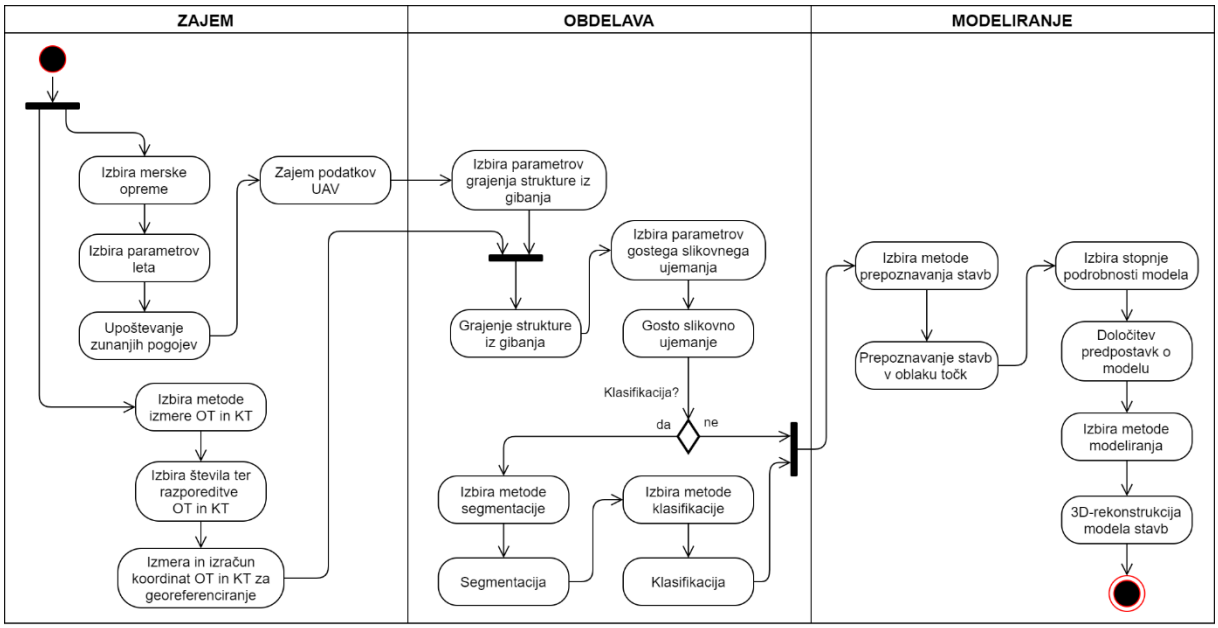
»Ta stran je namenoma prazna«

5 KONCEPTUALNI MODEL ZA SPREMLJANJE KAKOVOSTI

V tem poglavju predstavljamo konceptualni model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb na osnovi fotogrametričnega oblaka točk. Konceptualni model temelji na procesnem modelu, ki vključuje vse faze od začetnega zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom do končnega topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavbe, ki je skladen s standardom OGC CityGML. Najprej je opisan celoten procesni model in na tem temelječ splošni konceptualni model za spremljanje kakovosti. Sledi podrobnejša predstavitev modela po posameznih fazah procesa od zajema podatkov do izdelave 3D-modela, kjer so poudarjene ključne točke za zagotavljanje in kontrolo kakovosti vmesnih rezultatov.

5.1 Procesni model in zasnova modela za spremljanje kakovosti

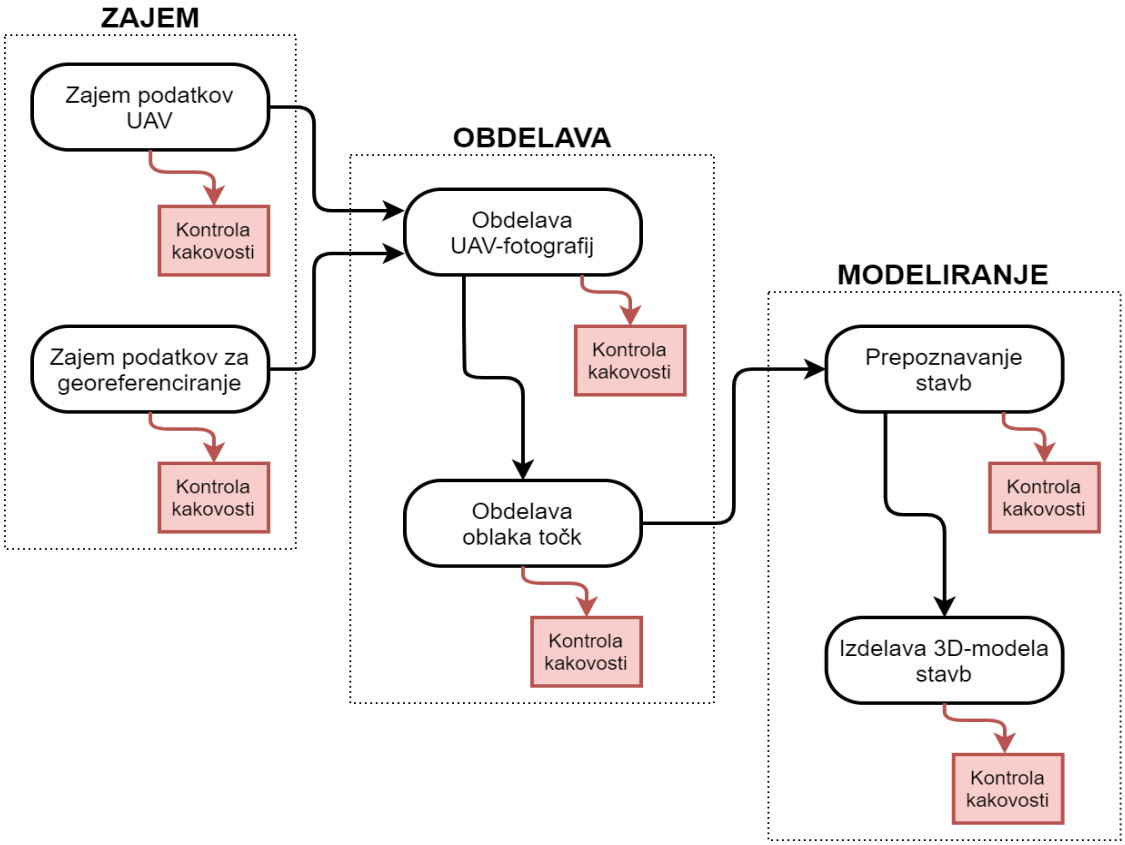
Na podlagi analize postopkov, ki jih izvedemo v procesu 3D-modeliranja stavb iz prostorskih podatkov, zajetih z daljinsko vodenimi letalniki, in identifikacije dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posamezni fazi 3D-modeliranja, smo izdelali procesni model. V sklopu procesnega modela smo definirali zasnovo za spremljanje in zagotavljanje kakovosti podatkov v obravnavanem procesu. Slika 21 prikazuje razvit procesni model, ponazorjen v obliki diagrama aktivnosti UML.



Slika 21: Procesni model 3D-modeliranja stavb na osnovi UAV-fotogrametričnega oblaka točk, prikazan v obliki UML-diagrama aktivnosti.

Figure 21: The process model of 3D building modelling based on the UAV-photogrammetric point cloud presented by the UML activity diagram.

Procesni model je razdeljen na tri dele, ki so tri glavne faze v procesu modeliranja: zajem podatkov, obdelava podatkov in 3D-modeliranje. V procesnem modelu, ki je prikazan z UML-diagramom aktivnosti, si koraki sledijo v sosledju glede na proces od priprave na zajem podatkov do končne izdelave 3D-modela. Za zagotavljanje kakovosti končnega rezultata je treba izvesti spremljanje kakovosti vmesnih rezultatov teh faz, kot to poenostavljeno ponazarja shema modela za zagotavljanje kakovosti (slika 22).



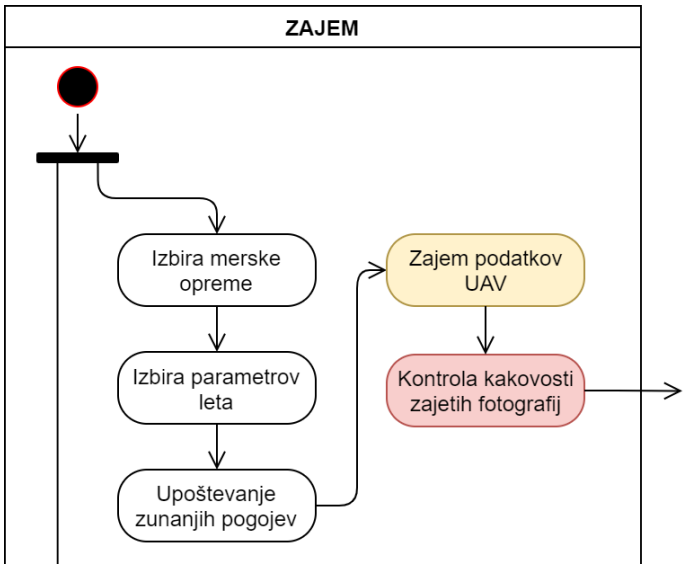
Slika 22: Posplošena shema konceptualnega modela za zagotavljanje kakovosti pri 3D-modeliranju stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk.

Figure 22: The generalised schema of the conceptual model for ensuring data quality in 3D building modelling based on the UAV photogrammetric point cloud.

V nadaljevanju bomo podrobno opisali posamezno fazo procesnega modela za 3D-modeliranje stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk, iz katere izhaja predlagana zasnova modela za spremljanje kakovosti. V nadaljnjih podrobnih diagramih UML so aktivnosti procesnega modela, ki določajo ključne korake pri 3D-modeliranju stavb, označene rumeno. Aktivnosti, povezane s ključnimi dejavniki, ki vplivajo na kakovost podatkov, so označene belo. Koraki v procesu, ki so opredeljeni kot aktivnosti za spremljanje kakovosti, pa so označeni rdeče in so določeni na podlagi že predstavljenega študija virov in literature s področja obravnave.

5.1.1 Faza zajema podatkov

Prvi del procesnega modela je faza zajema podatkov, ki vključuje dve ločeni zaporedji aktivnosti, in sicer zajem podatkov z daljinsko vodenim letalnikom ter izmero koordinat oslonilnih točk za georeferenciranje. Pri zajemu podatkov z daljinsko vodenim letalnikom (slika 23) je treba pred izvedbo snemanja na izbranem snemalnem območju pozornost nameniti pripravi na snemanje, kar zahteva upoštevanje ključnih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v tem delu procesa. To natančneje pomeni izbiro ustrezne merske opreme, izbiro parametrov leta letalnika in upoštevanje zunanjih pogojev, v katerih bomo izvajali zajem.



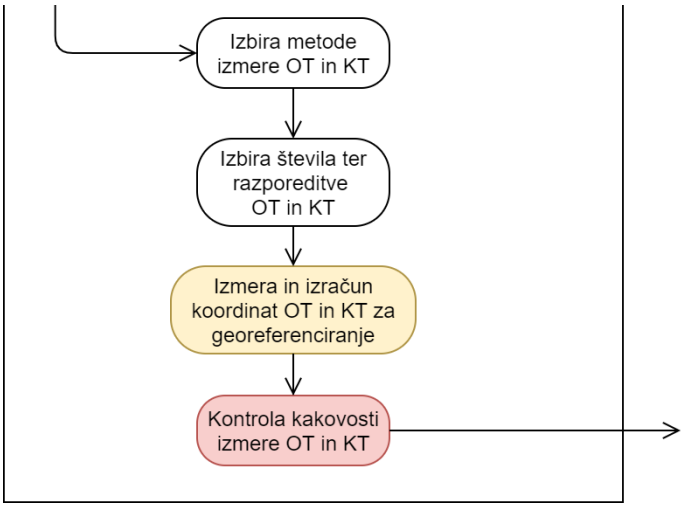
Slika 23: Del procesnega modela, ki vključuje zajem podatkov z uporabo letalnika (UAV), s predlogom za nadzor kakovosti.

Figure 23: Part of the process model containing data acquisition using a UAV with the quality control proposal.

Rezultat zajema podatkov so digitalne fotografije, ki jih bomo uporabili v nadaljnji obdelavi. Po zajemu podatkov je treba izvesti kontrolo kakovosti zajetih fotografij, s katero preverimo, ali so fotografije geometrično in radiometrično ustrezne za nadaljnjo uporabo. Geometrična kakovost fotografij vpliva na rezultate nadaljnjih obdelav, saj med drugim določa prostorsko ločljivost posnetkov in posledično omejitev, kakšne podrobnosti bomo lahko zaznali na posnetkih in jih obravnavali v nadaljnjih postopkih. V primeru neustrezne geometrične kakovosti (na primer premajhne prostorske ločljivosti) je treba praviloma ponoviti postopek zajema fotografij s kakovostnejšo mersko opremo ali uporabiti ustreznejše parametre leta. Pri radiometrični kakovosti se lahko zgodi, da so fotografije preosvetljene ali neostre, kar negativno vpliva na rezultate obdelave z algoritmi za slikovno ujemanje. Radiometrično kakovost fotografij lahko preverimo z vizualnim pregledom ali preko izbranega kvantitativnega kazalnika za oceno radiometrične kakovosti fotografij. V primeru zgolj vizualnega pregleda lahko v koraku kontrole fotografij slabše posnetke odstranimo iz nadaljnje obdelave, vendar moramo pri tem paziti, da ohranimo

zadostno prekrivanje med posnetki. Če pa izračunamo vrednosti kazalnikov radiometrične kakovosti fotografij, lahko numerično identificiramo manj kakovostne fotografije in to upoštevamo v modelih za radiometrično korekcijo fotografij. Prva možnost je odvisna od subjektivne presoje operaterja, vendar lažja za implementacijo. V drugem primeru dobimo sicer objektivno oceno, vendar se s tem podaljša čas in poveča zahtevnost obdelave.

Drugi del prve faze se nanaša na izmero položajev oslonilnih točk, ki jih uporabimo za posredno georeferenciranje oblaka točk (slika 24). Glavna aktivnost v tem delu je zajem podatkov za georeferenciranje fotografij in oblaka točk, kjer praviloma s terestričnimi geodetskimi opazovanji pridobimo podatke za izračun koordinat oslonilnih točk (OT) in kontrolnih točk (KT) v izbranem prostorskem koordinatnem sistemu. Kot ključna dejavnika vpliva na kakovost v tem koraku smo identificirali izbiro metode izmere ter število in razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na izbranem snemalnem območju. Kontrolo kakovosti v tem delu izvedemo s kontrolo položajne kakovosti koordinat oslonilnih in kontrolnih točk. Ker običajno izmero točk izvedemo z eno od uveljavljenih geodetskih metod, na primer s klasično terestrično geodetsko izmero, GNSS-izmero itd., se kontrola izmere izvede na podlagi priporočil kontrole izmere glede na uporabljeno metodo. Običajno metode predvidevajo izvedbo nadštevilnih meritev in naknadno analizo geodetskih opazovanj z namenom odkrivanja ter odpravljanja grobih in sistematičnih pogreškov.



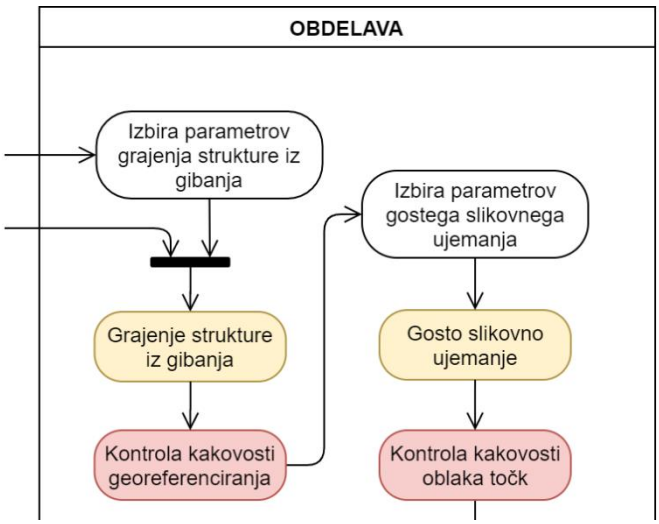
Slika 24: Del procesnega modela, ki obsega izmero podatkov za georeferenciranje, s predlogom za nadzor kakovosti.

Figure 24: Part of the process model containing data acquisition for georeferencing with the quality control proposal.

5.1.2 Faza obdelave podatkov

Fazo obdelave zajetih podatkov lahko razdelimo na dva dela. Prvi del so postopki za pridobitev fotogrametričnega oblaka točk (slika 25), kjer so vhodni podatki UAV-fotografije in podatki za

georeferenciranje oblaka točk. V tem koraku se izvede grajenje strukture iz gibanja (SfM) in gosto slikovno ujemanje (DIM-MVS). Na kakovost obdelave poleg kakovosti vhodnih podatkov vpliva izbira parametrov obeh algoritmov. Nadzor kakovosti izvedemo po izgradnji strukture iz gibanja, ko analiziramo izdelan redek oblak točk z vidika točnosti georeferenciranja. Če oblak točk georeferenciramo preko koordinat oslonilnih točk, kot je predlagano v našem postopku, se nadzor kakovosti georeferenciranja izvede preko izračuna položajne točnosti na kontrolnih točkah, to je razlik modelnih koordinat od neodvisno s terensko izmero določenih koordinat. Najpogosteje je mera za točnost položajev kontrolnih točk koren srednjega kvadrata pogreška (*RMSE*), ki pove, koliko koordinate na terenu neodvisno izmerjenih kontrolnih točk odstopajo od koordinat teh točk, določenih iz georeferenciranega oblaka točk. Po izvedbi gostega slikovnega ujemanja preverimo kakovost gostega oblaka točk, pri čemer se položaj gostega oblaka točk ne razlikuje od redkega, zato v tem koraku položajne točnosti na kontrolnih točnih ni treba ponovno preverjati. Smiselno pa je preveriti popolnost izdelanega oblaka točk.

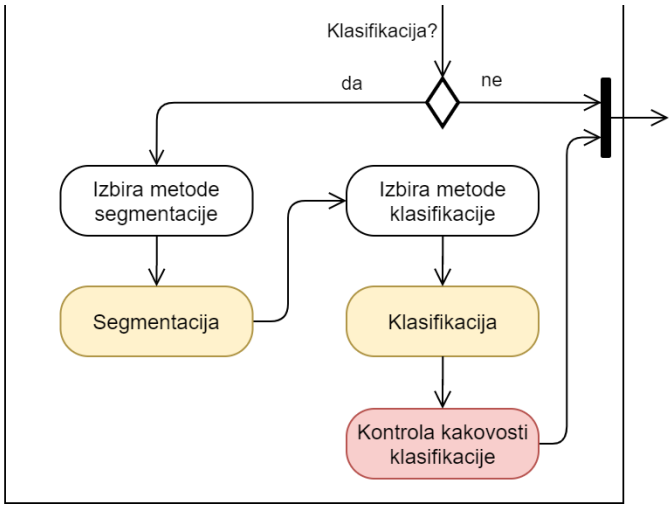


Slika 25: Del procesnega modela, ki vključuje obdelavo podatkov z algoritmi strukture iz gibanja in gostega slikovnega ujemanja, s predlogom za nadzor kakovosti.

Figure 25: Part of the process model containing data processing using structure from motion and dense image matching algorithms with the quality control proposal.

Izdelavi gostega oblaka točk sledi obdelava oblaka točk z namenom priprave podatkov za modeliranje stavb. Če metoda modeliranja stavb ne zahteva klasificiranega oblaka točk, lahko korak segmentacije in klasifikacije izpustimo ter modeliranje izvedemo neposredno na nestrukturiranem oblaku točk. Če kasnejše modeliranje predvideva klasificiran oblak točk, je treba izvesti korake segmentacije in klasifikacije gostega oblaka točk (slika 26). Shema prikazuje splošen postopek izvedbe obeh korakov, tako segmentacije kot klasifikacije, vendar je mogoče v obravnavanem procesu izvesti tudi le enega izmed obeh. Pri nekaterih metodah klasifikacije namreč ni treba izvesti predhodne segmentacije, hkrati pa pri nekaterih metodah modeliranja stavb oblaka točk ni treba klasificirati, temveč le segmentirati, kar

pa lahko izvedemo tudi v okviru kasnejšega prepoznavanja stavb v oblaku točk. O izvedbi obeh korakov ali le enega izmed njiju se odločamo glede na izbiro metode in postopka 3D-modeliranja stavb. Na točnost segmentacije in klasifikacije oblaka točk vpliva izbira metode ter nastavitev parametrov v izbrani metodi segmentacije ali metodi klasifikacije. Kakovost izvedenih korakov nadziramo s kontrolo segmentacije in klasifikacije, bodisi z vizualnim pregledom pravilnosti rezultatov bodisi z izračunom tematske točnosti in popolnosti klasifikacije na podlagi primerjave z referenčnimi podatki, ki določajo pravo vrednost. Kakovost klasifikacije je opredeljena z odstopanjem od prave vrednosti.

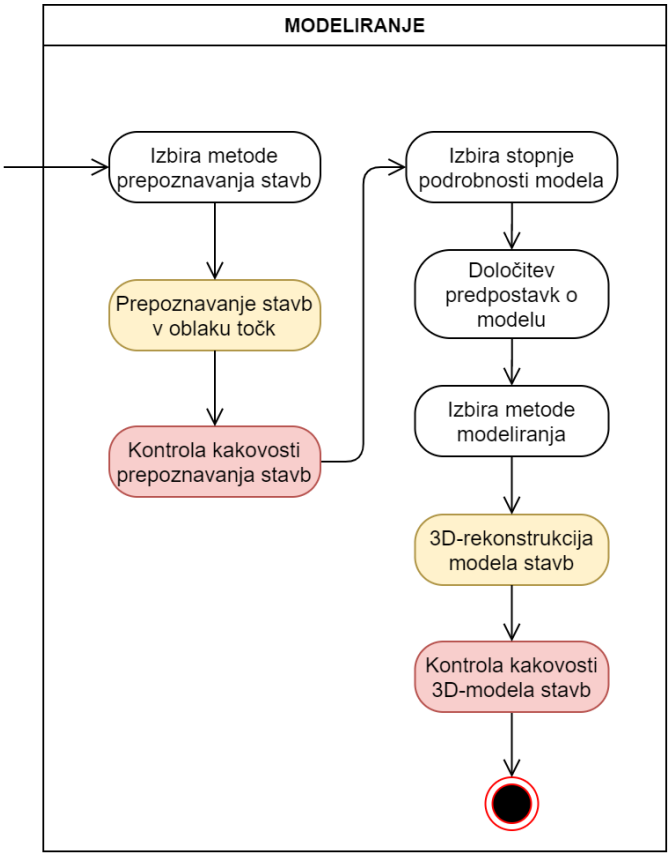


Slika 26: Del procesnega modela, ki vključuje segmentacijo in klasifikacijo oblaka točk, s predlogom za nadzor kakovosti.

Figure 26: Part of the process model containing point cloud segmentation and classification the quality control proposal.

5.1.3 Faza 3D-modeliranja

Zadnja faza procesa obsega 3D-modeliranje stavb iz fotogrametričnega oblaka točk (slika 27). V prvem delu te faze najprej izvedemo prepoznavanje stavb, v katerem je predvidena identifikacija tistih točk, ki v oblaku točk opisujejo stavbe. Na podlagi prepoznanih točk za vsako posamezno stavbo določimo njen položaj in orientacijo v prostoru, na primer z določitvijo oboda ali obrisa stavbe. Način, kako se to izvede, je odvisen od vhodnih podatkov in izbire metode za prepoznavanje stavb, kar oboje vpliva na kakovost prepoznanih stavb. Pri spremljanju kakovosti je treba izvesti kontrolo prepoznanih stavb, v kateri lahko ugotavljamo tako popolnost prepoznanih stavb, njihovo geometrijsko in topološko pravilnost kot tudi položajno točnost, če so referenčni položaji stavb znani.



Slika 27: Del procesnega modela, ki vključuje prepoznavanje stavbe in rekonstrukcijo 3D-modela, s predlogom za nadzor kakovosti.

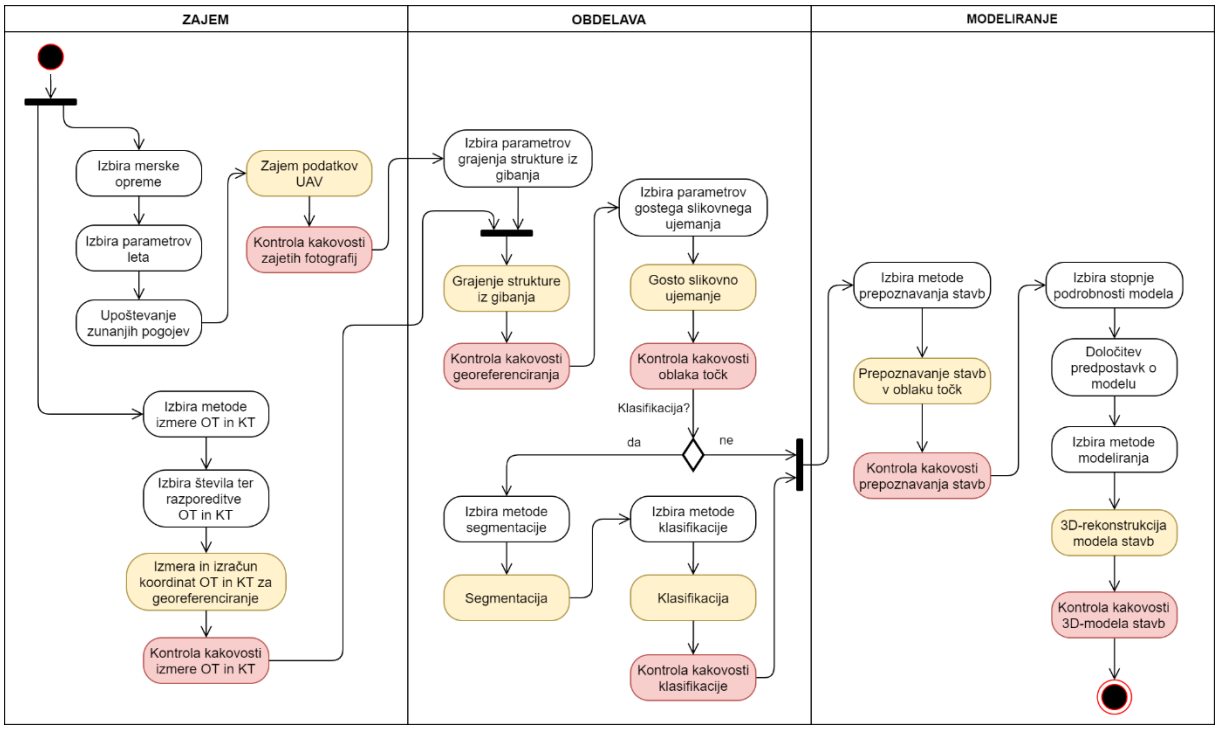
Figure 27: Part of the process model containing building detection and 3D model reconstruction with the quality control proposal.

V drugem delu faze modeliranja izdelamo 3D-model stavbe (slika 27). V tem delu procesa vplivajo na kakovost rezultatov poleg kakovosti vhodnih podatkov tudi izbira stopnje podrobnosti modela, predpostavke o želenem končnem modelu in izbira metode modeliranja, kar vključuje tudi izbiro vrednosti parametrov za modeliranje. Izdelavi 3D-modela stavbe sledi preverjanje kakovosti izdelanega modela, pri čemer analiziramo položajno točnost modela, njegovo popolnost in logično usklajenost, predvsem topološko pravilnost modela. Položajno točnost in popolnost modela lahko analiziramo s primerjalno analizo modela z vhodnim oblakom točk ali referenčnim modelom, ki smo ga izdelali na podlagi neodvisno pridobljenih prostorskih podatkov. Rezultat primerjave modela z vhodnim oblakom točk pove, kolikšna je notranja oziroma relativna položajna točnost in popolnost modela, kar omogoča nadzor kakovosti celotnega procesa obdelave podatkov in modeliranja. Rezultati primerjave modela z modelom, določenim na temelju neodvisno izmerjenih podatkov, podajo oceno zunanje oziroma absolutne položajne točnosti modela, pri čemer ocena kakovosti modela ni odvisna le od uporabljenih metod modeliranja, temveč tudi od kakovosti vhodnega oblaka točk – tako položajne točnosti kot tudi popolnosti. Pri tem ni nujno, da uporabimo celoten model, ampak lahko za neodvisno pridobljene podatke obravnavamo tudi položaje posameznih karakterističnih točk stavbe, ki zadostno opisujejo obliko in položaj stavbe. Za ustrezno oceno absolutne kakovosti modela morajo biti prostorski podatki,

na podlagi katerih ocenjujemo model, boljše kakovosti, kar omogoča zanesljivo oceno kakovosti izdelanega modela.

5.2 Podroben model za spremljanje kakovosti

Na podlagi podrobnega procesnega modela (slika 21) in konceptualnega modela (slika 22), ki sta sestavljena iz treh faz obdelave podatkov in modeliranja, smo v predhodnih poglavjih identificirali ključne dejavnosti, katerih rezultati so pomembni za zagotavljanje kakovosti končnega izdelka, to je 3D-modela stavbe. Kot že navedeno, so v procesnem modelu prikazane aktivnosti, opredeljene glede na ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost v posamezni fazi procesa (označeno rumeno). Za spremljanje kakovosti smo dodali aktivnosti, ki določajo postopke za nadzor kakovosti podatkov (označeno rdeče). Te omogočajo spremljanje in posledično zagotavljanje kakovosti podatkov v posamezni fazi procesa, kar je celovito predstavljeno v celotnem UML-diagramu aktivnosti za spremljanje in zagotavljanje kakovosti v predlaganem procesu (slika 28).



Slika 28: Celoten UML-diagram aktivnosti za proces 3D-modeliranja stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk s predlaganimi koraki za spremljanje kakovosti.

Figure 28: The complete UML activity diagram for the process of 3D building modelling based on UAV photogrammetric point cloud with the suggested steps for data quality monitoring.

Slika 28 prikazuje aktivnosti, ki jih izvedemo tako za 3D-modeliranje stavb na osnovi UAV-fotogrametričnega oblaka točk, kot tudi aktivnosti za spremljanje in zagotavljanje kakovosti v posameznih fazah procesa. Posamezne faze procesa so sicer zaključene celote, vendar so zaradi

zaporednosti med seboj povezane oziroma medsebojno odvisne. V obravnavanem procesu je težko izolirati zgolj vpliv kakovosti izvedbe posamezne faze postopka na kakovost končnega rezultata, zato je bistveno, da kakovost spremljamo med celotnim procesom, ne le na ravni končnega izdelka. Prav zato je nadzor kakovosti v ključnih fazah procesa pomemben, saj kakovost vsake posamezne faze vpliva na kakovost končnega 3D-modela.

Lastnosti prostorskih podatkov in značilnosti korakov, ki jih v posamezni fazi procesa izvedemo, določajo, katere vidike kakovosti moramo v določeni fazi analizirati. Standard SIST EN ISO 19157:2015 (SIST, 2015) za kakovost prostorskih podatkov podaja šest elementov kakovosti, vendar v vsaki fazi ne analiziramo vseh elementov, ampak le tiste, ki so v njej smiselni (preglednica 3). V trenutnem predlaganem procesu spremljanja kakovosti smo namenoma izpustili elementa časovne kakovosti in uporabnosti podatkov, ki sta lahko za uporabnika prav tako pomembna in ju lahko dodatno upošteva v procesu spremljanja kakovosti. Skladno z izbiro elementa kakovosti se izbere ustrezna mera, s katero ocenjujemo izbrani element kakovosti. Glede na zahteve uporabnika se nato določi zahtevana stopnja kakovosti, ki ji mora ustrezati ocena kakovosti, da bodo prostorski podatki v posamezni fazi postopka ustrezne kakovosti.

Preglednica 3: Elementi kakovosti prostorskih podatkov, ki jih analiziramo v posameznih fazah predlaganega modela za zagotavljanje kakovosti pri 3D-modeliranju stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk.

Table 3: Spatial data quality elements, which are analysed in the specific phases of the proposed model for ensuring quality in the 3D building modelling based on the UAV photogrammetric point cloud.

VRSTA KONTROLE	**ELEMENTI KAKOVOSTI (SIST EN ISO 19157:2015)**					
	Popolnost	**Logična skladnost**	**Položajna točnost**	**Tematska točnost**	**Časovna kakovost**	**Uporabnost**
Kontrola zajetih fotografij	✓				-	-
Kontrola izmere oslonilnih in kontrolnih točk			✓		-	-
Kontrola georeferenciranja			✓		-	-
Kontrola gostega oblaka točk	✓				-	-
Kontrola klasifikacije	✓			✓	-	-
Kontrola prepoznavanja stavb	✓	✓	✓	✓	-	-
Kontrola rekonstrukcije stavb	✓	✓	✓	✓	-	-

Če podrobneje pogledamo posamezne aktivnosti za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov, kot so prikazane v preglednici 3, lahko vidimo, katerim elementom kakovosti je treba nameniti največ pozornosti pri spremljanju kakovosti v posamezni fazi procesa 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk. V fazi zajema spremljamo kakovost zajetih fotografij, kjer nas zanima predvsem popolnost zajetih podatkov na fotografijah. Po izmeri položajev oslonilnih in kontrolnih točk

preverimo kakovost izvedene izmere z vidika položajne točnosti opravljenih meritev. V fazi obdelave fotografij najprej s postopkom grajenja strukture iz gibanja izvedemo georeferenciranje oblaka točk v izbran referenčni koordinatni sistem. V tem koraku moramo pri spremljanju kakovosti podatkov pozornost nameniti položajni točnosti izvedenega georeferenciranja. V drugem delu obdelave fotografij uporabimo algoritme gostega slikovnega ujemanja, kakovost izvedbe tega koraka pa preverimo z analizo popolnosti izdelanega gostega fotogrametričnega oblaka točk. Če v nadaljevanju izvedemo postopek klasifikacije oblaka točk, je treba preveriti še kakovost klasifikacije z vidika popolnosti in tematske pravilnosti. Sledi prepoznavanje stavb iz oblaka točk. Po izvedbi tega koraka preverimo popolnost in logično skladnost v smislu topološke pravilnosti ter položajno in tematsko točnost prepoznanih stavb. Zadnji sklop aktivnosti je namenjen rekonstrukciji 3D-modela stavb. Ko izdelamo 3D-model stavbe, preverimo njegovo popolnost, logično skladnost, predvsem topološko pravilnost, in položajno ter tematsko točnost modela.

Predlagani konceptualni model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov opredeljuje splošne korake spremljanja kakovosti v fazah zajema, obdelave in modeliranja podatkov, ki smo jih določili na podlagi izbranega procesnega modela za 3D-modeliranje stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk (Dreščeк et al., 2020) in identificiranih ključnih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost podatkov v obravnavanem procesu. S tem smo potrdili drugo raziskovalno hipotezo H2, ki pravi, da je *mogoče ob poznavanju dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, razviti konceptualni model za spremljanje kakovosti v tem procesu*.

V procesnem modelu za 3D-modeliranje stavb, na katerem smo zasnovali konceptualni model za spremljanje kakovosti v tem procesu, se osredotočamo na uporabo nadirnih UAV-fotografij za izdelavo fotogrametričnega oblaka točk, ki ga posredno georeferenciramo v izbran prostorski referenčni koordinatni sistem preko neodvisno, na terenu izmerjenih položajev oslonilnih točk. V izbranem postopku izdelamo 3D-modele stavb iz neklasificiranega fotogrametričnega oblaka točk, kjer najprej prepoznamo točke na strehah stavb in izdelamo 2D-obod stavbe, nato pa z metodo modeliranja, ki temelji na podatkovnem pristopu, izdelamo topološko urejen vektorski 3D-model stavbe, skladen s standardom OGC CityGML. Ker je bil model za zagotavljanje kakovosti izdelan na osnovi izbranega postopka 3D-modeliranja stavb, so ključne aktivnosti za spremljanje kakovosti določene glede na ta pristop. Kljub navedeni omejitvi pa je mogoče razviti model za spremljanje kakovosti ustrezno razširiti ali prilagoditi, če je postopek 3D-modeliranja stavb iz oblaka točk nekoliko spremenjen.

6 REZULTATI EKSPERIMENTALNEGA DELA RAZISKAVE

V tem poglavju podrobneje prikazujemo rezultate eksperimentalnega dela raziskovalne naloge, katerega namen je bil preizkusiti procesni model za obdelavo UAV-fotografij in 3D-modeliranja stavb, kjer je ciljni 3D-model skladen s standardom OGC CityGML ravni podrobnosti LOD2. V procesni model (slika 28) so vključeni postopki kontrole kakovosti vmesnih rezultatov, kot je predstavljeno tudi že v samem konceptualnem modelu za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb na temelju UAV-podatkov (slika 22) za delovišči Kandrše in Vače.

Ker je področje 3D-modeliranja na temelju fotogrametričnega oblaka točk še razmeroma nerazvito in ni na voljo veliko programskih rešitev, ki bi podpirale 3D-modeliranje na podatkovnem pristopu (angl. *data-driven approach*), za katerega smo se odločili, je bil velik poudarek tega dela raziskave na izvedbi procesnega modela v prostorskem ETL-okolju.

Predstavitvi izvedbenega procesnega modela, s poudarkom na modeliranju procesa v okolju prostorskega ETL, sledi prikaz rezultatov analize vpliva izbranih dejavnikov, ki smo jih na podlagi pregleda literature prepoznali kot dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah obravnavanega procesa 3D-modeliranja. Splošni preizkus celotnega procesnega modela smo izvedli na dveh študijskih območjih, to sta Kandrše in Vače. Dodatna analiza vplivov izbranih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov je bila izvedena na podlagi podatkov UAV-snemanja na navedenih študijskih območjih, kjer smo posebno pozornost posvetili položajni kakovosti in logični konsistentnosti 3D-modela stavb, in sicer smo posebej obravnavali:

- dejavnike vpliva na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk,
- dejavnike vpliva modeliranja na kakovost 3D-modela stavbe.

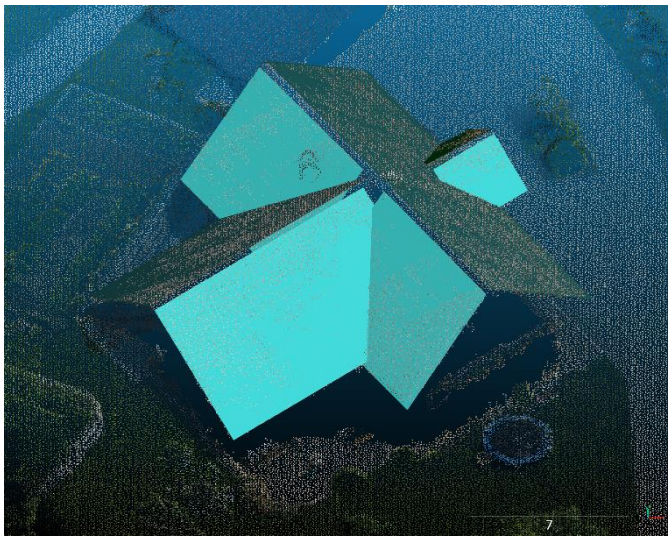
6.1 Obdelava podatkov in 3D-modeliranje stavb

Pri zajemu podatkov z daljinsko vodenim letalnikom smo upoštevali splošno sprejete mednarodne usmeritve s ciljem zagotavljati ustrezno kakovost fotogrametričnih izdelkov (na primer prekrivanje med fotografijami, vremenske razmere leta ipd.). Prvi del obdelave UAV-fotografij smo izvedli z uporabo komercialnih programskih rešitev, ki so opisne v poglavju o uporabljeni metodologiji in virih podatkov, to so orodja programskega okolja *Agisoft Photoscan Professional* ver. 1.4.3 in *Agisoft Metashape Professional ver.* 1.6.2 (Agisoft, 2020). Rezultat obdelave, ob upoštevanju podatkov o položaju oslonilnih točk, je bil nestrukturiran fotogrametrični oblak točk v državnem koordinatnem sistemu D96/TM. Nestrukturiran fotogrametrični oblak točk (slika 29) je bil vhodni podatek za določevanje ravnin streh, oboda stavb in izdelavo 3D-modela stavb.



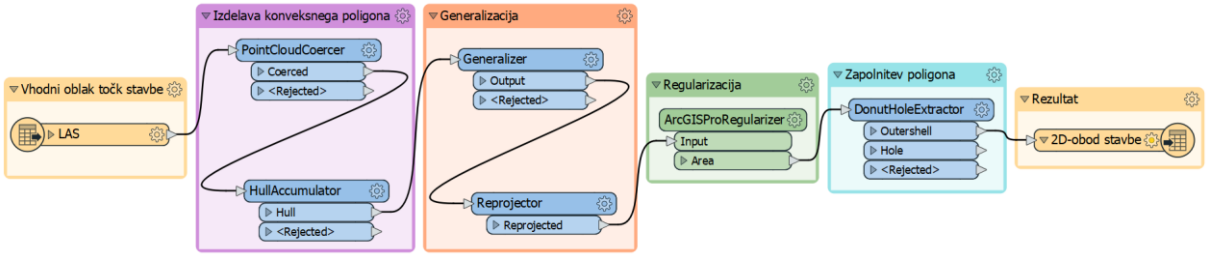
Slika 29: Nestrukturiran fotogrametrični oblak točk.
Figure 29: Unstructured photogrammetric point cloud.

Filtriranje oblaka točk, kjer smo na podlagi geometrijskih lastnosti okolice posamezne točke izbrali tiste točke, ki določajo posamezno stavbo, smo izvedli v odprtokodnem programskem okolju *CloudCompare ver. 2.11* (CloudCompare, 2020). Pri tem smo uporabili vgrajeno metodo segmentacije oblaka točk za določitev povezanih komponent točk (angl. *label connected components*). V programskem okolju *CloudCompare* smo nato izvedli tudi določitev značilnih ploskev, ki opisujejo obliko strehe posamezne stavbe. Za prepoznavanje ploskev smo uporabili algoritem *Efficient RANSAC* (Schnabel et al., 2007), ki je kot vtičnik vgrajen v uporabljeno programsko okolje. Rezultat so bile prepoznane značilne 3D-ploskve za posamezno streho stavbe, ki so določale naklon strehe in njeno orientacijo v prostoru, ne pa prave velikosti (slika 30).



Slika 30: Prilegajoče se 3D-ploskve v oblak točk za izbrano stavbo.
Figure 30: Fitted 3D planar patches into the point cloud for the selected building.

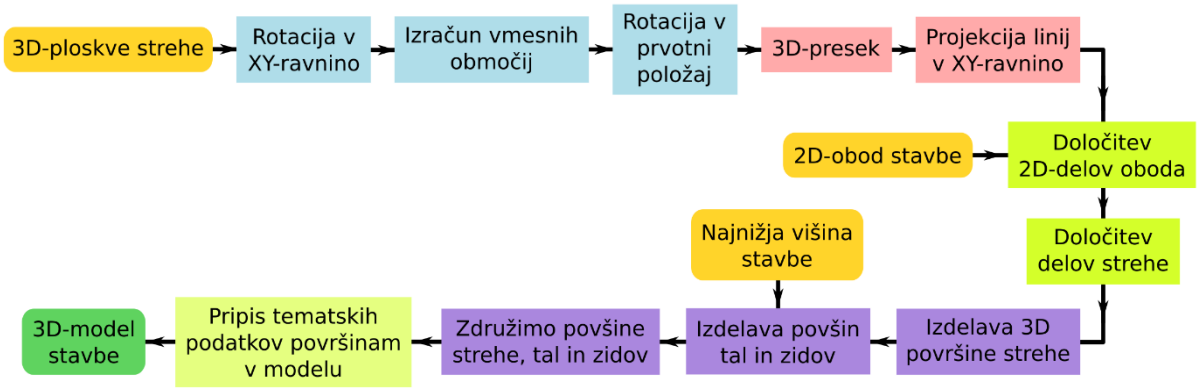
Za določitev oboda stavbe in izdelavo 3D-modela stavbe smo nadalje razvili izvedbeni procesni model v okolju prostorskega ETL (angl. *extract, transform, load*), natančneje v okolju *FME* podjetja *Safe Software, Inc.* (2020). Postopek 3D-modeliranja stavb na podlagi nestrukturiranega UAV-fotogrametričnega oblaka točk smo razdelili na dva dela. Prvi del procesa se nanaša na določitev oboda stavbe v dveh razsežnostih (slika 31). Iz oblaka točk za posamezno stavbo smo najprej izdelali konveksni poligon z orodjem *HullAccumulator*, ga nato posplošili z orodjem *Generalizer*, v katerem smo uporabili algoritem *Douglas-Peucker*, in izvedli regularizacijo oboda, s čimer smo zagotovili pravokotnost med sosednjimi stranicami oboda. Pri tem smo uporabili funkcijo *Regularize Building Footprint*, sicer razvito za programsko okolje *ArcGIS Pro* podjetja *ESRI*, ki pa smo jo preko skripte *Python* integrirali v prostorski ETL. V zadnjem koraku procesa smo z orodjem *DonutHoleExtractor* zapolnili morebitne »luknje« znotraj poligona. Rezultat procesa je poligon, ki opisuje zunanji obris strehe stavbe, njen položaj in orientacijo.



Slika 31: Procesni model za določitev oboda stavbe, izdelan v prostorskem ETL (objavljeno v angleškem jeziku v Drešček et al., 2020).

Figure 31: The process model for building outline extraction developed in the spatial ETL (published in English in Drešček et al., 2020).

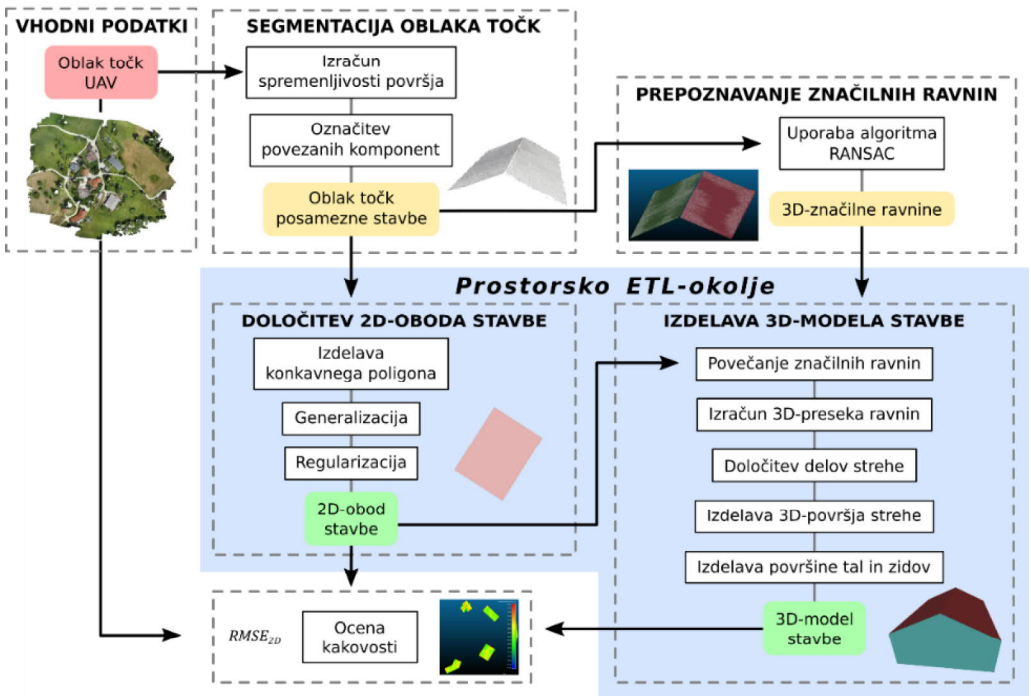
V drugem delu procesnega modela, v prostorskem ETL, smo razvili postopek izdelave 3D-modela stavbe. Kot vhodni podatek smo uporabili prilegajoče se 3D-ploskve za posamezno stavbo, predhodno izdelan obod stavbe in minimalno višino stavbe. V tem procesu smo najprej povečali prilegajoče se ravnine z metodo vmesnih območij (angl. *buffer*) in izračunali 3D-presek med ravninami, da smo dobili medsebojne odnose med prilegajočimi se ravninami. Nato smo preko oboda stavbe in presekov med ravninami določili posamezne dele strehe ter jih povezali v skupno površino strehe. Sledil je postopek izdelave površin zidov in tal, ki smo jih nato skupaj s površino strehe združili v 3D-model stavbe. Na koncu smo površinam pripisali semantične informacije o tem, kaj površina predstavlja v modelu. Rezultat postopka je bil topološko urejen 3D-model stavbe v stopnji podrobnosti LOD2, skladno z zahtevami standarda OGC CityGML (Open Geospatial Consortium, 2012). Slika 32 prikazuje shematski prikaz drugega dela procesnega modela za 3D-modeliranje stavb, razvitega v prostorskem ETL. Razviti izvedbeni procesni model v okolju prostorskega ETL za 3D-modeliranje stavb na temelju UAV-fotogrametričnega oblaka točk smo nato uporabili za več študijskih primerov, kot sledi v nadaljevanju.



Slika 32: Shema procesnega modela za 3D-modeliranje stavb v prostorskem ETL (objavljeno v angleškem jeziku v Drešček et al., 2020).

Figure 32: Schema of the process model for 3D building modelling in the spatial ETL (published in English in Drešček et al., 2020).

Vpliv izbranih dejavnikov na kakovost fotogrametričnih izdelkov smo torej analizirali na temelju podatkov, ki smo jih namensko zajeli in obdelali na že navedenih študijskih območjih. Pri tem smo se osredotočili na (1) oceno kakovosti gostega oblaka točk in (2) oceno kakovosti 3D-modelov stavb, kot sledi v nadaljevanju. V splošnem lahko model obdelave UAV-fotografij in izdelave 3D-modela stavb predstavimo z več zaporednimi koraki (slika 33) (glej tudi Drešček et al., 2020).



Slika 33: Procesni koraki obdelave UAV-fotografij in izdelave 3D-modela stavb (objavljeno v angleškem jeziku v Drešček et al., 2020)

Figure 33: The steps of UAV imagery processing and 3D building model reconstruction (published in English in Drešček et al., 2020).

6.2 Preizkus modela za spremljanje kakovosti 3D-modeliranja stavb na podlagi UAV-podatkov

Predlagani model za spremljanje kakovosti UAV-fotogrametričnih izdelkov v okviru 3D-modeliranja, ki je bil predstavljen v poglavju 5, smo preizkusili na dveh študijskih območjih in tako preverili možnost njegove uporabe za zagotavljanje kakovosti v procesu 3D-modeliranja stavb v celotnem procesu obdelave podatkov – od zajema UAV-podatkov do končnega 3D-modela stavbe.

6.2.1 Rezultati 3D-modeliranja na študijskem območju Kandrše

Na prvem študijskem območju, ki leži na območju naselja Kandrše, smo model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v okviru 3D-modeliranja preverili na preprostem primeru dveh stavb: stanovanjske hiše in pripadajočega gospodarskega objekta.

Prvi koraki v procesnem modelu zahtevajo izbiro ustrezne merske opreme, določitev parametrov leta in upoštevanje zunanjih pogojev leta daljinsko vodenega letalnika. Za zajem UAV-fotografij smo uporabili letalnik z rotorji, in sicer letalnik *DJI Phantom Pro 4*, na katerem je nameščen digitalni fotoaparat FC6310. Preglednica 4 podaja lastnosti digitalnega fotoaparata, ki smo ga uporabili za zajem UAV-fotografij v vidnem spektru svetlobe.

Preglednica 4: Lastnosti digitalnega fotoaparata, s katerim smo zajeli podatke na študijskem območju Kandrše.
Table 4: The specifications of the digital camera used for data acquisition in the study area Kandrše.

Parameter	Vrednost
Goriščna razdalja	8,8 mm
Vrsta senzorja	CMOS
Ločljivost fotoaparata	20 Mpx
Velikost senzorja	5472 x 3648 px
Velikost slikovnega elementa (piksla)	2,41 µm

Snemanje je bilo izvedeno 4. 5. 2020 v jasnem in vetrovno mirnem vremenu, v dopoldanskem času. Zunanji pogoji so tako omogočali kakovostno izvedbo zajema podatkov s fotoaparatom, nameščenim na daljinsko vodenem letalniku. Opravili smo tri snemalne serije, ki so se med seboj razlikovale v izbranih nastavitvah parametrov leta letalnika, to sta prekrivanje fotografij in višina leta, kar se odraža tudi na povprečni prostorski ločljivosti in številu zajetih fotografij (preglednica 5). Trajanje zajema fotografij v posamezni snemalni seriji je bilo odvisno od snemalne višine in velikosti prekrivanja med fotografijami ter je znašalo približno 9–16 minut za posamezno serijo. V vsaki seriji smo zajeli fotografije zgolj v nadirnem pogledu. Kljub različnim nastavitvam parametrov leta smo v vseh serijah

zagotovili visoko prostorsko ločljivost fotografij, ki omogoča prepoznavanje detajlov in izdelavo zelo gostega fotogrametričnega oblaka točk. Dodatno smo s snemanjem zagotovili visoko prekrivanje med zaporednimi fotografijami, ki je potrebno za uspešno izvedbo grajenja strukture iz gibanja.

Preglednica 5: Parametri leta daljinsko vodenega letalnika za UAV-izmero na študijskem območju Kandrše.
Table 5: Parameters of the unmanned aerial vehicle (UAV) flight for the study area Kandrše.

Parameter	**1. serija**	**2. serija**	**3. serija**
Prekrivanje fotografij (vzdolžno/prečno)	80 % / 70 %	80 % / 70 %	85 % / 75 %
Povprečna višina leta nad terenom	42,2 m	58,3 m	42,6 m
Povprečna prostorska ločljivost (GSD)	1,2 cm/px	1,6 cm/px	1,2 cm/px
Število fotografij	356	175	545

Za splošen preizkus procesnega modela za spremljanje in zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov oziroma UAV-fotogrametričnih izdelkov, ki ga opisujemo v nadaljevanju, smo uporabili podatke, zajete v prvi snemalni seriji, medtem ko smo podatke vseh serij uporabili v kasnejših analizah vpliva izbranih dejavnikov leta letalnika na kakovost zajetih podatkov v izbranih fazah obdelave podatkov, ki so opredeljene v že opisanem procesnem modelu. Po koncu snemanja in pred začetkom obdelave smo preverili kakovost fotografij. Ker smo snemanje izvedli na relativno nizkih snemalnih višinah nad terenom, je bila geometrična kakovost fotografij zelo dobra, predvsem prostorska ločljivost je bila zelo visoka, s povprečno vrednostjo 1,2–1,6 cm/px. Vizualno smo preverili tudi radiometrično kakovost fotografij, ki je bila zaradi ugodnih zunanjih razmer snemanja in ustreznih nastavitev fotoaparata primerna za nadaljnjo obdelavo.

Za namene georeferenciranja fotogrametričnega oblaka točk smo na terenu opravili neodvisna geodetska opazovanja in določili položaje oslonilnih točk v referenčnem koordinatnem sistemu. Na podlagi terenske geodetske izmere smo določili tudi koordinate kontrolnih točk v referenčnem koordinatnem sistemu za kontrolo kakovosti georeferenciranja. Oslonilne in kontrolne točke smo na terenu signalizirali na enak način, uporabili smo umetne tarče v obliki črnega kroga na beli kvadratni podlagi s stranico 40 centimetrov. Poleg preizkusa celotnega procesnega modela za zajem, obdelavo in 3D-modeliranje podatkov, zajetih z optično kamero na daljinsko vodenem letalniku, in preizkusa predlaganih korakov za spremljanje kakovosti smo želeli na tem študijskem območju analizirati tudi vpliv izbranih dejavnikov na kakovost rezultatov v izbranih fazah procesa. S tem smo želeli čim bolj zmanjšati vpliv ostalih dejavnikov, ki niso bili predmet analize. Tako smo za izvedbo kakovostnega georeferenciranja fotogrametričnega oblaka točk v državni referenčni koordinatni sistem uporabili zelo gosto mrežo oslonilnih točk. Točke smo na terenu opazovali in njihove koordinate določili na podlagi klasične geodetske izmere z uporabo tahimetrične metode ob navezavi na geodetsko mrežo. Ta je bila predhodno vzpostavljena na podlagi opazovanj GNSS, kjer je bila uporabljena statična metoda izmere. Položaji

točk so bili določeni v referenčnem državnem koordinatnem sistemu (D96-17/TM, SVS2010) in izmerjeni z natančnostjo $\sigma_e = 2{,}8$ mm, $\sigma_n = 2{,}6$ mm, $\sigma_H = 3{,}3$ mm. Za georeferenciranje je bilo uporabljenih 32 oslonilnih točk, kakovost grajenja strukture iz gibanja in kakovost georeferenciranja smo nadzirali s petimi kontrolnimi točkami (slika 34). Ocenjena položajna točnost izmere oslonilnih in kontrolnih točk je bila višja od zahtevane, ki je opredeljena s prostorsko ločljivostjo fotografij, to je približno 1 centimeter.



Slika 34: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na študijskem območju Kandrše.
Figure 34: Configuration of ground control points and check points in the study area Kandrše.

Sledila je faza obdelave zajetih podatkov. Fotografije, pridobljene s fotoaparatom na daljinsko vodenem letalniku, smo skupaj s podatki geodetskih opazovanj oslonilnih in kontrolnih točk obdelali v programskem okolju *Agisoft Metashape Professional ver. 1.6.2* (Agisoft, 2020). Obdelava je bila izvedena s procesnimi koraki za UAV-fotogrametrijo (poglavje 2.2.3). Najprej smo izdelali redek oblak točk in ga georeferencirali v objektni koordinatni sistem, to je referenčni državni koordinatni sistem (D96-17/TM, SVS2010). Sledila je kontrola izvedbe georeferenciranja z analizo vrednosti $RMSE_{3D}$ na oslonilnih in kontrolnih točkah, kjer smo položaje točk, določene v oblaku točk, primerjali s položaji, izmerjenimi na terenu. Vrednost $RMSE_{3D}$ na oslonilnih točkah je znašala 0,5 centimetra, na kontrolnih točkah pa 1,1 centimetra. Nato smo v programskem okolju *Agisoft Metashape Professional ver. 1.6.2* z uporabo algoritmov gostega slikovnega ujemanja izdelali gost oblak točk. Po izvedbi tega koraka smo

gost oblak točk vizualno pregledali z vidika kakovosti, kjer smo preverili predvsem njegovo popolnost. Ugotovili smo zelo visoko gostoto točk na celotnem snemalnem območju. Povprečna oddaljenost med točkami v oblaku točk je bila 1,9 centimetra, kar ustreza gostoti oblaka točk 2800 točk/m^2. V povprečju je bila oddaljenost med točkami na celotnem območju nižja od prostorske ločljivosti fotografij, ker je bil oblak točk nepopoln v delih z vegetacijo, kjer nam z algoritmom za gosto slikovno ujemanje ni uspelo prepoznati identičnih točk, vendar je bil to pričakovan rezultat. Prav tako so točke manjkale na vertikalnih fasadah objektov, saj te niso bile v celoti zajete na nadirnih fotografijah. Kljub temu je bil izdelan oblak točk zadostne popolnosti za nadaljnjo uporabo v procesu 3D-modeliranja stavb.

Sledila je faza 3D-modeliranja stavb na osnovi georeferenciranega gostega oblaka točk po korakih izvedbenega procesnega modela, kot je predstavljeno v poglavju 6.1 (glej tudi Dreščeк et al., 2020). Uporabljen postopek za 3D-modeliranje stavb ne predvideva klasificiranega oblaka točk, ampak se za 3D-modeliranje stavb uporabi nestrukturiran oblak točk, zato smo po izdelavi gostega oblaka točk prešli neposredno na fazo modeliranja. Postopek modeliranja smo izvedli za stanovanjsko hišo in gospodarski objekt, ki se nahajata na severnem delu študijskega območja Kandrše, zato smo v nadaljevanju obdelovali le oblak točk, ki je vseboval ta dva objekta (slika 35).



Slika 35: Fotogrametrični oblak točk za del študijskega območja Kandrše, kjer smo izvedli 3D-modeliranje stavb.

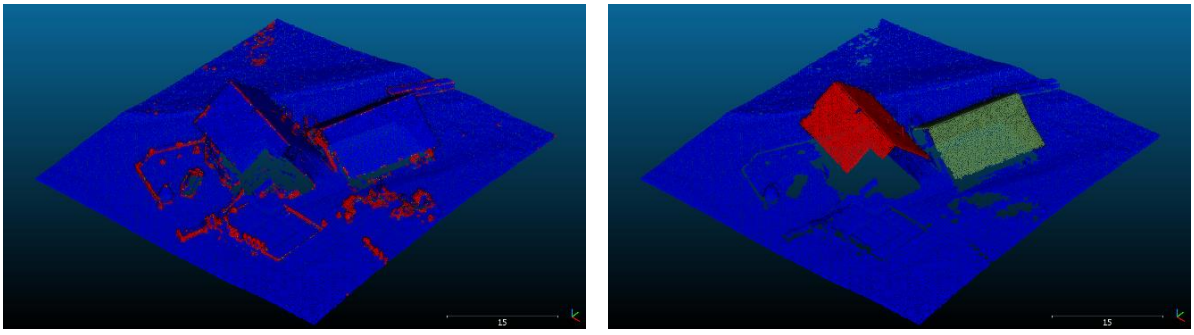
Figure 35: Photogrammetric point cloud of the part of the study area Kandrše, where 3D building modelling was performed.

V prvem delu faze modeliranja stavb smo v oblaku točk prepoznali stavbe in določili njihov obod v dveh razsežnostih. Za prepoznavanje stavb smo uporabili odprtokodno programsko okolje *CloudCompare ver. 2.11* (CloudCompare, 2020). Najprej smo gost oblak točk zredčili z orodjem *Subsample*, ob pogoju, da razdalja med točkami v oblaku točk ni bila manjša kot 10 centimetrov. S tem smo zagotovili enakomerno gostoto točk v vseh delih oblaka točk, kar je olajšalo nastavitev ustreznih vrednosti parametrov nadaljnje obdelave, ki so odvisne od gostote oblaka točk. Za vsako točko v oblaku točk smo izračunali izbrano geometrijsko značilnost, ki jo pridobimo preko lastnih vrednosti

kovariančne matrike točke glede na točke v njeni okolici. Izbrali smo vrednosti spremenljivosti površja (angl. *surface variation*), na podlagi katerih smo lahko ločili točke, ki opisujejo stavbe in teren, od točk vegetacije. Za vsako točko smo za njeno konstantno okolico v obliki krogle z radijem r = 0,30 m izračunali vrednost spremenljivosti površja po enačbi (5):

$$Surface\ variation = \lambda_3/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3), \quad (5)$$

kjer so $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ lastne vrednosti kovariančne matrike (Hackel et al., 2016). Točke, ki so imele visoko vrednost spremenljivosti oblike površja, smo odstranili iz oblaka točk, ohranili pa smo točke z nizko spremenljivostjo oblike površja. Izhajali smo namreč iz predpostavke, da točke z nizko spremenljivostjo oblike površja ležijo na ravnih površinah, kot so strehe stavb in teren, medtem ko ostale točke opisujejo vegetacijo. V oblaku točk smo tako obdržali točke, ki so imele spremenljivost površja manjšo ali enako 0,05. Mejna vrednost parametra je bila določena empirično glede na obravnavano študijsko območje in je odvisna od vrste ter geometrije obravnavanih objektov na študijskem območju. Tako smo dobili oblak točk, ki je vseboval le podatke o terenu in strehah stavb, medtem ko so bile točke vegetacije izločene (slika 36a). V nadaljevanju smo z uporabo orodja *Label Connected Components* izvedli segmentacijo točk tako, da smo točke, ki se nahajajo relativno skupaj, združili v eno komponento. Razdalja med komponentami je morala biti minimalno 10 centimetrov, vsaka komponenta je morala vsebovati vsaj 1000 točk. Rezultat segmentacije so bile tri komponente oziroma skupine točk, prva je vsebovala točke terena, druga je opisovala streho stanovanjske hiše, tretja pa gospodarski objekt (slika 36b).



(a) (b)

Slika 36: Prepoznavanje stavb: (a) določitev ravnih površin z izračunom spremenljivosti površja, rdeče so obarvane točke z visoko spremenljivostjo, ki smo jih izločili iz oblaka točk; (b) prepoznane tri povezane komponente: teren (modro), stanovanjska hiša (rdeče), gospodarski objekt (zeleno).

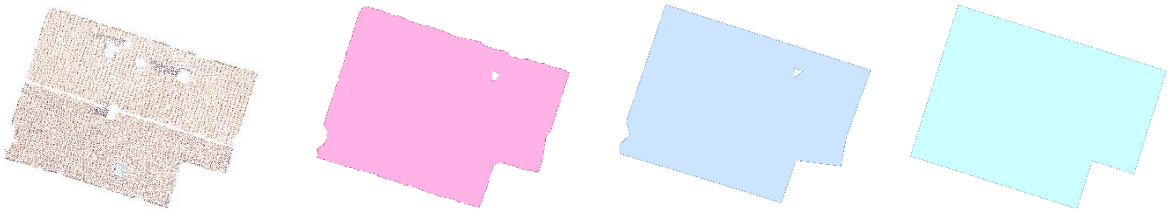
Figure 36: Building detection: (a) defining planar regions by computing surface variation values, red colour denotes points with high surface variation, which were then excluded from the point cloud; (b) three labelled connected components: terrain (blue), residential house (red), auxiliary building (green).

Sledila je izdelava oboda stavb v dveh razsežnostih (2D), ki smo jo izvedli v prostorskem ETL-okolju, v komercialnem programskem okolju FME (SafeSoftware, 2020). Za obe povezani komponenti s

točkami, ki opisujejo streho stavbe, smo z uporabo algoritma alfa izdelali konkavni 2D-poligon (dos Santos et al., 2019). V ta namen smo uporabili orodje *HullAccumulator*, vrednost parametra alfa smo nastavili na 0,4 metra. Nato smo geometrijo poligona poenostavili z orodjem *Generalizer*, pri čemer smo uporabili algoritem *Douglas-Peucker,* toleranca je znašala 0,2 metra. Sledila je regularizacija poligonov, s čimer smo dosegli pravokotnost stranic oboda stavbe, kar je bil naš cilj, saj smo predpostavili pravokotnost v vogalih stavbe. Slednje smo izvedli s funkcijo *Regularize Building Footprint,* ki je del programskega okolja *ArcGIS Pro* podjetja *ESRI*, in smo jo preko skripte *Python* integrirali v prostorsko ETL-okolje. Pri tem smo uporabili metodo *Right Angle*, vrednost tolerance odstopanja je znašala 0,4 metra, podrobnost regularizacije je bila nastavljena na 0,05 metra. Na koncu smo še zapolnili morebitne »luknje« znotraj poligona. Vrednosti parametrov za izdelavo 2D-obodov stavb so bile določene empirično, saj so odvisne od geometrije objektov, ki jih želimo opisati s poligonom. Uporabljene vrednosti parametrov za stavbi na študijskem območju Kandrše so zbrane v nadaljevanju (preglednica 6). Rezultat tega dela procesa so bile prepoznane stavbe v oblaku točk in obod stavbe v obliki poligona v dveh razsežnostih za vsako stavbo, ki opisuje zunanji obod strehe (slika 37).

Preglednica 6: Parametri, uporabljeni za generiranje obodov stavb na študijskem območju Kandrše.
Table 6: Parameters used for building outline extraction in the study area Kandrše.

Parameter	**Vrednost [m]**
Vrednost alfa	0,40
Toleranca poenostavitve oboda	0,20
Toleranca regularizacije	0,40
Podrobnost regularizacije	0,05



(a) (b) (c) (d)

Slika 37: Vhodni podatki in vmesni ter končni rezultati postopka izdelave 2D-oboda izbrane stavbe: (a) vhodni fotogrametrični oblak točk v tlorisnem pogledu; (b) konkavni poligon; (c) generaliziran poligon; (d) regulariziran poligon brez »lukenj«, ki je rezultat postopka prepoznavanja stavb in generiranja oboda.

Figure 37: Input data, intermediate and final results of building outline generation: (a) the input photogrammetric point cloud in the top view; (b) the estimated convex hull; (c) generalised polygon; (d) the regularised building outline without holes, which is the result of building outline detection and extraction.

Kakovost prepoznavanja stavb v obliki zunanjega oboda stavbe smo analizirali z oceno relativne in absolutne položajne točnosti 2D-obodov stavb. Relativno položajno točnost smo ocenili s primerjavo podatkov o položajih, to je koordinat, vogalnih točk 2D-obodov stavb s podatki o položaju točk v oblaku

točk, ki določajo vogal stavbe in smo jih zajeli ročno. Na podlagi koordinatnih razlik med vogalnimi točkami izdelanega 2D-oboda stavbe in vogalnih točk, prepoznanih v oblaku točk, smo izračunali vrednost $RMSE_{2D}$ za vsako stavbo (preglednica 7). Absolutno položajno točnost 2D-obodov smo analizirali na podlagi primerjave koordinat vogalnih točk izdelanega oboda stavbe s koordinatami identičnih točk strehe, ki smo jih določili na temelju neodvisne geodetske izmere z uporabo tahimetrične metode izmere. Za oceno absolutne položajne točnosti izbranih značilnih točk oboda stavbe smo izračunali razlike med koordinatami vogalnih točk 2D-oboda stavbe in koordinatami vogalnih točk oboda referenčnega modela, na podlagi katerih smo nato izračunali vrednosti $RMSE_{2D}$ (preglednica 7).

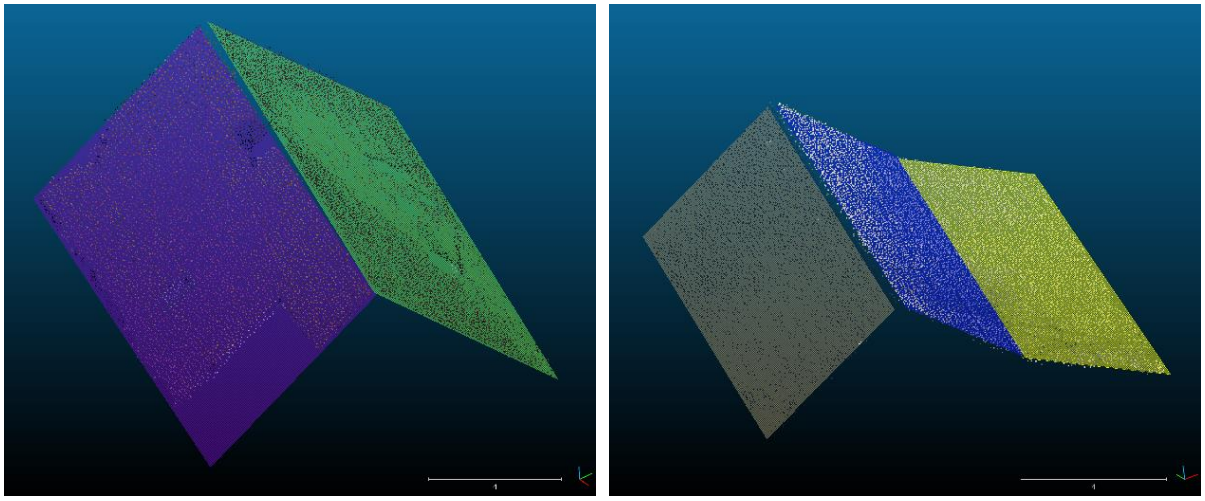
Iz rezultatov ocenjene položajne točnosti oboda stavb (preglednica 7) lahko vidimo, da je bil 2D-obod obeh obravnavanih stavb določen z relativno položajno točnostjo 0,10 metra, kar je v skladu s pričakovanji glede na gostoto uporabljenega vhodnega oblaka točk. Absolutna položajna točnost je nekoliko slabša od relativne, vendar še vedno ustreza zahtevam za položajno točnost 3D-modelov stavb, kot jih določa standard OGC CityGML za raven podrobnosti LOD2. Vidimo lahko, da je obod stanovanjske hiše z vrednostjo $RMSE_{2D}$ 0,16 metra določen z nekoliko slabšo absolutno položajno točnostjo kot gospodarski objekt, kjer je bila položajna točnost oboda ocenjena na 0,11 metra. Razlog za večje položajne razlike koordinat značilnih točk oboda stanovanjske hiše od referenčnih vrednosti je verjetno v bolj razčlenjeni obliki oboda z večjim številom vogalnih točk strehe, kar vpliva tudi na potek regularizacije oboda stavbe, kjer se posamično obravnavajo pravokotnosti v stičiščih linije poligona oboda v vogalnih točkah.

Preglednica 7: Ocenjena položajna točnost 2D-obodov stavb na študijskem območju Kandrše.
Table 7: The assessed positional accuracy of the extracted 2D roof outlines in the study area Kandrše.

Vrsta stavbe	**Relativna položajna točnost $RMSE_{2D}$ [m]**	**Absolutna položajna točnost $RMSE_{2D}$ [m]**
Stanovanjska hiša	0,10	0,16
Gospodarski objekt	0,10	0,11

V drugem delu faze modeliranja smo izvedli rekonstrukcijo 3D-modela stavb. Izbrali smo želeno stopnjo podrobnosti modela, sprejeli predpostavke o končnem modelu in izbrali metodo 3D-modeliranja. Za modeliranje smo izbrali metodo, ki temelji na podatkovnem pristopu. Omogoča izdelavo 3D-modela stavbe v stopnji podrobnosti LOD2 glede na določila standarda OGC CityGML. V ciljnem modelu je streha modela stavbe ravna in v 3D-prostor umeščena upoštevajoč njen pravi naklon, podrobnejši elementi na strehi niso modelirani. Zunanji zidovi modela stavbe so vertikalni in povezujejo zunanji obris strehe in teren, okna ter vrata niso modelirana (glej tudi Drešček et al., 2020).

Prvi korak 3D-modeliranja je bil iskanje značilnih ravnin in ploskev, ki opredeljujejo obliko strehe stavbe. Kot vhodni podatek za ta korak smo uporabili povezane komponente točk, ki smo jih iz oblaka točk pridobili v koraku prepoznavanja stavb (slika 36b). Za vsako prepoznano povezano komponento točk smo v programskem okolju *CloudCompare* izvedli iskanje prilegajočih se 3D-ploskev. Uporabili smo vtičnik *RANSAC Shape Detection*, ki ima vgrajen algoritem *Efficient RANSAC* (Schnabel et al., 2007), in v oblaku točk za posamezno stavbo poiskali značilne ploskve, ki opredeljujejo obliko strehe (slika 38). Nastavitve algoritma RANSAC (preglednica 8) so bile določene empirično, ob upoštevanju priporočil in ugotovitev, objavljenih v literaturi (Malihi et al., 2018; Drešček et al., 2020).



(a) (b)

Slika 38: Prepoznane 3D-ravnine strehe: (a) stanovanjska hiša; (b) gospodarski objekt.
Figure 38: Detected 3D roof patches: (a) residential house; (b) auxiliary building.

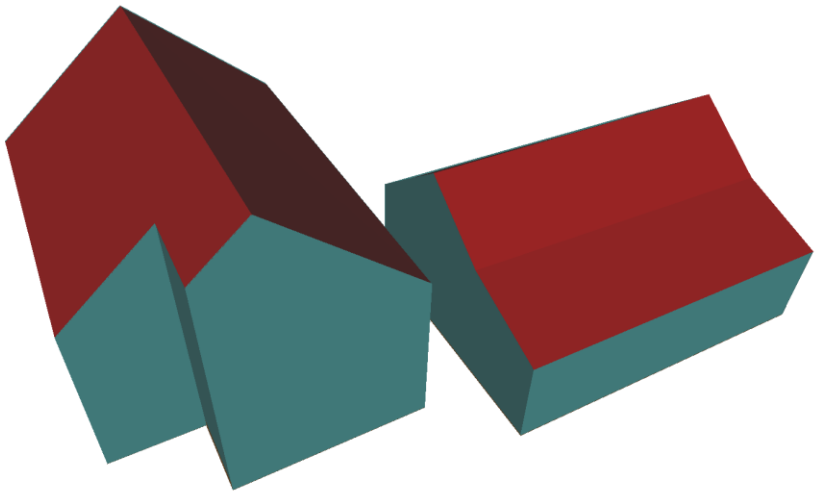
Preglednica 8: Nastavitve algoritma *Efficient RANSAC* za prepoznavanje ravnin v oblaku točk.
Table 8: The parameters of the efficient RANSAC for roof patches detection.

Parameter	**Vrednost**
Minimalno število začetnih točk	300
Največja razdalja od ravnine	e = 0,05 m
Ločljivost vzorčenja	b = 0,10 m
Največje odstopanje normale ravnine	a = 5°
Verjetnost rešitve	99 %

Sledila je izdelava 3D-modela stavb v prostorskem ETL-okolju, pri čemer smo uporabili komercialno programsko okolje FME (SafeSoftware, 2020). Kot vhodni podatek za obdelavo podatkov v ETL-okolju smo uporabili prepoznane značilne 3D-ploskve streh (slika 38) in 2D-obode stavb (slika 37d). Najprej smo modelirali ploskve strehe. Značilne ploskve strehe so določale le naklon posameznega dela strehe, niso pa imele prave velikosti, zato je bilo treba v postopku 3D-modeliranja naprej določiti pravo velikost

oziroma prostorsko razsežnost delov strehe. Zato smo značilne ploskve strehe projicirali v XY-ravnino in jih navidezno povečali za 1 meter z izračunom tako imenovanih vmesnih območij (angl. *buffer*). Povečane ploskve, ki opredeljujejo naklone delov streh, smo nato projicirali nazaj v 3D-prostor na prvotno mesto in z izračunom 3D-presečišč določili medsebojne odnose med ploskvami delov strehe. 3D-presečišča smo izračunali z uporabo SQL PostGIS funkcije *3DIntersection*, ki jo je mogoče z uporabo orodja *SQLExecutor* integrirati v okolje prostorskega ETL.

Izračunana presečišča ploskev delov strehe smo nato projicirali na 2D-obod stavbe, s čimer smo dobili tlorise vseh delov strehe v ravnini projekcije. Projekcije delov strehe, opredeljene tudi z obodom stavbe, smo z uporabo orodja *SurfaceDraper* in vhodnih značilnih ravnin strehe prenesli v 3D-prostor, tako da je vsak del strehe imel pravo obliko, orientacijo in položaj v prostoru, s čimer smo izdelali 3D-model površine strehe. Sledila je izdelava zunanjih zidov stavbe in talne površine modela stavbe z uporabo FME-orodja *BRepSolidBoundaryCreator*, in sicer iz predhodno izdelanega 3D-modela površine strehe in dodatno podane višine najnižje točke stavbe. Dobili smo 3D-model stavbe, ki ustreza modelu stopnje podrobnosti LOD2 po standardu OGC CityGML. Model sestavljajo tako imenovane robne ploskve, ki opredeljujejo streho, zid in tla. Na koncu smo izdelani 3D-model pretvorili v obliko, skladno s standardom OGC CityGML (slika 39). Geometrijo modela smo zapisali s prostornino (angl. *solid*), ki jo omejuje več ploskev. Posameznim ploskvam smo dodali standardiziran CityGML tematski podatek o tem, kaj v modelu predstavljajo (*RoofSurface, WallSurface, GroundSurface*).

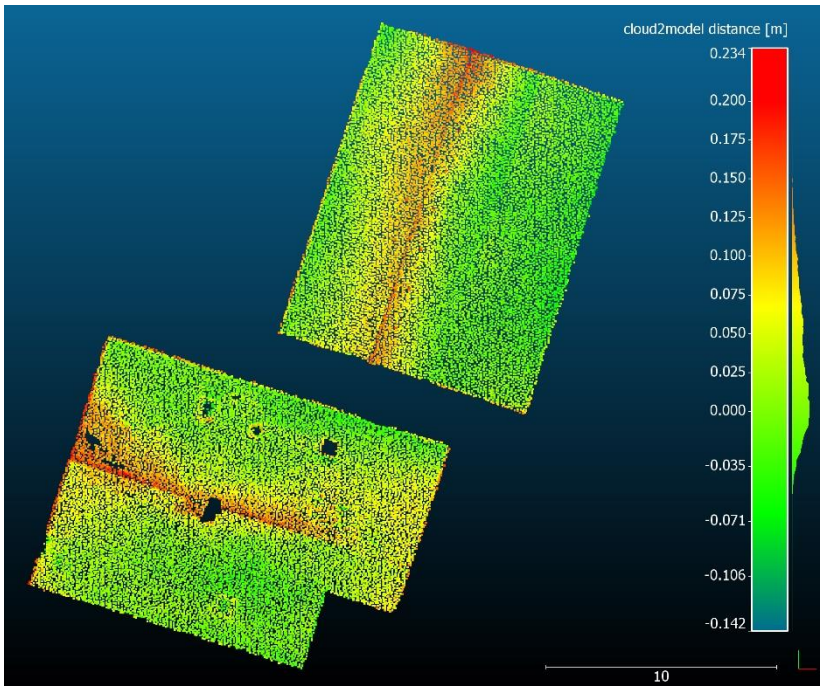


Slika 39: Končna 3D-modela dveh izbranih stavb, skladna s standardom OGC CityGML (LOD2), za študijsko območje Kandrše.

Figure 39: Final 3D building models of two selected buildings, in accordance with the OGC CityGML standard (LOD2), from the study area Kandrše.

Za oceno kakovosti izdelanega 3D-modela smo preverili relativno in absolutno položajno točnost, popolnost in logično usklajenost. Za oceno relativne položajne točnosti smo izdelani model primerjali z vhodnim oblakom točk, ki opisuje zgolj modelirane stavbe in iz katerega smo izločili elemente, ki niso

bili predmet modeliranja (na primer dimnike, antene, šum). Primerjavo med »očiščenim« oblakom točk in 3D-modelom stavb smo izvedli v programskem okolju *CloudCompare*. Z orodjem *Cloud-to-Mesh Distance* smo izračunali oddaljenost vsake točke v oblaku točk od 3D-modela in rezultat grafično prikazali (slika 40). Srednja vrednost razlik položajev točk oblaka točk od izdelanega modela obeh stavb je bila m_d = 0,03 m s standardnim odklonom σ_d = 0,04 m.

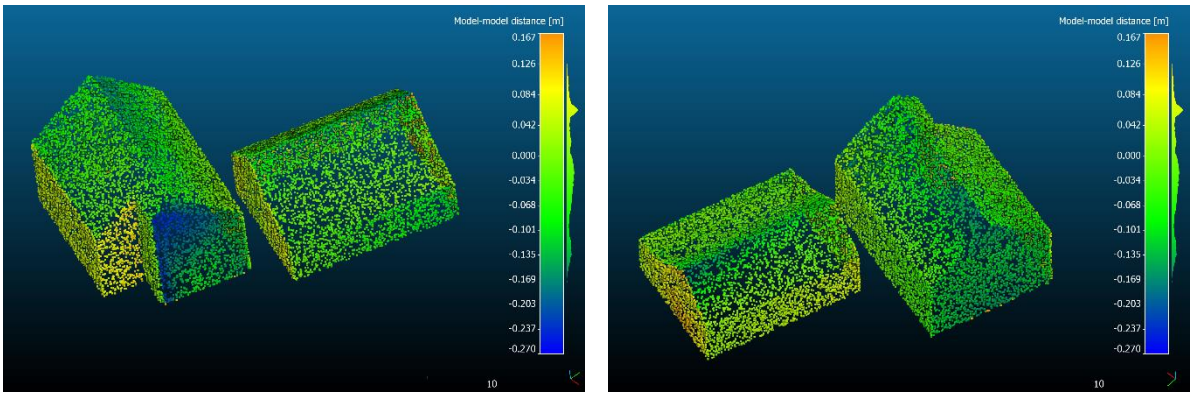


Slika 40: Položajne razlike med izdelanim 3D-modelom stavb in vhodnim oblakom točk na študijskem območju Kandrše.

Figure 40: The positional differences between reconstructed 3D building model and the input point cloud in the study area Kandrše.

Absolutno položajno točnost 3D-modela stavb smo analizirali na podlagi primerjave z referenčnim modelom stavbe, ki smo ga izdelali ročno v programskih okoljih *ESRI ArcGIS Pro ver. 2.4* (ESRI, 2020) in *FME ver. 2019.2* (SafeSoftware, 2020). Referenčni model smo izdelali na podlagi neodvisno pridobljenih podatkov, in sicer smo z geodetskimi opazovanji določili koordinate značilnih oziroma karakterističnih točk obeh stavb (vogalov strehe, slemena). Ker uporabljena tahimetrična metoda izmere omogoča izmero položajev točk z visoko natančnostjo, smo na podlagi teh opazovanj izdelani model obravnavali kot referenčni model s pravim merilom, obliko in položajem v izbranem koordinatnem sistemu. Oceno absolutne položajne točnosti smo izračunali v programskem okolju *CloudCompare*. Iz ocenjevanega 3D-modela stavb smo generirali nov oblak točk z gostoto 20 točk/m^2, ki je v celoti opisoval obliko in položaj ocenjevanega modela. Nato smo z orodjem *Cloud-to-Mesh Distance* izračunali oddaljenost vsake točke v novo generiranem oblaku točk od referenčnega modela. V primerjavi nismo upoštevali spodnje ploskve modelov, saj je ta na istem nivoju tako v ocenjevanem kot v referenčnem modelu, zato tam ni razlik med modeloma. Rezultat primerjave so bila izračunane

položajne razlike, to je razdalje, med ocenjevanim modelom v obliki oblaka točk in referenčnim 3D-modelom obeh obravnavanih stavb (slika 41a, slika 41b), ki so znašale v povprečju $m_d = -0{,}03$ m s standardnim odklonom $\sigma_d = 0{,}08$ m.



(a) (b)

Slika 41: Položajne razlike med izdelanim in referenčnim 3D-modelom stavb na študijskem območju Kandrše: (a) pogled od spredaj; (b) pogled od zadaj.

Figure 41: The positional differences between the reconstructed and reference 3D building model in the study area Kandrše: (a) the front view; (b) the back view.

Popolnost ocenjevanega modela stavb smo preverili vizualno glede na podane predpostavke o končnem modelu in izbrano stopnjo podrobnosti. Izdelana modela sta skladna s predhodno določenimi zahtevami in ustrezata zahtevani popolnosti. Z vidika logične skladnosti smo preverili geometrično in topološko pravilnost izdelanih modelov, za kar smo uporabili spletno aplikacijo *val3dity*, ki omogoča tovrstne kontrole 3D-modelov, zapisnih v skladu z določili standarda OGC CityGML. Oba izdelana 3D-modela sta glede na privzete vrednosti kontrolnih mer geometrično in topološko pravilna. S tem smo preverili ustreznost zapisa geometrije in skladnost s topološkimi pravili (na primer sovpadanje vogalnih točk modela, ravnost ploskev 3D-modela).

6.2.2 Rezultati 3D-modeliranja na študijskem območju Vače

Model za spremljanje kakovosti UAV-fotogrametričnih izdelkov v okviru 3D-modeliranja smo preizkusili še na drugem študijskem območju, in sicer na območju Vače. Tudi na tem območju je bil cilj, da preizkusimo model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v celotnem procesu 3D-modeliranja, dodatno smo na tem območju želeli procesni model preizkusiti na več različnih oblikah stavb.

Prvi koraki v procesnem modelu zahtevajo izbiro ustrezne merske opreme, določitev parametrov leta in upoštevanje zunanjih pogojev za izvedbo snemalne misije z daljinsko vodenim letalnikom. Za zajem UAV-podatkov smo uporabili rotorski letalnik *Sky Hero X8*. Na letalniku je bil poleg komponent za

letenje in navigacijo nameščen digitalni fotoaparat *Olympus PEN E-PL7*, ki omogoča zajem digitalnih fotografij v vidnem spektru svetlobe. Preglednica 9 podaja lastnosti digitalnega fotoaparata, ki je bil uporabljen za zajem UAV-fotografij na študijskem območju Vače.

Preglednica 9: Lastnosti digitalnega fotoaparata, s katerim smo zajeli podatke na študijskem območju Vače.
Table 9: The specifications of the digital camera used for data acquisition in the study area Vače.

Parameter	**Vrednost**
Goriščna razdalja	17 mm
Vrsta senzorja	CMOS
Ločljivost fotoaparata	16,1 Mpx
Velikost senzorja	4608 x 3456 px
Velikost slikovnega elementa (piksla)	3,74 µm

Snemanje je bilo izvedeno 8. 6. 2018 v jasnem in brezvetrnem vremenu, pozno dopoldne, ko so bile sence kratke, s čimer smo zmanjšali njihov negativni vpliv na kakovost izdelave gostega oblaka točk. Zunanji pogoji so tako omogočali kakovostno izvedbo zajema podatkov. Pred izvedbo UAV-izmere smo izbrali parametre leta letalnika, to sta prekrivanje fotografij in višina leta, kar vpliva na povprečno prostorsko ločljivost in število zajetih fotografij (preglednica 10). Vse fotografije so bile zajete v nadirnem pogledu, zagotovljeno je bilo visoko vzdolžno in prečno prekrivanje med zaporednimi fotografijami, in sicer v vzdolžni smeri 85 % in v prečni smeri 65 % glede na smer leta letalnika. V eni snemalni seriji v skupnem trajanju približno 15 minut smo zajeli 344 fotografij. Po zajemu smo izvedli kontrolo kakovosti zajetih podatkov. Pri nekaterih fotografijah so se pojavili dvojniki, ki jih je bilo treba odstraniti, sicer pa so bile fotografije geometrično in radiometrično ustrezne za nadaljnjo uporabo.

Preglednica 10: Parametri leta daljinsko vodenega letalnika za UAV-izmero na študijskem območju Vače.
Table 10: Parameters of the unmanned aerial vehicle (UAV) flight for the study area Vače.

Parameter	**Vrednost**
Prekrivanje fotografij (vzdolžno/prečno)	85 % / 65 %
Povprečna višina leta nad terenom	50 m
Povprečna prostorska ločljivost (GSD)	1,1 cm/px
Število fotografij	344
Število oslonilnih točk	9

Ločeno od zajema UAV-podatkov smo za namene georeferenciranja fotogrametričnega oblaka točk na terenu opravili neodvisna geodetska opazovanja ter določili položaje oslonilnih točk v objektnem koordinatnem sistemu (D96/TM, SVS2000). Za določitev višin točk smo uporabili metodo GNSS-višinomerstva, pri čemer smo za preračun višin v izbran višinski koordinatni sistem uporabili model geoida SLO_AMG2000/Trst. Uporabili smo devet oslonilnih točk, ki so bile enakomerno razporejene

po celotnem študijskem območju (slika 42). Oslonilne točke smo na terenu pred izmero z letalnikom označili z umetnimi tarčami, ki so bile sestavljene iz črnega kroga na beli kvadratni podlagi s stranico 33 centimetrov. Koordinate oslonilnih točk smo določili z GNSS-metodo izmere, kjer smo z instrumentom *Leica GS15* izvedli opazovanja z metodo RTK (angl. *real-time kinematic*), z navezavo na slovensko omrežje stalno delujočih GNSS-postaj, to je omrežje SIGNAL. Položajna kakovost izmere točk je bila skladna s pričakovano natančnostjo metode RTK in je ustrezala zahtevani nekajcentimetrski natančnosti oblaka točk za izvedbo 3D-modeliranja stavb, glede na določila standarda OGC CityGML v stopnji podrobnosti LOD2. Za namene kontrole georeferenciranja smo izbrali še tri kontrolne točke, ki so bile pravzaprav mejniki parcel na študijskem območju in smo jih lahko jasno identificirali tudi na fotografijah. Koordinate mejnikov smo določili z neodvisnimi terenskimi opazovanji, in sicer s tahimetrično metodo izmere.



Slika 42: Razporeditev devetih oslonilnih točk na študijskem območju Vače.
Figure 42: Distribution of nine ground control points in the study area Vače.

Sledila je obdelava UAV-fotografij skupaj s podatki geodetskih opazovanj za georeferenciranje. Obdelavo smo izvedli v komercialnem programskem okolju *Agisoft Photoscan Professional ver. 1.4.3* (Agisoft, 2020) in je vključevala izdelavo redkega oblaka točk, transformacijo oblaka točk v objektni koordinatni sistem, to je referenčni državni koordinatni sistem (D96/TM, SVS2000), in izdelavo gostega oblaka točk. Uporabili smo procesne korake za UAV-fotogrametrijo, kot so podrobneje opisani v poglavju 2.2.3. Podobno kot je predstavljeno za območje Kandrše, smo v prvem delu z algoritmi grajenja strukture iz gibanja izdelali redek oblak točk. Z vključitvijo podatkov o položajih oslonilnih točk v izravnavo bloka fotografij in z izvedbo samokalibracije smo oblak točk transformirali v objektni

koordinatni sistem. S tem smo pridobili 3D-položaje vsake točke oblaka točk v državnem referenčnem koordinatnem sistemu in parametre zunanje ter notranje orientacije. Sledila je kontrola kakovosti georeferenciranja, ki smo jo v tem primeru izvedli preko izračunane položajne točnosti na devetih oslonilnih točkah in treh kontrolnih točkah. Položajna točnost oblaka točk, izražena z vrednostjo $RMSE_{3D}$, je znašala za oslonilne točke 1,8 centimetra in na kontrolnih točkah 2,2 centimetra.

V naslednjem koraku smo z algoritmi gostega slikovnega ujemanja izdelali gost oblak točk. Kakovost izdelanega oblaka točk smo preverili vizualno, pri čemer smo preverjali predvsem popolnost oblaka točk. Ugotovili smo, da je bila na območjih, ki so bila zajeta na nadirnih fotografijah, popolnost oblaka točk večinoma zelo dobra. Zaradi visoke prostorske ločljivosti fotografij je bilo mogoče pridobiti visoko gostoto oblaka točk, ki je primerljiva s prostorsko ločljivostjo vhodnih fotografij. Povprečna oddaljenost med točkami v oblaku točk je bila 1,8 centimetra, kar ustreza gostoti oblaka točk 3100 točk/m^2. Razlog za večjo oddaljenost med točkami od prostorske ločljivosti vhodnih fotografij je slabša popolnost oblaka točk na območjih z enolično ali ponavljajočo se teksturo objektov (na primer enolične strehe) in v delih, kjer je bila prisotna visoka vegetacija, kar je bilo pričakovano. Ker smo uporabili zgolj nadirne fotografije, nekateri objekti niso bili zajeti v popolnosti, na primer fasade stavb, zato ti deli niso vsebovali točk, kar smo tudi pričakovali.

Sledila je faza 3D-modeliranja stavb na podlagi georeferenciranega gostega oblaka točk po korakih izvedbenega procesnega modela, kot je opisano v poglavju 6.1 (glej tudi Drešček et al., 2020), na enak način kot za podatke s študijskega območja Kandrše (poglavje 6.2.1). Na študijskem območju Vače smo izbrali štiri objekte z različnimi oblikami streh (slika 43), za katere smo izdelali 3D-modele stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk, pri tem pa smo spremljali kakovost podatkov v posameznih fazah procesa, kot je predvideno v konceptualnem modelu, razvitem v tej nalogi. V postopku modeliranja stavb smo uporabili nestrukturiran oblak točk, zato klasifikacija oblaka točk ni bila potrebna. Kot vhodni podatek za prepoznavanje stavb smo uporabili UAV-fotogrametrični oblak točk celotnega območja, nadaljnje generiranje 2D-oboda stavbe in rekonstrukcijo 3D-modela stavb pa smo izvedli le za izbrane štiri stavbe.



(a) (b)

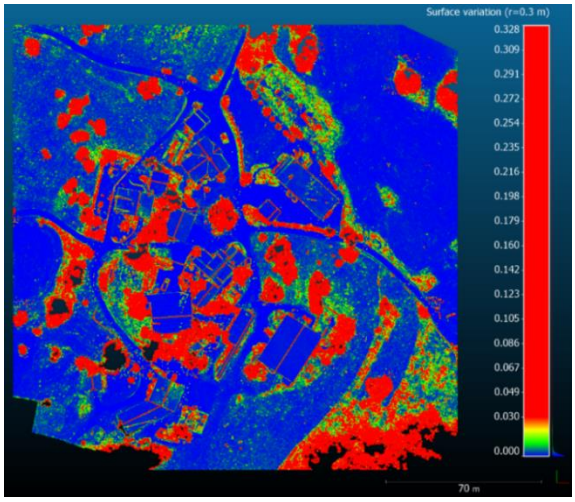
(c) (d)

Slika 43: Fotogrametrični oblak točk za štiri stavbe, ki smo jih izbrali za 3D-modeliranje na študijskem območju Vače: (a) stavba z enokapno streho; (b) stavba z dvokapno streho; (c) stavba s »križno« dvokapno streho; (d) stavba z dvokapno streho v dveh nivojih (Drešček et al., 2020).

Figure 43: Photogrammetric point clouds of four buildings, which were selected for 3D building modelling in the study area Vače: (a) building with a flat roof; (b) building with a gable roof; (c) building with a cross gable roof; (d) building with a two-level gable roof (Drešček et al., 2020).

Prepoznavanje stavb v oblaku točk smo izvedli enako kot za podatke s študijskega območja Kandrše. Najprej smo UAV-fotogrametrični oblak točk zredčili, tako da razdalja med točkami ni bila manjša kot 10 centimetrov. Nato smo za vsako točko v oblaku točk izračunali vrednost spremenljivosti površja glede na ostale točke v njeni okolici. Ravne površine v oblaku točk, kot so ravne strehe in teren, imajo majhno spremenljivost oblike površja, nasprotno imajo neravne površine višjo vrednost tega parametra. V oblaku točk smo obdržali le točke s spremenljivostjo oblike površja manjšo od 0,03, s čimer smo ohranili točke terena in točke na stavbah, izločili pa smo točke, ki opisujejo vegetacijo (slika 44). Mejno vrednost spremenljivosti površja smo določili empirično, saj je ta odvisna od geometrije objektov, ki jih želimo v oblaku točk prepoznati, in se je nekoliko razlikovala od mejne vrednosti na območju Kandrše. Nato smo izvedli segmentacijo oblaka točk na posamezne povezane komponente točk, kjer vsaka komponenta določa eno stavbo ali njen del. Pri tem smo uporabili podobne nastavitve prepoznavanja komponent kot za študijsko območje Kandrše, in sicer je vsaka komponenta vsebovala vsaj 1000 točk, kot ločene komponente so bile zaznane skupine točk, ki so bile med seboj oddaljene več kot 0,20 metra. Kot rezultat smo dobili 15 komponent točk, kjer je bila prva in največja komponenta oblak točk, ki je

opredeljeval teren, nadaljnjih 14 komponent pa so bili oblaki točk, ki so določali posamezne stavbe ali dele stavb oziroma streh (slika 45).



Slika 44: Izračunane vrednosti spremenljivosti površja: rdeča barva označuje točke z višjo spremenljivostjo površja (točke vegetacije); modra-rumena-zelena barva označujejo točke z nižjo spremenljivostjo površja (točke na ravnih površinah) (Dreščeк et al., 2020).

Figure 44: Computed values of surface variation: red colour denotes points with higher surface variation (point of vegetation); blue-yellow-green colours denote points with lower surface variation (points on flat surfaces) (Dreščeк et al., 2020).



(a) (b)

Slika 45: Izračunane povezane komponente: (a) največja komponenta določa teren; (b) naslednjih 14 komponent opisuje stavbe ali dele stavb (Dreščeк et al., 2020).

Figure 45: The computed connected components: (a) the largest component defines the terrain; (b) the next 14 components describe buildings or their parts (Dreščeк et al., 2020).

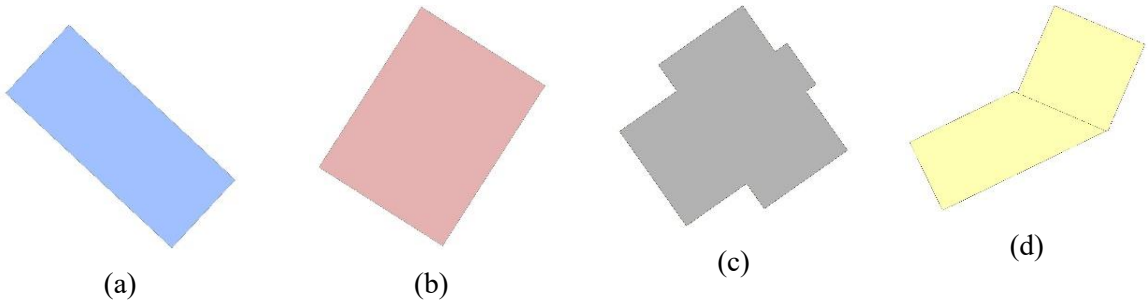
Iz vseh prepoznanih stavb na obravnavanem območju smo izbrali štiri, za katere smo v naslednjem koraku izdelali obode stavb, natančneje streh, in sicer v dveh razsežnostih (2D). Generiranje obodov smo izvedli enako kot za stavbi na študijskem območju Kandrše (glej tudi Dreščeк et al., 2020). Najprej smo iz oblaka točk za posamezno stavbo z algoritmom alfa določili konkavni 2D-poligon, pri čemer je

bila izbrana tolerančna vrednost 0,5–0,7 metra. Sledila je poenostavitev geometrije poligona z algoritmom *Douglas-Peucker,* ob toleranci 0,3 metra, in regularizacija poligona z *ESRI ArcGIS Pro* funkcijo *Regularize Building Footprint* (toleranca = 0,25 metra, podrobnost = 0,05 metra), nato pa še zapolnitev morebitnih lukenj v oblaku točk znotraj posameznega oboda stavbe. Vrednosti parametrov izdelave obodov stavb so bile izbrane empirično, glede na geometrijske lastnosti stavb na obravnavanem študijskem območju (preglednica 11), in se zaradi več različnih oblik stavb nekoliko razlikujejo od vrednosti parametrov na primeru študijskega območja Kandrše (preglednica 6).

Preglednica 11: Parametri, uporabljeni za generiranje obodov stavb na študijskem območju Vače.
Table 11: Parameters used for building outline extraction in the study area Vače.

Parameter	**Vrednost [m]**
Vrednost alfa	0,50–0,70
Toleranca poenostavitve	0,30
Toleranca regularizacije	0,25
Podrobnost regularizacije	0,05

Slika 46 prikazuje rezultat izdelave 2D-oboda streh za vse štiri izbrane stavbe. Za stavbo z dvokapno streho v dveh višinskih nivojih je vsak del stavbe določal eno povezano komponento točk, zato smo obod generirali za vsak del posebej – slika 46d prikazuje oba dela stavbe. Rezultat so bili obodi stavb v obliki poligona v dveh razsežnostih za vsako stavbo, ki opisuje zunanji obod strehe.



Slika 46: 2D-obod izbranih stavb: (a) stavba z enokapno streho; (b) stavba z dvokapno streho; (c) stavba s »križno« dvokapno streho; (d) stavba z dvokapno streho v dveh nivojih (Drešček et al., 2020).

Figure 46: 2D outline of selected buildings: (a) building with a flat roof; (b) building with a gable roof; (c) building with a cross gable roof; (d) building with a two-level gable roof (Drešček et al., 2020).

V tej fazi procesa smo v postopku spremljanja kakovosti podatkov izvedli kontrolo prepoznavanja stavb, in sicer smo preverjali položaj in obliko stavbe relativno glede na vhodni oblak točk. Relativno položajno točnost 2D-oboda smo tako ocenili s primerjavo karakterističnih koordinat oboda strehe, kjer smo primerjali koordinate vogalnih točk streh, pridobljenih z ročnim zajemom iz vhodnega oblaka točk, s koordinatami modela, to je koordinatami vozlišč izdelanih obodov streh. Za vsak obod smo izračunali vrednost $RMSE_{2D}$, s katero smo primerjali koordinate vogalnih točk strehe modela (oboda) in vhodnega

oblaka točk (preglednica 12). Kot je bilo navedeno že v metodologiji, smo se na delovišču Vače pri kontroli položajne kakovosti 3D-modela stavb osredotočili na analizo vpliva modeliranja, zato v tem primeru nismo posebej izvajali kontrole absolutne točnosti.

Preglednica 12: Ocenjena relativna položajna točnost generiranih 2D-obodov stavb.
Table 12: The assessed relative positional accuracy of the extracted 2D building outlines.

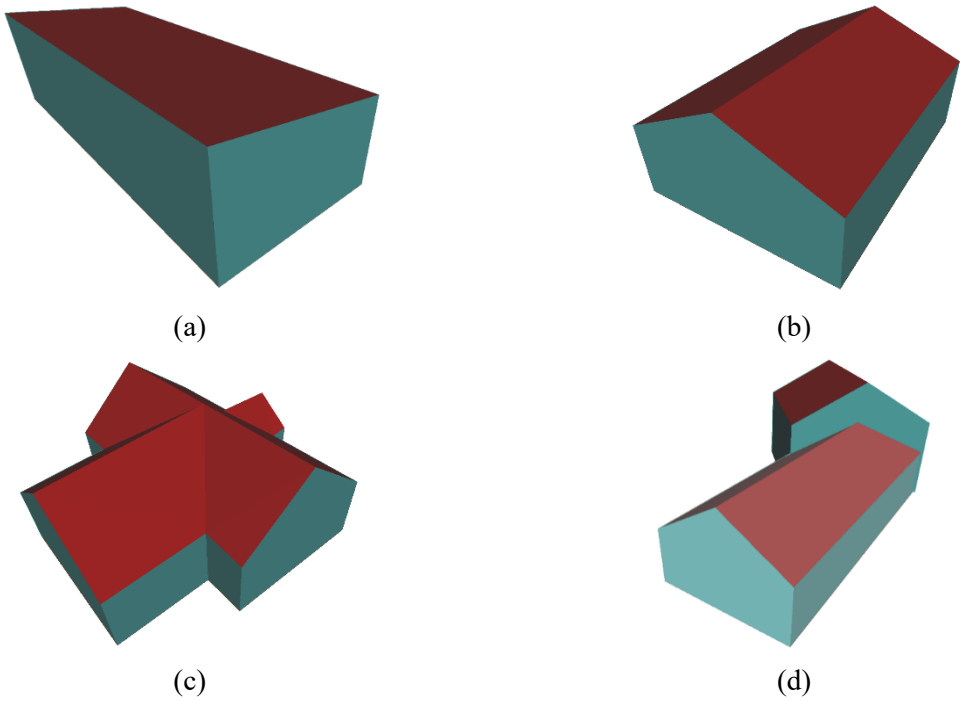
Vrsta stavbe	**Relativna položajna točnost** $RMSE_{2D}$ **[m]**
Stavba z enokapno streho	0,17
Stavba z dvokapno streho	0,11
Stavba s »križno« dvokapno streho	0,14
Stavba z dvokapno streho v dveh delih	0,13
Povprečje	**0,14**

Sledilo je 3D-modeliranje stavb, ki smo ga izvedli z enakim postopkom kot za podatke s študijskega območja Kandrše. Najprej smo za izbrane stavbe izvedli iskanje prilegajočih se 3D-ploskev z algoritmom *Efficient RANSAC,* pri čemer smo uporabili nastavitve, ki jih podajamo v nadaljevanju (preglednica 13). Vrednosti so bile določene empirično, upoštevajoč priporočila in ugotovitve, objavljene v literaturi (Malihi et al., 2018; Dreščk et al., 2020).

Preglednica 13: Nastavitve algoritma *Efficient RANSAC* za prepoznavanje ravnin v oblaku točk – Vače (glej tudi Dreščk et al., 2020).
Table 13: The parameters of the efficient RANSAC for roof patches detection – Vače (see also Dreščk et al., 2020).

Parameter	**Vrednost**
Minimalno število začetnih točk	300
Največja razdalja od ravnine	e = 0,05 m
Ločljivost vzorčenja	b = 0,10 m
Največje odstopanje normale ravnine	a = 5°
Verjetnost rešitve	90 %

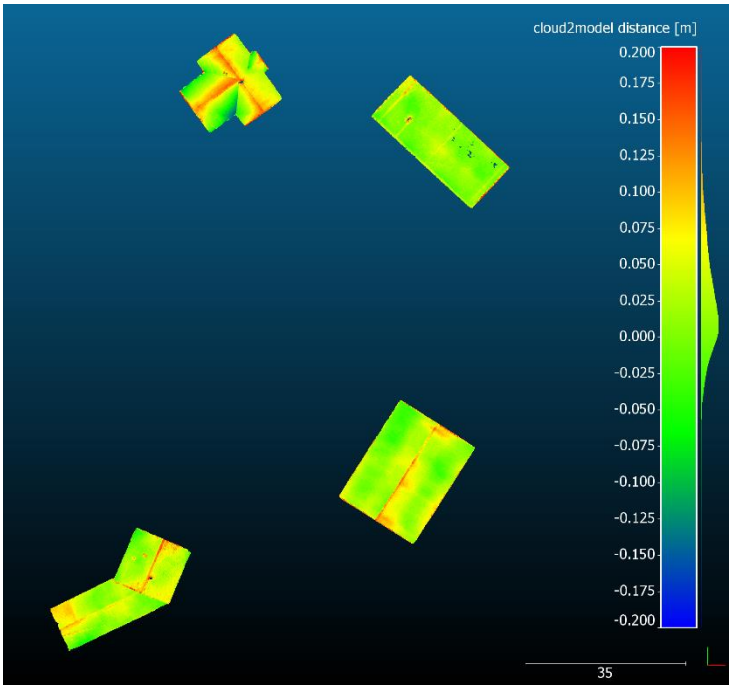
Nato smo v prostorskem ETL-okolju na podlagi prepoznanih prilegajočih se 3D-ploskev in predhodno izdelanih 2D-obodov streh rekonstruirali 3D-modele stavb. Rezultat modeliranja so bili georeferencirani topološko urejeni vektorski 3D-modeli stavb s stopnjo podrobnosti modela LOD2, skladni z določili standarda OGC CityGML (slika 47). Geometrija modelov je bila shranjena v obliki prostorninskega telesa, ki ga omejujejo robne ploskve. Ploskvam, ki sestavljajo model, smo dodali tematske podatke glede na njihovo vlogo in pomen v modelu (*RoofSurface*, *WallSurface*, *GroundSurface*).



Slika 47: Končni 3D-modeli stavb, skladni s standardom OGC CityGML (LOD2): (a) stavba z enokapno streho; (b) stavba z dvokapno streho; (c) stavba s »križno« dvokapno streho; (d) stavba z dvokapno streho v dveh nivojih (Drešček et al., 2020).

Figure 47: Final 3D building models, in accordance with the OGC CityGML standard (LOD2): (a) building with a flat roof; (b) building with a gable roof; (c) building with a cross gable roof; (d) building with a two-level gable roof (Drešček et al., 2020).

Zadnji korak v postopku modeliranja in spremljanja kakovosti je kontrola kakovosti izdelanega 3D-modela. Podobno kot za študijsko območje Kandrše smo tudi za 3D-modele, izdelane na podlagi fotogrametričnega oblaka točk s študijskega območja Vače, preverili več vidikov kakovosti prostorskih podatkov. Analizirali smo relativno položajno točnost modela glede na vhodni oblak točk ter popolnost 3D-modela in geometrično ter topološko pravilnost. Za analizo relativne položajne točnosti smo iz vhodnega oblaka točk odstranili vse detajle, ki niso bili predmet modeliranja (na primer dimnike, šum, majhne strukture na strehi), in tako »očiščen« oblak točk primerjali z izdelanimi 3D-modeli. Izračunali smo oddaljenost vsake točke v oblaku točk od 3D-modela in dobili rezultate, da so izdelani 3D-modeli od vhodnega oblaka točk oddaljeni v povprečju m_d = 0,02 m s standardnim odklonom σ_d = 0,05 m (slika 48). Iz vizualnega pregleda in izračunanih statističnih vrednosti lahko vidimo, da so položajne razlike med modelom in vhodnim oblakom točk v večini manjše od 10 centimetrov. Večje razlike so opazne pri stavbi s »križno« dvokapno streho, ki so posledica postopkov poenostavitve in regularizacije tako oboda stavbe in nadalje 3D-modela. Posamezne večje razlike modela lahko vidimo na nekaterih delih streh, ki so posledica »neravnosti« dejanskih streh. V našem postopku 3D-modeliranja stavb izdelamo model, v katerem so stavbe topološko in geometrično pravilne, strehe so določene z ravnimi ploskvami, kar je vzrok za razliko končnega modela od vhodnega oblaka točk.



Slika 48: Položajne razlike med rekonstruiranim 3D-modelom stavb in vhodnim oblakom točk na študijskem območju Vače (Dreščk et al., 2020).

Figure 48: The positional differences between the reconstructed 3D building models and the input point cloud in the study area Vače (Dreščk et al., 2020).

Na koncu smo tudi pri študijskem območju Vače vizualno preverili popolnost izdelanih modelov in njihovo skladnost s predhodno izbrano stopnjo podrobnosti in podanimi predpostavkami o končnem modelu. Ugotovili smo, da so ocenjevani 3D-modeli skladni s predhodno določenimi zahtevami in ustrezne popolnosti. Preverili smo tudi logično skladnost modelov, natančneje njihovo geometrično in topološko pravilnost. Preverjanje smo izvedli v spletni aplikaciji *val3dity* in ugotovili, da so vsi izdelani 3D-modeli geometrično ter topološko pravilni glede na določila standarda OGC CityGML in glede na privzete vrednosti kontrolnih mer (na primer sovpadanje vogalnih točk, ravnost 3D-ploskev modela).

6.3 Analiza vpliva izbranih dejavnikov na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk

V nadaljevanju predstavljamo rezultate analize vpliva posameznih izbranih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov v predlaganem postopku 3D-modeliranja stavb. V tem delu analitične raziskave smo uporabili del procesnega modela za obdelavo podatkov in spremljanje kakovosti prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk, ki se nanaša na fazo zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom. Analizirani dejavniki vpliva na kakovost so bili:

- višina leta letalnika nad terenom,
- prekrivanje fotografij in
- število oslonilnih točk.

Za vse tri dejavnike smo preverili, kako vplivajo na položajno točnost UAV-fotogrametričnega oblaka točk, ki je vhodni podatek za modeliranje.

V ta namen smo na študijskem območju Kandrše v istem dnevu izvedli tri snemalne serije s preletom letalnika, kot je opisano v poglavju 6.2.1. V vseh treh serijah smo uporabili enako snemalno opremo, snemanje je bilo izvedeno v podobnih zunanjih razmerah, snemalne serije so se med seboj razlikovale le v izbranih nastavitvah parametrov leta letalnika, ki jih ponovno navajamo v nadaljevanju (preglednica 14). Hkrati z zajemom UAV-fotografij smo izvedli terensko izmero za neodvisno določitev koordinat oslonilnih in kontrolnih točk v ciljnem koordinatnem sistemu, ki je referenčni državni koordinatni sistem (D96-17/TM, SVS2010). Točke so bile gosto in enakomerno razporejene po celotnem snemalnem območju. Vse točke so bile označene z umetnimi tarčami, njihove položaje pa smo določili s tahimetrično izmero ob navezavi na mrežo točk, ki so bile predhodno izmerjene s statično metodo GNSS-izmere.

Preglednica 14: Nastavitve parametrov leta, ki smo jih spreminjali med snemalnimi serijami.
Table 14: The parameters of UAV flight, which were altered between flight missions.

Snemalna serija	**Načrtovana višina nad terenom [m]**	**Dejanska višina nad terenom [m]**	**Prekrivanje fotografij (vzdolžno/prečno) [%]**
1. snemalna serija	35	42	80 / 70
2. snemalna serija	50	58	80 / 70
3. snemalna serija	35	42	85 / 75

Med seboj smo primerjali rezultate obdelave vseh treh serij. Absolutno položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk smo preverili tudi na podlagi analize koordinatnih razlik kontrolnih točk iz oblaka točk glede na referenčne vrednosti, določene z neodvisno terensko izmero. Analizo vpliva števila oslonilnih točk na točnost fotogrametričnega oblaka točk smo izvedli na podatkih prve snemalne serije, pri čemer smo izbrali tri različne kombinacije oslonilnih in kontrolnih točk, preko katerih smo analizirali vpliv števila oslonilnih točk na položajno točnost UAV-fotogrametričnega oblaka točk.

Podatke, zajete z daljinsko vodenim letalnikom, vseh treh snemalnih serij, v kombinaciji s podatki za georeferenciranje, smo obdelali v komercialnem programskem okolju *Agisoft Metashape Professional ver. 1.6.2.* Oblak točk smo georeferencirali enako kot pri splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti (poglavje 6.2.1).

Za analizo vpliva posameznega izbranega dejavnika na položajno kakovost prostorskih podatkov smo ocenili položajno točnost UAV-fotogrametričnega oblaka točk po izvedbi grajenja strukture iz gibanja in georeferenciranja. Položajno točnost smo ocenili na podlagi vrednosti *RMSE* na kontrolnih točkah,

saj te v nasprotju z oslonilnimi točkami niso bile uporabljene za georeferenciranje. Vrednost *RMSE* smo ocenili iz razlik med neodvisno izmerjenimi referenčnimi položaji kontrolnih točk od položajev istih točk, ki smo jih izmerili na UAV-fotografijah in predstavljajo ocenjene vrednosti.

6.3.1 Vpliv višine leta

Za analizo vpliva višine leta smo primerjali podatke iz prve in druge snemalne serije, kjer sta bili načrtovani višini leta letalnika 35 in 50 metrov. Dejanska višina leta je bila v obeh primerih nekoliko višja zaradi višinske razgibanosti izbranega študijskega območja Kandrše. V obeh primerih smo enako izvedli grajenje strukture iz gibanja in georeferenciranje oblaka točk preko izmerjenih slikovnih koordinat in podanih objektnih koordinat oslonilnih točk. Pri obdelavi obeh snemalnih serij smo upoštevali enako število in razporeditev oslonilnih ter kontrolnih točk. Posredno georeferenciranje smo izvedli na osnovi 32 oslonilnih točk, položajno točnost smo preverjali na petih kontrolnih točkah. Uporabljena je bila enaka razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk, kot smo jo predstavili v splošnem preizkusu modela za študijsko območje Kandrše (slika 34). V obeh serijah smo položaje istih oslonilnih točk uporabili pri izravnavi fotografij s snopi in v izračunu samokalibracije kamere.

Za kontrolo kakovosti georeferenciranja smo v programskem okolju *Agisoft Metashape Professional* izračunali vrednosti *RMSE* tako za položaje 32 oslonilnih točk kot za pet kontrolnih točk, kjer smo primerjali koordinate modela (slikovne koordinate) s koordinatami, določenimi na podlagi neodvisnih meritev na terenu. Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah nam povedo, kako dobro se oblak točk prilega položajem oslonilnih točk, in podajo oceno notranje kakovosti zajetih podatkov. Vrednosti *RMSE* na kontrolnih točkah pa nam povedo, kakšna je razlika položajev, ocenjenih iz georeferenciranega modela, od pravih položajev na točkah, ki niso bile uporabljene za georeferenciranje. *RMSE* na kontrolnih točkah je tako neodvisna mera absolutne položajne točnosti modela oziroma oblaka točk. Iz predstavljene literature v četrtem poglavju je že razvidno, da se model UAV-fotografij po izravnavi s snopi najbolje prilega oslonilnim točkam, z oddaljevanjem od teh točk pa prileganje pada. Prav zaradi tega je treba položajno točnost modela nadzirati v območjih, ki so znotraj snemalnega območja najbolj oddaljena od oslonilnih točk, saj je tam odstopanje največje.

Preglednica 15 vsebuje rezultate izračuna vrednosti *RMSE* za obe snemalni seriji, pri čemer prikazujemo vrednosti *RMSE* po posamezni koordinatni komponenti ter ločeno za ravninski položaj (2D) in položaj v treh razsežnostih (3D). Iz literature (Agüera-Vega, 2017b; Gindraux et al., 2017; Sanz-Ablanedo et al., 2018; Martínez-Carricondo et al., 2018) je razbrati, da je kakovost ravninskega položaja georeferenciranja bloka fotografij drugačna od višinske položajne kakovosti, kar se je izkazalo tudi v našem primeru. Vrednosti *RMSE* podajamo za oslonilne točke (OT) in kontrolne točke (KT). Dodatno

smo izračunali tudi vrednost $RMSE_{3D}$ v odvisnosti od prostorske ločljivosti vhodnih fotografij ($RMSE_{3D}/px$).

Preglednica 15: Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah (OT) in kontrolnih točkah (KT) po georeferenciranju v odvisnosti od višine snemanja.

Table 15: The *RMSE* values at ground control points and check points after georeferencing with respect to the altitude above ground level.

Snemalna serija	**Načrtovana višina leta**	**Točke (število)**	$RMSE_e$ **[cm]**	$RMSE_n$ **[cm]**	$RMSE_H$ **[cm]**	$RMSE_{2D}$ **[cm]**	$RMSE_{3D}$ **[cm]**	$RMSE_{3D}/px$ **[cm/px]**
1. serija	35 m	OT (32)	0,33	0,28	0,26	0,43	0,50	0,42
		KT (5)	0,61	0,36	0,86	0,70	**1,11**	**0,93**
2. serija	50 m	OT (32)	0,29	0,26	0,33	0,39	0,51	0,32
		KT (5)	0,74	0,37	1,55	0,83	**1,76**	**1,10**

Iz rezultatov lahko vidimo, da je bila notranja položajna točnost georeferenciranja za obe seriji podobna, saj se vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah zelo malo razlikujejo v odvisnosti od snemalne višine letalnika nad terenom. Na drugi strani je položajna točnost na kontrolnih točkah slabša v primeru uporabe fotografij, zajetih na načrtovani višini leta 50 metrov (op. dejanska povprečna višina leta nad terenom je bila 58 metrov), glede na rezultate pri uporabi fotografij, zajete na načrtovani višini leta 35 metrov (op. dejanska povprečna višina leta nad terenom je bila 42 metrov). Pričakovano smo dobili rezultate, da je pri višji snemalni višini položajna točnost georeferenciranega bloka fotografij oziroma fotogrametričnega oblaka točk slabša kot na nižji snemalni višini. Za nižjo snemalno višino je znašala vrednost $RMSE_{3D}$ na kontrolnih točkah 1,11 centimetra, medtem ko je bila za višjo snemalno višino vrednost $RMSE_{3D}$ 1,76 centimetra. Če opazujemo vrednosti *RMSE* po posameznih koordinatnih komponentah in nadalje še v 2D- ter 3D-prostoru, lahko vidimo, da se s povečanjem snemalne višine slabša predvsem točnost določitve višine H, medtem se ravninski (e, n) točnosti položaja manj razlikujeta med obema snemalnima višinama. Boljša položajna točnost na višini 35 metrov je razvidna tudi iz vrednosti $RMSE_{3D}$ v odvisnosti od prostorske ločljivosti vhodnih fotografij ($RMSE_{3D}/px$).

Na tem enostavnem primeru smo kljub relativno majhni razliki v višini leta ugotovili, da višina leta letalnika vpliva na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točka. Zaradi majhnih razlik v snemalni višini tudi razlike v položajni točnosti obeh snemalnih serij niso velike, a so opazne. Pri tem poudarjamo, da so bile tako oslonilne kot tudi kontrolne točke na terenu izmerjene z zelo visoko natančnostjo, kar je omogočilo, da smo za oceno kakovosti izhajali iz zelo natančnih položajev. Za bolj poglobljeno analizo vpliva snemalne višine na položajno točnost oblaka točk bi bilo smiselno na terenu zajeti UAV-fotografije na več različnih višinah, kot smo to storili mi. Žal smo bili na delovišču omejeni z višino

leta, saj delovišče leži na območju, kjer zaradi veljavnih predpisov z daljinsko vodenimi letalniki ni mogoče leteti višje.

6.3.2 Vpliv prekrivanja fotografij

Snemalne serije, izvedene na študijskem območju Kandrše, so se med seboj razlikovale tudi po prekrivanju med zaporednimi fotografijami. Za analizo vpliva prekrivanja fotografij na položajno točnost oblaka točk smo med seboj primerjali rezultate obdelave prve in tretje snemalne serije (preglednica 14), kjer smo razpolagali s podatki različnih prekrivanj med zaporednimi fotografijami v vzdolžni in prečni smeri leta daljinsko vodenega letalnika, povprečna višina leta nad terenom pa je bila primerljiva, in sicer približno 42 metrov. V prvi seriji je prekrivanje med sosednjimi fotografijami znašalo 80 % v vzdolžni in 70 % v prečni smeri, v tretji seriji pa je bilo prekrivanje med fotografijami nastavljeno na 85 % v vzdolžni smeri in 75 % v prečni smeri glede na smer leta letalnika. V obeh obravnavanih snemalnih serijah so bili ostali parametri leta in nastavitve snemalne opreme nastavljeni na enake vrednosti, primerljive so bile tudi zunanje (vremenske) razmere.

Obdelavo podatkovnih nizov smo izvedli v programskem okolju *Agisoft Metashape Professional.* Za posredno georeferenciranje smo pri obeh serijah uporabili enako število in enako razporeditev oslonilnih točk, pri čemer smo uporabili enako konfiguracijo oslonilnih ter kontrolnih točk, kot je bila uporabljena v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov za študijsko območje Kandrše (slika 34). Za georeferenciranje je bilo uporabljenih 32 oslonilnih točk, vpliv prekrivanja fotografij na položajno točnost georeferenciranega bloka fotografij oziroma UAV-fotogrametričnega oblaka točk smo analizirali na petih kontrolnih točkah.

Podobno kot pri analizi vpliva snemalne višine letalnika na položajno točnost oblaka točk smo tudi vpliv velikosti prekrivanja fotografij na položajno točnost oblaka točk analizirali preko vrednosti *RMSE* na kontrolnih točkah. Kot pravo vrednost smo obravnavali koordinate kontrolnih točk, ki smo jih določili na podlagi neodvisne tahimetrične izmere na terenu. Preglednica 16 vsebuje vrednosti *RMSE* po posameznih koordinatnih komponentah ter ločeno za ravninski položaj (2D) in višinsko komponento. Poleg vrednosti *RMSE* po koordinatnih komponentah, *RMSE* za oceno ravninske in višinske položajne točnosti, podajamo tudi *RMSE* za položajno točnost v treh razsežnostih, in sicer za oslonilne točke (OT) in kontrolne točk (KT). V preglednici 16 so prikazane vrednosti *RMSE* za oslonilne točke, s katerimi kontroliramo izvedbo georeferenciranja, in vrednosti *RMSE* na kontrolnih točkah, s katerimi preverjamo položajno točnost oblaka točk.

Preglednica 16: Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah (OT) in kontrolnih točkah (KT) po georeferenciranju v odvisnosti od prekrivanja fotografij.

Table 16: The *RMSE* values at ground control points and check points after georeferencing with respect to the image overlap.

Snemalna serija	**Prekrivanje fotografij (vzdolžno/prečno)**	**Točke (število)**	$RMSE_e$ **[cm]**	$RMSE_n$ **[cm]**	$RMSE_H$ **[cm]**	$RMSE_{2D}$ **[cm]**	$RMSE_{3D}$ **[cm]**
1. serija	80 % / 70 %	OT (32)	0,33	0,28	0,26	0,43	0,50
		KT (5)	0,61	0,36	0,86	0,70	**1,11**
3. serija	85 % / 75 %	OT (32)	0,35	0,31	0,35	0,47	0,58
		KT (5)	0,47	0,41	0,81	0,62	**1,02**

Izračunane vrednosti $RMSE_{3D}$ na oslonilnih točkah so v obeh serijah podobne, nekoliko večje so sicer pri tretji snemalni seriji. Kljub nekoliko večjim vrednostim *RMSE* v tretji seriji na oslonilnih točkah, kjer velja vzrok iskati v slabši točnosti določevanja koordinat oslonilnih točk na modelu (tako imenovanih slikovnih koordinat), je položajna točnost na kontrolnih točkah v tretji seriji manjša kot v prvi. Če primerjamo vrednosti $RMSE_{3D}$, izračunane na kontrolnih točkah, lahko vidimo, da je razlika v vrednostih med prvo in tretjo serijo sicer zelo majhna. Vrednost $RMSE_{3D}$ na kontrolnih točkah v tretji snemalni seriji je manjša kot v prvi seriji, kar pomeni, da ima georeferenciran blok fotografij oziroma oblak točk iz tretje serije višjo položajno točnost. Iz tega bi lahko sklepali, da večje prekrivanje med fotografijami pozitivno vpliva na položajno točnost oblaka točk. Poudarjamo pa, da je razlika v položajni točnosti med obema serijama zelo majhna, zato bi bilo za podrobnejšo analizo vpliva prekrivanja fotografij na položajno točnost oblaka točk smiselno upoštevati podatkovne nize, ki imajo več različnih vrednosti prekrivanja. Razlog za zelo majhne razlike v položajni točnosti v našem primeru je iskati tudi v dejstvu, da smo že v prvi snemalni seriji uporabili razmeroma visoko prekrivanje med sosednjimi fotografijami, ki je omogočilo izdelavo kakovostnega oblaka točk. Hkrati pa je bilo v tretji snemalni seriji uporabljeno le za 5 % večje prekrivanje v posamezni smeri, s katerim je bilo težko doseči bistveno izboljšanje v položajni točnosti oblaka točk.

6.3.3 Vpliv števila oslonilnih točk

V analizi položajne točnosti oblaka točk smo nadalje preverili, kako različno število oslonilnih točk vpliva na položajno točnost oblaka točk. Analizo smo izvedli na istem podatkovnem nizu UAV-fotografij kot v prvih dveh primerih, in sicer smo uporabili podatkovni niz prve serije snemanja na območju Kandrše, le v kasnejši obdelavi smo za georeferenciranje fotogrametričnega oblaka točk uporabili različno število oslonilnih točk (preglednica 14). V obravnavani snemalni seriji so bile UAV-fotografije zajete na načrtovani višini leta 35 metrov, z vzdolžnim in prečnim prekrivanjem fotografij

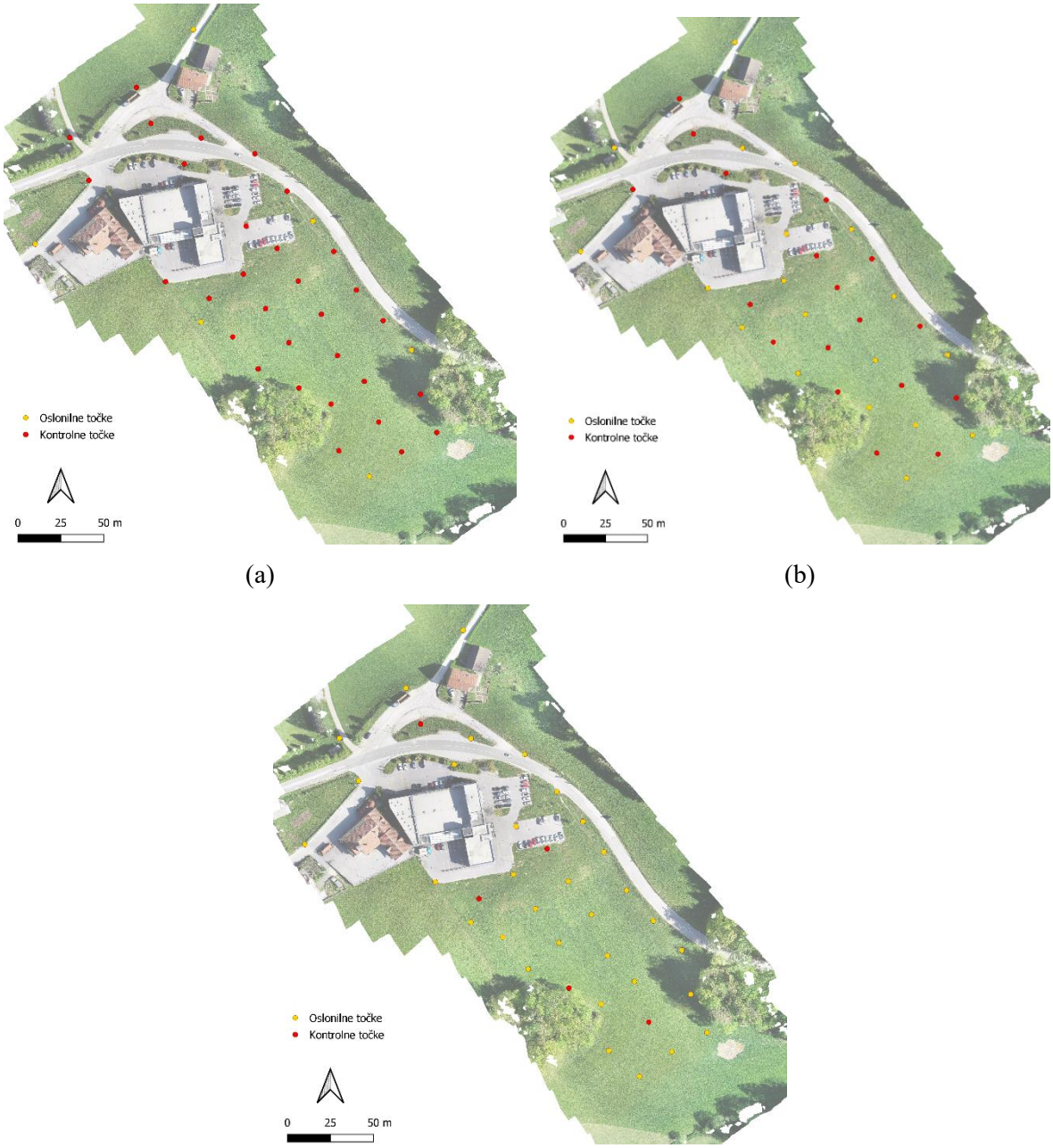
glede na smer leta letalnika v velikosti 80 % oziroma 70 %. Na terenu smo z umetnimi tarčami označili skupno 37 točk, ki smo jih v obdelavi obravnavali bodisi kot oslonilne točke bodisi kot kontrolne točke. Vse točke smo izmerili enako, s tahimetrično metodo izmere in z navezo na mrežo, ki je bila predhodno vzpostavljena s statično metodo GNSS-izmere, kar je omogočilo določitev položajev točk mreže z visoko natančnostjo (σ_e = 2,8 mm, σ_n = 2,6 mm σ_H = 3,3 mm).

Analizo vpliva števila oslonilnih točk na položajno točnost oblaka točk smo izvedli tako, da smo pri obdelavi UAV-fotografij v postopku georeferenciranja upoštevali tri različne razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk, za katere smo ločeno izvedli obdelavo (preglednica 17, slika 49). V prvem primeru razporeditve točk smo uporabili 6 oslonilnih točk, ki so bile razporejene le po robu študijskega območja, preostalih 31 točk smo obravnavali kot kontrolne točke, preko katerih smo nadzirali položajno točnost oblaka točk. V drugem primeru razporeditve točk smo uporabili 19 oslonilnih točk, ki so bile tako na robu območja kot tudi v njegovi notranjosti, položajno točnost oblaka točk smo preverjali na 18 kontrolnih točkah. V tretjem primeru razporeditve točk pa smo oblak točk georeferencirali na podlagi danih položajev 32 oslonilnih točk, ki so bile zelo gosto razporejene po celotnem snemalnem območju, položajno točnost oblaka točk pa smo analizirali na petih kontrolnih točkah.

Preglednica 17: Število oslonilnih točk (OT) in kontrolnih točk (KT), ki so bile uporabljene v analizi položajne točnosti oblaka točk.

Table 17: Number of ground control points (GCPs) and check points (CPs) used in the analysis of the positional accuracy of the point cloud.

Razporeditev	**Število oslonilnih točk (OT)**	**Število kontrolnih točk (KT)**
1. primer razporeditve točk	6	31
2. primer razporeditve točk	19	18
3. primer razporeditve točk	32	5



Slika 49: Število in razporeditev oslonilnih točk (OT) ter kontrolnih točk (KT) na študijskem območju Kandrše: (a) 1. primer razporeditve: 6 OT, 31 KT; (b) 2. primer razporeditve: 19 OT, 18 KT; (c) 3. primer razporeditve: 32 OT, 5 KT.

Figure 49: The number and distribution of ground control points (GCPs) and check points (CPs) in the study area Kandrše: (a) 1st configuration: 6 GCPs, 31 CPs; (b) 2nd configuration: 19 GCPs, 18 CPs; (c) 3rd configuration: 32 GCPs, 5 CPs.

Vse tri obdelave smo izvedli v programskem okolju *Agisoft Metashape Professional,* in sicer po postopku, ki je opisan v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti za študijsko območje Kandrše (poglavje 6.2.1), in skladno s procesnimi koraki obdelave UAV-fotogrametrije, kot so opisani v poglavju 2.2.3. Za vsako razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk smo v postopku grajenja strukture iz gibanja in v izravnavi fotografij s snopi v sklopu georeferenciranja izvedli tudi samokalibracijo

kamere, s katero smo na podlagi danih oslonilnih točk določili parametre notranje orientacije uporabljenega fotoaparata.

Položajno točnost georeferenciranega fotogrametričnega oblaka točk v odvisnosti od števila oslonilnih točk smo analizirali na podlagi vrednosti *RMSE* na kontrolnih točkah. Kot pravo oziroma referenčno vrednost smo upoštevali koordinate točk, določene na podlagi izmere na terenu, na georeferenciranem modelu pa smo določili tako imenovane modelne koordinate teh istih točk. Preglednica 18 prikazuje rezultate izračuna položajne točnosti georeferenciranega oblaka točk za posamezno razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk. Vrednosti *RMSE* so podane po posamezni koordinatni komponenti ter v 2D- in 3D-smislu.

Preglednica 18: Vrednosti *RMSE* na oslonilnih točkah (OT) in kontrolnih točkah (KT) po georeferenciranju v odvisnosti od števila oslonilnih točk.

Table 18: The *RMSE* values at ground control points and check points after georeferencing with respect to the number of ground control points.

Razporeditev	**Število točk**	$RMSE_e$ **[cm]**	$RMSE_n$ **[cm]**	$RMSE_H$ **[cm]**	$RMSE_{2D}$ **[cm]**	$RMSE_{3D}$ **[cm]**
1. primer razporeditve	6 OT	0,36	0,41	0,14	0,54	0,57
	31 KT	0,64	0,70	1,84	0,95	**2,07**
2. primer razporeditve	19 OT	0,42	0,33	0,21	0,53	0,57
	18 KT	0,48	0,53	1,20	0,71	**1,40**
3. primer razporeditve	32 OT	0,37	0,34	0,32	0,50	0,60
	5 KT	0,53	0,19	0,89	0,57	**1,05**

Na podlagi vrednosti $RMSE_{3D}$ na oslonilnih točkah lahko vidimo, da so razlike v vrednostih $RMSE_{3D}$ med vsemi tremi obdelavami zelo majhne, in sicer le 0,03 centimetra, kar kaže na kakovosten blok fotografij in kakovostno georeferenciranje oblaka točk na temelju danih koordinat oslonilnih točk v ciljnem koordinatnem sistemu. Pri analizi absolutne položajne točnosti georeferenciranega oblaka točk ugotavljamo, da je položajna točnost odvisna od števila oslonilnih točk. Ko smo uporabili zgolj šest oslonilnih točk za georeferenciranje, je znašala absolutna položajna točnost oblaka točk 2,07 centimetra. V drugem primeru razporeditve oslonilnih točk, ko smo za georeferenciranje uporabili 19 oslonilnih točk, se je položajna točnost oblaka točk precej izboljšala in je znašala 1,40 centimetra. V tretjem primeru razporeditve oslonilnih točk smo upoštevali največje število oslonilnih točk, skupno kar 32 točk, s čimer se je položajna točnost oblaka točk še dodatno izboljšala, in sicer je znašala 1,05 centimetra. Iz tega lahko potrdimo, da število oslonilnih točk vpliva na položajno točnost oblaka

točk. Rezultati so pokazali, da večje, kot je število uporabljenih oslonilnih točk za georeferenciranje, boljša je absolutna položajna kakovost oblaka točk.

V vseh treh primerih razporeditve oslonilnih točk in rezultatih obdelave podatkov lahko vidimo, da je ravninska točnost ($RMSE_e$, $RMSE_n$) višja kot višinska točnost ($RMSE_H$). Izboljšanje položajne točnosti oblaka točk z vidika dodajanja novih oslonilnih točk je najočitnejše v višinski komponenti *H*, medtem ko se ravninska točnost izboljšuje manj izrazito. Iz tega lahko potrdimo ugotovitve drugih raziskovalcev, ki so dokazali, da vključitev dodatnih oslonilnih točk v sredino študijskega območja pozitivno vpliva na položajno točnost oblaka točk, predvsem se zmanjša učinek kupole oziroma točnost v višinski komponenti (Gerke in Przybilla, 2016; Sanz-Ablanedo et al., 2018). Dodatno lahko vidimo, da se položajna točnost oblaka točk z dodajanjem novih oslonilnih točk ne izboljšuje linearno. V drugem primeru razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk smo uporabili 13 oslonilnih točk več kot v prvi, pri čemer se je vrednost $RMSE_{3D}$ zmanjšala za 0,67 centimetra. V tretjem primeru razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk smo uporabili še dodatnih 13 oslonilnih točk, pri čemer se je vrednost $RMSE_{3D}$ ponovno zmanjšala, vendar le za 0,35 centimetra. Pri načrtovanju števila in razporeditve oslonilnih točk moramo seveda tudi upoštevati, da je najvišja možna dosežena absolutna položajna točnost fotogrametričnega oblaka pogojena tako z natančnostjo merjenja slikovnih koordinat oslonilnih točk na UAV-fotografijah, to je s prostorsko ločljivostjo, kot tudi z natančnostjo določitve absolutnega položaja oslonilnih točk na terenu.

Na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk, tako v ravninskem kot višinskem smislu, ne vpliva zgolj število oslonilnih točk, ampak tudi njihova razporeditev. V predstavljenem preizkusu nismo podrobno preverjali vpliva razporeditve oslonilnih točk na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk, razen za primer obdelave brez oslonilnih točk v notranjosti snemalnega območja. Z dodatnimi analizami bi lahko preverjali lokalno položajno točnost v posameznih delih snemalnega območja in odvisnost položajne točnosti oblaka točk od oddaljenosti do najbližje oslonilne točke. Na podlagi dosedanjih znanstvenih objav (Tonkin in Midgley, 2016; Gindraux et al., 2017) je namreč mogoče domnevati, da ima tudi razporeditev oslonilnih točk vpliv na položajno točnost oblaka točk, zato je treba zagotoviti enakomerno in dovolj gosto razporeditev oslonilnih točk na robu ter v notranjosti snemalnega območja, kar smo sicer pri naših eksperimentih upoštevali.

6.4 Analiza vpliva izbranih dejavnikov na kakovost 3D-modela stavb

V nadaljnji analizi vpliva izbranih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov v postopku 3D-modeliranja stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk smo preverili, ali imajo obravnavani dejavniki iz faze zajema podatkov vpliv na kakovost končnega 3D-modela stavbe. Pri tem smo se osredotočili na vpliv višine leta letalnika nad terenom in prekrivanje fotografij, ki ju kot parametra leta letalnika

izberemo v fazi zajema podatkov. Preveriti smo želeli, kako ta dva parametra leta vplivata na geometrično točnost in pravilnost končnega 3D-modela stavbe. Iz objav v literaturi (poglavje 4.1) in iz lastnih preizkusov (poglavje 6.3) lahko potrdimo, da imata ta dva dejavnika vpliv na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk. Nadalje nas je zanimalo, kako izbrana dejavnika vplivata na kakovost rezultatov, ki jih pridobimo s koraki nadaljnje obdelave fotogrametričnega oblaka točk in 3D-modeliranja stavb.

Analizo vpliva višine leta in prekrivanja fotografij na kakovost 3D-modelov stavb smo izvedli na prostorskih podatkih, zajetih na študijskem območju Kandrše. Uporabljeni so bili isti podatkovni nizi, kot smo jih uporabili za analizo položajne točnosti fotogrametričnega oblaka točk (poglavji 6.3.1 in 6.3.2), kjer so se uporabljeni podatkovni nizi med seboj razlikovali v nastavitvah parametrov leta letalnika, natančneje v načrtovani višini leta letalnika nad terenom in velikosti prekrivanja med sosednjimi fotografijami v vzdolžnem in prečnem smislu glede na smer leta letalnika. Georeferenciranje obravnavanih oblakov točk smo izvedli enako, to je posredno preko znanih položajev oslonilnih točk. V vseh primerih smo uporabili isto število in razporeditev oslonilnih točk, to je 32 oslonilnih točk, obdelava UAV-fotografij in georeferenciranje sta bila za vse podatkovne nize izvedena v komercialnem programskem okolju *Agisoft Metashape Professional*.

Za namene 3D-modeliranja stavb smo uporabili le del oblaka točk, in sicer severni del študijskega območja Kandrše, kjer stojita stanovanjska hiša in gospodarski objekt. Iz posameznega oblaka točk z izbrano nastavitvijo parametra leta smo za stanovanjsko hišo in gospodarski objekt izdelali georeferencirani vektorski 3D-model stavbe. Vse 3D-modele stavb smo izdelali po predlaganem procesnem modelu (glej tudi Dreščeket al., 2020) in je podrobneje predstavljen v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti (poglavje 6.2). V postopku so bile uporabljene enake vrednosti parametrov algoritmov modeliranja, kot so bile uporabljene v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti na študijskem območju Kandrše (poglavje 6.2.1).

Za oceno kakovosti rekonstruiranih 3D-modelov stavb smo te primerjali z referenčnimi modeli, ki smo jih izdelali na podlagi neodvisnih opazovanj. Tako pri analizi vpliva snemalne višine kot pri analizi vpliva prekrivanja fotografij na položajno točnost 3D-modela stavb smo uporabili ista referenčna modela, kot smo ju uporabili v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti na študijskem območju Kandrše (poglavje 6.2.1). Oceno vpliva izbranih dejavnikov na kakovost izdelanih modelov smo izvedli enako, kot smo v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti analizirali absolutno položajno točnost 3D-modela, in sicer smo izračunali položajne razlike med ocenjevanim in referenčnim 3D-modelom stavb. Najprej smo iz ocenjevanega 3D-modela generirali nov oblak točk z enakomerno gostoto 20 točk/m^2, ki je celovito opisoval obliko rekonstruiranega modela. Nato smo za vsako točko v novo generiranem oblaku točk izračunali oddaljenost od referenčnega modela. Tako smo preverili, ali

in koliko izbrani dejavnik vpliva na geometrično točnost in pravilnost vektorskega 3D-modela stavb. Pri tem smo se omejili zgolj na izdelavo 3D-modelov stavb z izbranim postopkom za 3D-modeliranje, kot je predlagano v tej doktorski disertaciji (glej tudi Drešček et al., 2020).

6.4.1 Vpliv višine leta

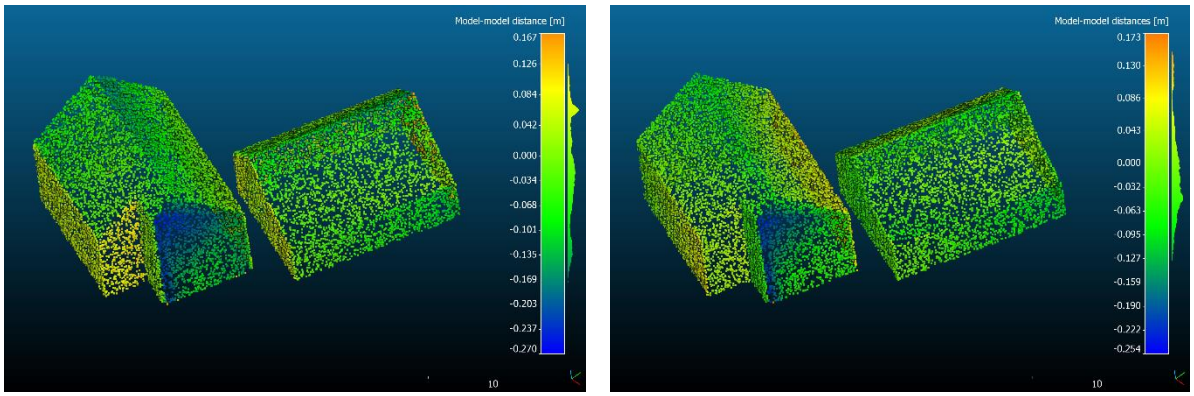
Za analizo vpliva višine leta letalnika na kakovost 3D-modela stavbe smo uporabili dva fotogrametrična oblaka točk, ki smo ju izdelali na podlagi UAV-podatkov, zajetih na študijskem območju Kandrše. Prvi oblak točk smo izdelali iz UAV-fotografij, ki smo jih zajeli v prvi snemalni seriji, ko je bila načrtovana snemalna višina 35 metrov, povprečna višina leta nad terenom pa je bila 42 metrov. Drugi oblak točk je bil izdelan iz UAV-fotografij iz druge snemalne serije, pri kateri smo načrtovali snemalno višino 50 metrov, povprečna višina leta nad terenom pa je bila 58 metrov. V obeh snemalnih serijah je bilo načrtovano prekrivanje med fotografijami 80 % vzdolžno in 70 % prečno glede na smer leta letalnika. Za oba obravnavana oblaka točk smo nato izvedli enak postopek 3D-modeliranja, v katerem smo izdelali 3D-model stavbe za stanovanjsko hišo in gospodarski objekt. Rezultat modeliranja za vsako stavbo je bil georeferenciran vektorski 3D-model, ki ustreza stopnji podrobnosti LOD2 glede na določila standarda OGC CityGML.

Vhodna fotogrametrična oblaka točk za 3D-modeliranje sta se med seboj razlikovala torej predvsem zaradi različne snemalne višine, na kateri so bile zajete UAV-fotografije, medtem ko so bili ostali parametri leta enaki. Za oba podatkovna niza smo uporabili enake postopke obdelave in nastavitve parametrov modeliranja. Vpliv snemalne višine na točnost in pravilnost izdelanih 3D-modelov stavb smo preverili tako, da smo rekonstruiran oziroma ocenjevan 3D-model, ki smo ga izdelali iz posameznega oblaka točk, pridobljenega iz fotografij, zajetih na izbrani višini leta letalnika, primerjali z referenčnim 3D-modelom za obe izbrani stavbi. Rezultat so bile izračunane položajne razlike med obema modeloma (slika 50), za katera smo izračunali tudi srednjo vrednost, standardni odklon in 99. centil absolutne vrednosti razlik med modeloma (preglednica 19).

Preglednica 19: Statistične ocene položajnih razlik med rekonstruiranim in referenčnim modelom v odvisnosti od snemalne višine.

Table 19: The statistic assessment of distances between reconstructed and reference 3D-models with respect to the flight altitude.

Snemalna serija	**Višina leta letalnika nad terenom [m]**	**Srednja vrednost razlik [m]**	**Standardni odklon razlik [m]**	**99. centil abs. vrednost razlik [m]**
1. serija	35	–0,03	0,08	0,21
2. serija	50	–0,01	0,06	0,17



(a) (b)

Slika 50: Položajne razlike rekonstruiranih 3D-modelov od referenčnih modelov: (a) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij z načrtovane višine 35 metrov; (b) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij z višine 50 metrov.

Figure 50: Positional deviations between the reconstructed 3D models and reference models: (a) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery at the planned fight altitude 35 m; (b) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery at the fight altitude 50 m.

Če vizualno primerjamo oba modela, lahko vidimo, da smo v obeh primerih dobili podobne položajne razlike. Obakrat se streha ocenjevanih modelov dobro prilega referenčnemu modelu (točke na strehi so obarvane zeleno). Razlike na zidovih so večje, kar se kaže v modrih in oranžnih odtenkih točk (slika 50). Vidimo lahko, da so razlike nekoliko večje pri prvem modelu (slika 50a), ko smo uporabili fotogrametrični oblak točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij z načrtovano snemalno višino 35 metrov. Prav tako se je izkazalo, da so pri modelu iz prve snemalne serije razlike manj enakomerno razporejene okoli srednje vrednosti, kar lahko vidimo iz histograma izračunanih razlik na sliki 50. V splošnem sta oba ocenjevana modela prostorsko gledano manjša od referenčnega modela, na kar kaže negativna srednja vrednost izračunanih razlik. Pri prvem modelu so razlike nekoliko bolj razpršene, saj je njihov standardni odklon višji. Večje razlike prvega modela od referenčnega modela v primerjavi z drugim modelom potrjuje tudi vrednost 99. centila absolutne vrednosti razlike. Razlog je mogoče iskati v dejstvu, da pri drugem modelu zidovi bolje sovpadajo z referenčnim modelom, kar je posledica točnosti izdelanega oboda stavbe. Kot smo videli v poglavju 6.3.1, sta se vhodna oblaka točk med seboj razlikovala v položajni točnosti, kjer je bil prvi oblak točnejši od drugega, vendar je bila razlika zelo majhna. Glede na naše rezultate 3D-modeliranja ne moremo trditi, da lahko ob uporabi izbranega postopka 3D-modeliranja iz fotogrametričnega oblaka točk opazimo razliko v obliki 3D-modela, ki bi bila posledica razlike v snemalni višini pri zajemu UAV-fotografij. Pri tem seveda moramo vedeti, da sta višini primerljivi, za sklepne ugotovitve bi morali imeti tudi podatkovne nize snemanj na višjih višinah. V našem primeru se kaže, da je razlika v geometrični pravilnosti izdelanega 3D-modela bolj podvržena vplivu uporabljene metode 3D-modeliranja. Pri izbranem postopku 3D-modeliranja v koraku prepoznavanja stavb iz celotnega oblaka točk izločimo tiste točke, ki opisujejo stavbe in določajo potek roba strehe. Ta korak in nadaljnji postopek izdelave, generalizacije in regularizacije 2D-oboda določi

položaj in obliko obrisa strehe, kar neposredno vpliva na položaj zidov v 3D-modelu. Pri modelu iz druge snemalne serije (slika 50b) je postopek izdelave oboda z regularizacijo povzročil nekoliko večji obod, kar je vplivalo, da so zidovi izdelanega 3D-modela stavbe v povprečju manj odstopali od referenčnega modela kot 3D-model, izdelan iz oblaka točk iz prve snemalne serije.

6.4.2 Vpliv prekrivanja fotografij

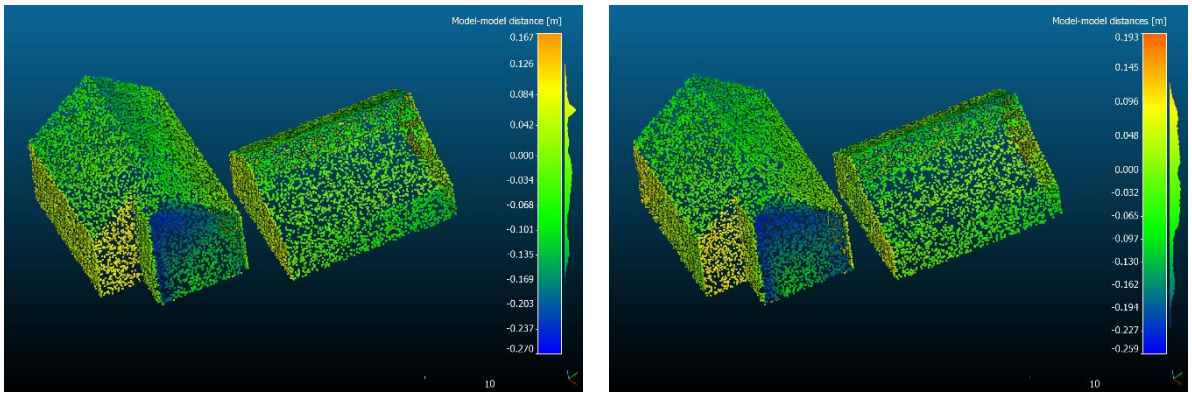
Podobno, kot smo analizirali vpliv snemalne višine, smo preverili tudi vpliv velikosti prekrivanja fotografij na kakovost 3D-modela stavb. Tudi v tem primeru smo kot vhodni podatek izbrali dva fotogrametrična oblaka točk s študijskega območja Kandrše, ki sta se med seboj razlikovala zgolj v velikosti prekrivanja med zaporednimi fotografijami, ostali parametri so bili enaki. Uporabili smo fotogrametrična oblaka točk, kot smo ju analizirali v poglavju 6.3.2, ko smo testirali položajno točnost oblaka točk v odvisnosti od prekrivanja fotografij (preglednica 14). Uporabili smo oblak točk iz prve snemalne serije, ko je bilo prekrivanje med fotografijami nastavljeno na 80 % vzdolžno in 70 % prečno na smer leta letalnika. Drugi oblak točk je bil izdelan iz UAV-fotografij iz tretje snemalne serije, ko smo uporabili prekrivanje 85 % v vzdolžni in 75 % v prečni smeri. V obeh primerih je bila načrtovana višina leta 35 metrov s povprečno dejansko višino leta nad terenom približno 42 metrov. Oba obravnavana oblaka točk smo uporabili v nadaljnjem postopku 3D-modeliranja stavb, na koncu pa smo analizirali geometrično točnost in pravilnost izdelanih 3D-modelov stavb v odvisnosti od prekrivanja fotografij.

Vpliv velikosti prekrivanja fotografij na geometrično pravilnost izdelanega 3D-modela smo analizirali na podlagi primerjave z referenčnim 3D-modelom stavb, kot smo to naredili v analizi vpliva višine leta na kakovost 3D-modela stavb (poglavje 6.4.1). Referenčni model je bil obravnavan kot točen, zato smo kot merilo za oceno kakovosti 3D-modelov izračunali položajne razlike med ocenjevanim in referenčnim modelom. Rezultati ocene geometrične pravilnosti modelov v odvisnosti od prekrivanja fotografij so prikazani v nadaljevanju (preglednica 20, slika 51).

Preglednica 20: Statistične ocene odstopanj med rekonstruiranim in referenčnim modelom v odvisnosti od prekrivanja med fotografijami.

Table 20: The statistical assessment of distances between reconstructed and reference 3D-models with respect to the image overlap.

Snemalna serija	**Prekrivanje fotografij (prečno/vzdolžno)**	**Srednja vrednost odstopanj [m]**	**Standardni odklon odstopanj [m]**	**99. centil abs. vred. odstopanja [m]**
1. serija	80 % / 70 %	–0,03	0,08	0,21
3. serija	85 % / 75 %	–0,03	0,08	0,21



(a) (b)

Slika 51: Položajna odstopanja rekonstruiranih 3D-modelov od referenčnih modelov: (a) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij s prekrivanjem 80 %/70 %; (b) 3D-model iz oblaka točk, ki smo ga izdelali iz UAV-fotografij s prekrivanjem 85 %/75 %.

Figure 51: Positional deviations between the reconstructed 3D-models and reference models: (a) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery with overlap 80 %/70 %; (b) 3D model from the point cloud obtained from UAV imagery with overlap 85 %/75 %.

Z vizualnim pregledom obeh modelov stavb ter na podlagi rezultatov primerjave modelov z referenčnima modeloma (slika 51) lahko vidimo, da ni bistvene razlike v položaju in obliki rekonstruiranih modelov glede na prekrivanje med fotografijami. To potrjujeta tudi srednja vrednost in standardni odklon odstopanj med ocenjevanima ter referenčnima modeloma. Enaki sta tudi vrednosti 99. centila absolutnih vrednosti odstopanj za oba modela, kar pomeni, da je v obeh primerih 99 % vseh odstopanj manjših od 21 centimetrov. Kot smo videli že v poglavju 6.3.2, se položajna točnost oblakov točk ni bistveno razlikovala med obema serijama z različnim vzdolžnim in prečnim preklopom. Tudi pri rekonstrukciji 3D-modelov stavb se kljub različnemu prekrivanju fotografij geometrična kakovost modelov ne razlikuje bistveno. Odstopanja rekonstruiranih modelov stavb iz fotogrametričnega oblaka točk od referenčnih modelov so v obeh primerih, to je za obe seriji, podobne velikosti in predznaka. Na podlagi izračunane srednje vrednosti odstopanj ocenjevanih modelov od referenčnega modela lahko vidimo, da sta oba ocenjevana modela nekoliko manjša od referenčnega modela. To je najbolj opazno pri zidovih, kjer so odstopanja obarvana modro. Razlog za to je postopek 3D-modeliranja, ko pri prepoznavanju stavb in generiranju 2D-oboda stavbe odstranimo del točk, ki ležijo na robu strehe, saj je tam vrednost spremenljivosti oblike površja višja od tistih v notranjosti ravnih površin strehe. K višjim odstopanjem dodatno prispevajo predpostavke za poenostavitev in regularizacijo modela, ki ju izvedemo tako v postopku generiranja oboda stavbe za zagotavljanje pravih kotov med stranicami kot tudi pri rekonstrukciji strehe modela, za katero predvidimo, da je opisana z ravnimi ploskvami, ki omejujejo model. Na drugi strani smo referenčni model izdelali neposredno iz značilnih točk stavbe, zato oblika 3D-modela ne upošteva posplošitev oboda stavbe in oblik delov strehe, kot je izvedeno pri rekonstrukciji stavbe na osnovi fotogrametričnega oblaka točk. Glede na dobljene rezultate ne moremo trditi, da prekrivanje med fotografijami bistveno vpliva na obliko izdelanega 3D-modela ob uporabi izbranega postopka 3D-modeliranja, če se zagotavlja priporočena vrednost preklopa med sosednjimi

fotografijami, kot je že izpostavljeno v pregledu literature. Večji vpliv na geometrično točnost izdelanih modelov ima postopek modeliranja in predpostavke za posplošitev oblik izdelanega modela.

6.4.3 Analiza vpliva gostote oblaka točk na določitev oboda stavbe

V predlaganem postopku 3D-modeliranja stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk se je izkazalo, da je določitev oboda stavbe izredno pomembna za kakovosten 3D-model stavb. Pri prepoznavanju stavb in določitvi 2D-oboda vidimo, da na kakovost vplivajo lastnosti in kakovost vhodnih podatkov ter uspešnost, zanesljivost in robustnost uporabljenih metod za izvedbo tega koraka. V nadaljevanju smo posebej analizirali vpliv gostote oblaka točk na kakovost določitve oboda stavbe, saj se v praksi pogosto pojavi zahteva po hitrejši obdelavi množice podatkov, kar lahko med drugim dosežemo z redkejšim oblakom točk. Gostota oblaka točk je seveda pogojena že z višino leta in z njo povezano prostorsko ločljivostjo pri danem optičnem senzorju. V nadaljevanju predstavljamo rezultate analize vpliva gostote oblaka točk na položajno točnost in geometrijsko pravilnost 2D-oboda stavbe, ki ga določimo iz fotogrametričnega oblaka točk. Za določitev oboda stavbe smo uporabili postopek, predstavljen v poglavju 6.2 (glej tudi Drešček et al., 2020). Kot vhodni podatek za navedeno analizo smo uporabili fotogrametrični oblak točk, ki smo ga izdelali na osnovi UAV-fotografij, zajetih na študijskem območju Vače. Uporabljen je bil isti podatkovni niz kot v splošnem preizkusu modela za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov na študijskem območju Vače (poglavje 6.2.2). Analizo vpliva gostote oblaka točk na kakovost določitve oboda stavbe smo omejili na del študijskega območja, in sicer smo analizirali položajno točnost 2D-oboda stavbe z dvokapno streho (slika 52).



Slika 52: Izbrana stavba za analizo položajne točnosti izdelanega 2D-oboda stavbe.
Figure 52: The selected building for the analysis of the positional accuracy of the extracted 2D building outline.

Ker smo želeli pri analizi vpliva gostote oblaka točk na točnost določitve oboda stavbe odstraniti oziroma čim bolj zmanjšati vpliv ostalih dejavnikov, ki vplivajo na položajno točnost izdelanega oboda stavbe, smo kot vhodni podatek vzeli del fotogrametričnega oblaka točk, ki pripada izbrani stavbi, in sicer smo ga ročno izločili iz celotnega oblaka točk z izbranega študijskega območja. S tem smo izločili vpliv morebitnih napak pri segmentaciji oblaka točk. Ker so bile za izdelavo oblaka točk uporabljene samo nadirne UAV-fotografije, so bile točke v oblaku točk prisotne le na strehi, na zunanjih stenah ni bilo točk ali pa so bile prisotne izjemoma. Za nadaljnjo obdelavo in izdelavo oboda smo uporabili točke, ki določajo streho izbrane stavbe, ostale elemente v okolici in morebiten šum smo odstranili, s čimer smo pridobili »očiščen« oblak točk.

Vpliv gostote oblaka točk na kakovost določitve oboda stavbe smo analizirali na podlagi rezultatov generiranih obodov stavbe, kjer smo uporabili oblak točk z različno gostoto. Ker smo fotogrametrični oblak točk izdelali z algoritmi gostega slikovnega ujemanja, je bila gostota vhodnega oblaka točk zelo visoka, saj so bile točke med seboj oddaljene zgolj 1 centimeter ali celo manj (prostorska ločljivost). Za obravnavano analizo smo vhodni očiščen oblak točk izbrane stavbe zredčili na različne gostote. V odprtokodnem programskem okolju *CloudCompare ver. 2.11* (CloudCompare, 2020) smo z orodjem *Subsample* iz originalnega oblaka točk ustvarili več oblakov točk z različnimi gostotami, pri čemer smo uporabili metodo *Space*, s katero točke iz oblaka točk odstranimo na podlagi minimalne razdalje med njimi, da oddaljenost med točkami ni manjša od podane dolžine. V praksi se za opis oblaka točk pogosto uporablja izraz gostota oblaka točk. Če poznamo vrednost oddaljenosti med točkami, lahko izračunamo gostoto oblaka točk, ki jo izrazimo kot število točk na površinsko enoto (na primer število točk/m^2). Za izračun uporabimo enačbo (6) (ASPRS, 2015):

$$NPD = \frac{1}{NPS^2}, \tag{6}$$

kjer je *NPD* nominalna vrednost gostote oblaka točk (angl. *nominal point density*), *NPS* pa nominalna oddaljenost med točkami v oblaku točk (angl. *nominal point spacing*).

V analizi smo oblak točk redčili na osnovi razdalj med točkami. Za lažjo predstavo smo na podlagi enačbe (6) izračunali, koliko znaša teoretična gostota oblakov točk/m^2 (preglednica 22). Izraz teoretična gostota je uporabljen zato, ker smo redčenje oblaka točk izvajali preko podane minimalne razdalje med točkami, kar pomeni, da je bila lahko dejanska oddaljenost med točkami tudi večja od izbrane dolžine, posledično je gostota lahko nižja. Z zgoraj opisanim postopkom smo izdelali šest oblakov točk z različnimi gostotami, in sicer so bile minimalne razdalje med točkami 1 centimeter, 2,5 centimetra, 5 centimetrov, 10 centimetrov, 20 centimetrov in 31,6 centimetra. Zadnji oblak točk, v katerem so bile točke med seboj oddaljene najmanj 31,6 centimetra oziroma z gostoto 10 točk /m^2, je bil izdelan zato,

ker je to povprečna gostota oblakov točk, zajetih z ALS za urbana območja, ki se pogosto uporabijo za 3D-modeliranje stavb, seveda pa je zmogljivost zajema podatkov neprimerljiva s projekti, kjer se podatki zajemajo z daljinsko vodenimi letalniki.

Ko smo izdelali šest različnih oblakov točk za izbrano stavbo, smo po že predstavljenem postopku (poglavje 6.2, glej tudi Drešček et al., 2020) izdelali 2D-obod stavbe, ki opisuje zunanji obod strehe v 2D-ravnini. Preglednica 21 vsebuje vrednosti parametrov posameznih korakov v prostorskem ETL, ki smo jih določili pred začetkom izdelave 2D-oboda stavbe iz oblaka točk v okolju FME. Vrednosti so bile izbrane izkustveno, prilagojene lastnostim uporabljenih podatkov in obravnavane stavbe (glej tudi Drešček et al., 2020).

Preglednica 21: Parametri, uporabljeni za generiranje obodov za izbrano stavbo.
Table 21: Parameters used for building outline extraction for selected building.

Parameter	**Vrednost [m]**
Vrednost alfa	0,40–0,50
Toleranca poenostavitve	0,20
Toleranca regularizacije	0,25
Podrobnost regularizacije	0,05

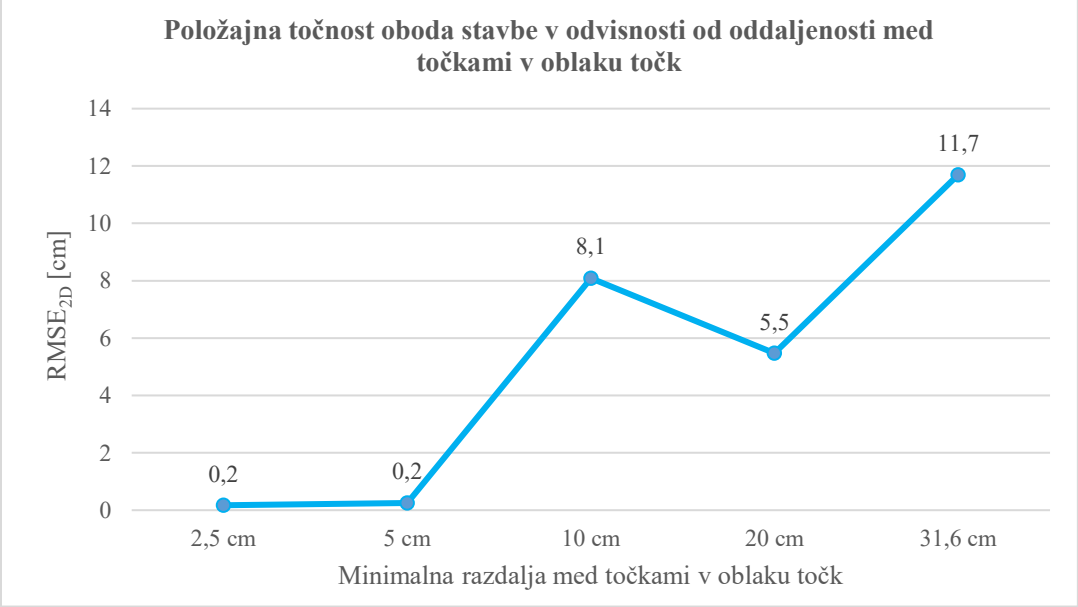
Rezultat obdelave v prostorskem ETL-okolju FME so bili 2D-obodi, ki so se med seboj razlikovali po položaju vogalnih točk, posledično se je razlikovala tudi oblika stavbe. Za analizo kakovosti in oceno vpliva gostote oblaka točk na položajno točnost oboda smo 2D-obod stavbe, ki smo ga izdelali iz oblaka točk z najvišjo gostoto (1 centimeter), obravnavali kot referenčno vrednost. Predpostavili smo, da najgostejši oblak točk najnatančneje opisuje obliko in položaj stavbe v 2D-ravnini. Hkrati smo s primerjavo z najgostejšim oblakom točk istega podatkovnega vira zmanjšali vpliv ostalih dejavnikov, ki vplivajo na položajno točnost oblaka točk v fazi zajema in obdelave podatkov. Relativno položajno točnost izdelanih obodov stavbe smo ocenili z izračunom vrednosti *RMSE*, ki smo jo izračunali na osnovi položajnih odstopanj vogalnih točk ocenjevanih obodov, generiranih iz oblaka točk z različnimi razdaljami med točkami (2,5 centimetra, 5 centimetrov, 10 centimetrov, 20 centimetrov in 31,6 centimetra), od vogalnih točk referenčnega oboda (1 centimeter). Preglednica 22 prikazuje izračunane vrednosti položajne točnosti $RMSE_{2D}$ za ocenjevane obode stavb glede na položaj referenčnega oboda, ki smo jih v nadaljevanju še grafično prikazali v grafikonu (slika 53).

Preglednica 22: Relativna položajna točnost izdelanih 2D-obodov stavbe glede na položaj referenčnega oboda.

Table 22: The relative positional accuracy of the extracted 2D building outlines with respect to the reference outline.

Oddaljenost med točkami v oblaku točk	**Gostota oblaka točk [št. točk/m^2]**	***RMSE$_{2D}$* [cm]**
2,5 cm	1600	0,2
5 cm	400	0,2
10 cm	100	8,1
20 cm	25	5,5
31,6 cm	10	11,7

Iz izračunanih vrednosti položajne točnosti vogalnih točk oboda stavbe lahko vidimo, da se z zmanjševanjem gostote oblaka točk poslabša položajna točnost določitve karakterističnih (vogalnih) točk oboda stavbe. Izkazalo se je, da manj kot je točk v oblaku točk, težje je določiti rob stavbe. Vidimo lahko, da pri nižjih vrednostih oddaljenosti med točkami (2,5 centimetra in 5 centimetrov), torej pri višji gostoti, ni bilo bistvene razlike v položaju oboda glede na referenčne vrednosti. Pri višjih vrednostih oddaljenosti med točkami, to je pri manjših gostotah oblaka točk, se odstopanje položajev vogalnih točk od položajev referenčnega oboda poveča (slika 53).

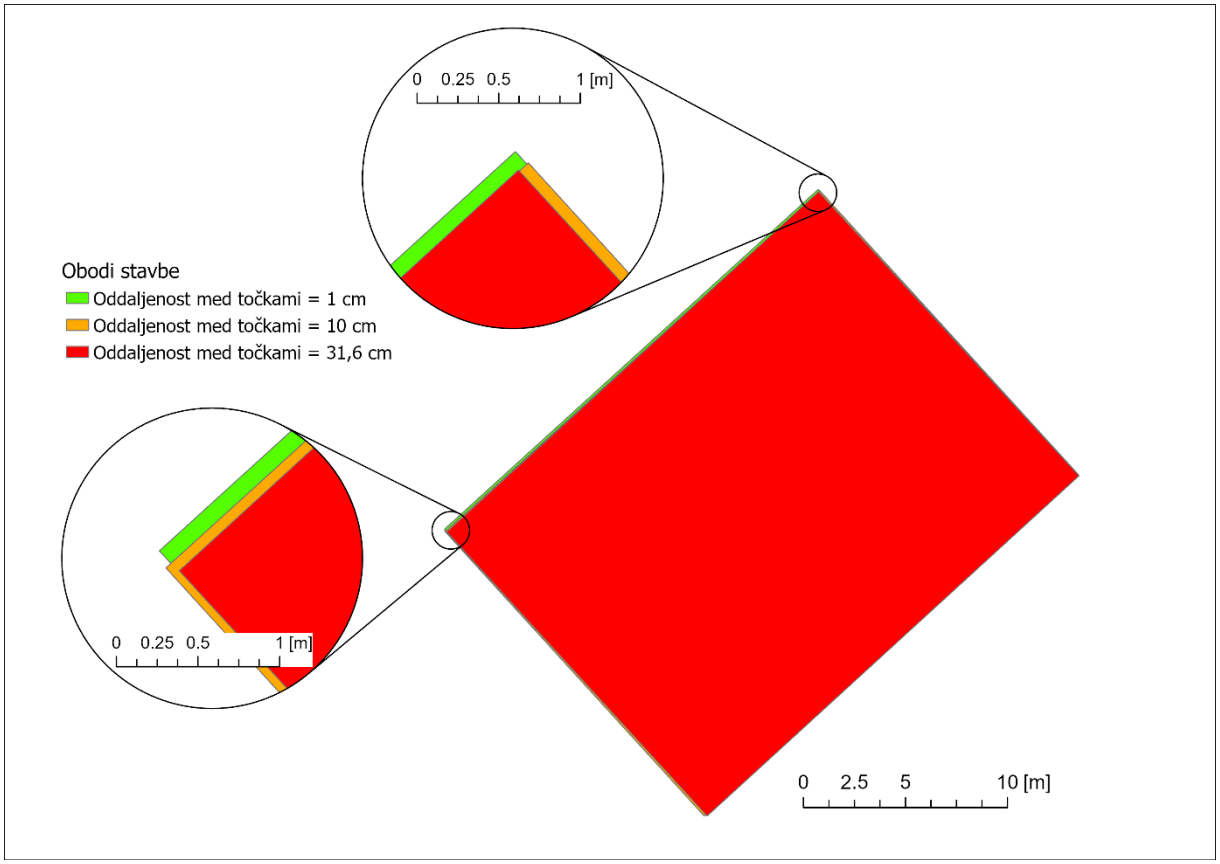


Slika 53: Grafikon položajne točnosti (*RMSE$_{2D}$*) ocenjevanih 2D-obodov stavb v odvisnosti od oddaljenosti med točkami v oblaku točk.

Figure 53: The graph of the positional accuracy (*RMSE$_{2D}$*) of the analysed 2D building outlines with respect to the point spacing in the point cloud.

S slabšo položajno točnostjo določitve koordinat karakterističnih (vogalnih) točk oboda stavbe, ki se izkaže v primerih uporabe oblaka točk z nižjo gostoto, se popači tudi geometrijska oblika, s tem pa tudi

površina generiranega oboda stavbe. Tako kot pri položajni točnosti tudi pri obliki oboda ugotavljamo, da so rezultati za zelo gost oblak točk (do 5 centimetrov oddaljenosti med točkama) zelo primerljivi. Delno velja iskati razlog za to tudi v izbranih parametrih metode modeliranja, saj sta bili stopnja tolerance poenostavitve in stopnja podrobnosti regularizacije večji od uporabljenih minimalnih razdalj med točkami v oblaku točk. Na določitev kakovosti 2D-oboda stavbe namreč ne vplivajo samo lastnosti vhodnih podatkov, kamor uvrščamo gostoto oblaka točk, ampak tudi uporabljena metoda generiranja oboda stavbe. V postopku za generiranje oboda stavbe smo uporabili nekatere predpostavke in postopke posplošitve, kot je regularizacija geometrije v pravilno pravokotno obliko oboda, saj smo želeni pridobiti poenostavljen in geometrično pravilen obod. To pa vpliva na položaj vogalnih točk oboda stavbe ne glede na sprva določeno obliko oboda v oblaku točk pred poenostavitvijo in regularizacijo. V najredkejšem oblaku točk (31,6 centimetra) so bile točke že tako redke, da so se ne glede na popravek oblike z regularizacijo pojavila večja odstopanja od referenčnega oboda, kar jasno kaže, da gostota vpliva na položajno točnost prepoznanih stavb v oblaku točk.



Slika 54: Primerjava med obodi stavb, ki so bili izdelani iz oblakov točk z različno gostoto točk.

Figure 54: The comparison between building outlines extracted from the point clouds with different point cloud density.

Gostota oblaka točk torej vpliva na določitev oboda stavbe pri izdelavi 3D-modela stavb, saj je od gostote oblaka točk odvisna določitev vogalnih točk oboda (slika 54), kar vpliva ne le na položajno

točnost, ampak tudi na geometrijo oboda in posledično tudi 3D-modela stavbe, če ta obod uporabimo za rekonstrukcijo stavbe v obliki 3D-modela. Tudi iz izračuna površine oboda lahko vidimo, da je ta odvisna od gostote oblaka točk (preglednica 23).

Preglednica 23: Površina 2D-obodov stavbe v odvisnosti od oddaljenosti med točkami.
Table 23: The area of 2D building outline with respect to point spacing in the point cloud.

Oddaljenost med točkami v oblaku točk	**Površina [m^2]**
1 cm (referenčni obod)	470,54
2,5 cm	470,88
5 cm	470,34
10 cm	468,48
20 cm	468,23
31,6 cm	467,02

Z drugačno obliko oboda stavbe se spremeni celotna razsežnost objekta v prostoru, od same površine do prostornine 3D-modela stavbe, na kar moramo biti pozorni, ko uporabljamo relativno redke oblake točk za 3D-modeliranje mest (na primer podatke ALS). V takih primerih je priporočljivo obode stavb generirati iz drugih virov – predlagan procesni model za 3D-modeliranje stavb, ki sloni zgolj na fotogrametričnem oblaku točk, pa je v takem primeru neprimeren.

6.5 Razprava

V eksperimentalnem delu raziskave smo preverili relevantnost predlaganega procesnega modela za 3D-modeliranje stavb na podlagi podatkov UAV, ki vključuje tudi korake preverjanja kakovosti vmesnih rezultatov, določene na podlagi razvitega konceptualnega modela za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov v tem procesu. Procesni model vključuje vse faze obdelave podatkov – od začetnega zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom do izdelave končnega topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavbe.

V prvem delu rezultatov eksperimentalnega dela smo predstavili izvedbeni procesni model za 3D-modeliranje stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk, izdelanega iz podatkov daljinsko vodenega letalnika. Z namenom zagotavljanja preglednosti celotnega procesa smo za izbrane faze obravnavanega procesa razvili inovativni model v okolju prostorskega ETL. Poleg tega, da je v prostorskem ETL-okolju mogoče združiti raznolike podatke, je prednost uporabe tega okolja tudi dejstvo, da omogoča pregledno modeliranje procesov obdelave podatkov. To omogoča uporabniku nadzor nad vsakim korakom procesa, tako nad izvedbo koraka v smislu nastavitve ustreznih parametrov obdelave kot nadzor nad

rezultati, pri čemer ne nadzorujemo samo končnih rezultatov, ampak tudi rezultate iz posameznih vmesnih korakov procesa. Tako je mogoče v vsakem koraku oceniti kakovost obdelave in pridobljenih rezultatov, kar omogoča zagotavljanje želene kakovosti končnega rezultata. Izvedbeni procesni model v okolju ETL lahko večkrat ponovimo in pri tem po potrebi prilagodimo nastavitve parametrov obdelave glede na dane vhodne podatke in ciljne zahteve.

V našem primeru smo v prostorskem ETL-okolju modelirali tako proces izdelave oboda stavbe iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk kot tudi proces izdelave 3D-modela stavb iz predhodno izdelanih 2D-obodov stavbe in prilegajočih se 3D-ploskev v oblak točk. Za oba procesa smo izdelali avtomatiziran postopek z več zaporednimi fazami obdelave. Ker so bili vsi koraki izbranega postopka združeni v enem procesnem modelu, smo lahko posamezne korake izdelave oboda ali 3D-modela stavb brez težav večkrat ponovili. Razviti izvedbeni procesni model v okolju ETL, ki pregledno prikaže vsak korak obdelave podatkov in 3D-modeliranja, je omogočil, da smo lahko v posameznih fazah generiranja, poenostavitve ali regularizacije oboda stavbe spreminjali vrednosti parametrov uporabljenih algoritmov, s čimer je bil olajšan izbor ustreznih vrednosti parametrov glede na značilnosti vhodnih podatkov ali objektov, ki smo jih modelirali. Podobno je bilo pri izdelavi 3D-modela stavb, ko smo lahko že pri modeliranju procesa izbrali primerne nastavitve obdelave, kar je pri uporabi podatkovnega pristopa 3D-modeliranja stavb zelo pomembno za pridobitev ustreznih končnih rezultatov.

Za preizkus celotnega modela za spremljanje kakovosti UAV-fotogrametričnih izdelkov v okviru 3D-modeliranja stavb smo izbrali dve študijski območji. Najprej smo predstavili rezultate preizkusa za podatke na študijskem območju Kandrše, kjer smo vse korake predlaganega procesnega modela preizkusili na dveh preprostih stavbah. V drugem primeru smo isti procesni model za spremljanje kakovosti preizkusili na podatkih s študijskega območja Vače, kjer smo modeliranje izvedli na več stavbah. Končni izdelki so bili v obeh primerih 3D-modeli stavb, skladni s standardom OGC CityGML, ki ustrezajo ravni podrobnosti LOD2. Rezultati preizkusov podrobnega procesnega modela na obeh deloviščih so pokazali, da je s predlaganim procesnim modelom mogoče spremljati kakovost obdelave podatkov v postopku 3D-modeliranja stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer je treba za dosego kakovostnih rezultatov kakovost podatkov spremljati že med procesom, v vseh ključnih fazah, ki vplivajo na kakovost končnega 3D-modela stavb, kot je predlagano v razvitem konceptualnem in podrobnem procesnem modelu. Na podlagi rezultatov izvedenega preizkusa lahko potrdimo drugo zastavljeno hipotezo H2, ki pravi, da je *ob poznavanju dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posamezni fazi obravnavanega procesa, mogoče razviti konceptualni model za spremljanje kakovosti.*

V eksperimentalnem delu smo nadalje posebej analizirali vplive izbranih dejavnikov na kakovost vmesnih fotogrametričnih izdelkov, to je georeferenciranega oblaka točk, in končnega izdelka, kar so

bili v našem primeru georeferencirani 3D-modeli stavb, ki ustrezajo standardu OGC CityGML ravni podrobnosti LOD2.

Najprej smo analizirali položajno točnost georeferenciranega fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer smo preverjali vpliv snemalne višine letalnika, vpliv prekrivanja med sosednjimi fotografijami in vpliv števila oslonilnih točk, ki jih uporabimo za georeferenciranje oblaka točk. Na podlagi rezultatov izvedenih analiz položajne kakovosti oblaka točk lahko potrdimo domnevo, da izbrani dejavniki vplivajo na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk. Kot so ugotavljali že drugi avtorji (Santise et al., 2014; Dandois et al., 2015; Agüera-Vega et al., 2017a), smo tudi z lastnim preizkusom potrdili, da se v primerljivih pogojih in ostalih nastavitvah leta daljinsko vodenega letalnika z naraščanjem snemalne višine nad terenom položajna točnost oblaka točk poslabša. To je bilo opazno kljub relativno majhnim razlikam v višini leta, pri kateri smo bili omejeni z uredbo glede dopustne najvišje višine leta na obeh deloviščih. Ni pa višina leta letalnika edini dejavnik, ki vpliva na kakovost rezultatov, zato je treba pri zajemu podatkov za dosego želene položajne točnosti upoštevati tudi ostale dejavnike kakovosti, ki smo jih izpostavili v poglavju 4.2.

Pri analizi vpliva prekrivanj sosednjih fotografij na položajno točnost georeferenciranega fotogrametričnega oblaka točk smo preizkus izvedli le za primera letov na isti višini in pri istih snemalnih pogojih, kjer je v prvem primeru prekrivanje med sosednjimi fotografijami znašalo 80 % v vzdolžni in 70 % v prečni smeri, v drugem primeru pa 85 % v vzdolžni smeri in 75 % v prečni smeri glede na smer leta letalnika. Zaradi tako podobnih nastavitev prekrivanja sosednjih fotografij, kjer v obeh primerih sledimo priporočilom, povzetim iz literature (Rupnik et al., 2015; Torres-Sanchez et al., 2018), ni bilo zaznati značilnih razlik v položajni točnosti fotogrametričnega oblaka točk glede na izbrano prekrivanje med sosednjimi fotografijami. V prihodnosti bi bilo treba za potrditev ugotovitev o vplivu višine leta letalnika in prekrivanj sosednjih fotografij na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk zagotovo izvesti še širšo raziskavo, v kateri bi primerjali oblake točk z več različnimi nastavitvami posameznega dejavnika leta letalnika.

Podrobna analiza je bila izvedena glede vpliva števila oslonilnih točk, uporabljenih za georeferenciranje, na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk. Ugotovili smo, kot smo domnevali že na podlagi objavljenih del drugih avtorjev (Harwin et al., 2015; Shahbazi et al., 2015; Reshetyuk in Mårtensson, 2016), da z večanjem števila oslonilnih točk dosežemo višjo položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk. Med seboj smo primerjali položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk, izdelanega iz istega podatkovnega niza UAV-fotografij, ki smo ga georeferencirali na osnovi treh različnih razporeditev oslonilnih točk. Za georeferenciranje smo uporabili šest, 19 oziroma 32 oslonilnih točk, kar je približno ena, tri oziroma pet oslonilnih točk na hektar snemalnega območja. Vključitev novih oslonilnih točk, predvsem v notranjosti študijskega območja, je prispevala k višji položajni točnosti, pri čemer je bilo

izboljšanje najopazneje v višinski komponenti. Ob uporabi treh oslonilnih točk na hektar, še bolj pa petih oslonilnih točk na hektar smo imeli gosto mrežo oslonilnih točk, s katero smo pridobili visoko položajno točnost georeferenciranih oblakov točk, ki ustreza tudi prostorski ločljivosti uporabljenih fotografij, ki je bila v teh primerih približno 1 centimeter. Poudarjamo, da je treba za dosego kakovostnih rezultatov oslonilne točke na terenu izmeriti z zelo visoko natančnostjo in točnostjo. Dodatna zanimiva ugotovitev je, da se položajna točnost fotogrametričnega oblaka točk z dodajanjem novih oslonilnih točk ne izboljšuje v nedogled, zato bi bilo treba na tem področju opraviti dodatne raziskave, kako določiti optimalno število oslonilnih točk glede na zahtevano točnost. Pri samem posrednem georeferenciranju fotogrametričnega oblaka točk smo sicer ne glede na gostoto oslonilnih točk upoštevali priporočila (Gerke in Przybilla, 2016; Tonkin in Midgley, 2016), da so oslonilne točke enakomerno razporejene po celotnem delovišču. Nekateri avtorji (Agüera-Vega et al., 2017b; Gindraux et al., 2017; Martínez-Carricondo et al., 2018) tudi podajajo predloge za optimalno število oslonilnih točk, ki je 0,5–1 oslonilna točka/ha, vendar jih je treba dovolj kakovostno izmeriti na terenu. Število oslonilnih točk je le eden od parametrov za dosego kakovostnih rezultatov, dodatno moramo upoštevati tudi uporabo ustrezne strojne in programske opreme, ki bo omogočila zajem ter obdelavo fotografij za dosego rezultatov z želeno kakovostjo.

Dodatno smo preučevali kakovost 3D-modelov stavb, izdelanih na podlagi fotogrametričnih podatkov, pridobljenih z daljinsko vodenimi letalniki, kjer smo ponovno preučevali vpliv snemalne višine letalnika in vpliv prekrivanja med sosednjimi fotografijami. Uporabili smo iste podatkovne nize s študijskega območja Kandrše, kot smo jih uporabili za analizo položajne točnosti fotogrametričnega oblaka točk. Najprej smo izdelali 3D-model stavbe za dva izbrana objekta iz fotogrametričnih oblakov točk, ki so bili predhodno izdelani iz UAV-fotografij, zajetih na dveh različnih snemalnih višinah (načrtovani snemalni višini sta bili 35 metrov in 50 metrov, dejanski pa 42 metrov in 58 metrov) oziroma z različnim prekrivanjem sosednjih fotografij (80/70 % in 85/75 %). Izdelane 3D-modele smo primerjali z referenčnim modelom, ki smo ga izdelali iz prostorskih podatkov, pridobljenih z neodvisno geodetsko izmero. S primerjavo ocenjevanih modelov in referenčnega modela smo ugotovili, da pri tako majhni razliki med uporabljenimi vrednostmi parametrov leta (snemalna višina in prekrivanje med fotografijami), kakršno smo imeli v našem primeru, ne moremo zaznati bistvene razlike v obliki in položaju izdelanih 3D-modelov. Manjše razlike so se pojavile le pri 3D-modelih ob uporabi fotogrametričnega oblaka točk, ki smo ga izdelali na osnovi UAV-fotografij, zajetih na različnih snemalnih višinah. Kljub temu menimo, da razlika med ocenjevanima modeloma ni posledica različne snemalne višine zajema UAV-fotografij, temveč je razlog uporabljen postopek 3D-modeliranja, ki izdela poenostavljen 3D-model stavbe v stopnji podrobnosti LOD2. Pri 3D-modelih stavb, ki so ustrezali standardu CityGML stopnje podrobnosti LOD2, torej pri obravnavanih parametrih leta nismo ugotovili značilnih vplivov na kakovost končnega 3D-modela. Pri tem poudarjamo, da smo razpolagali s podatki, zajetimi na relativno nizki višini, upoštevajoč priporočila, podana v literaturi, kot so primerni zunanji

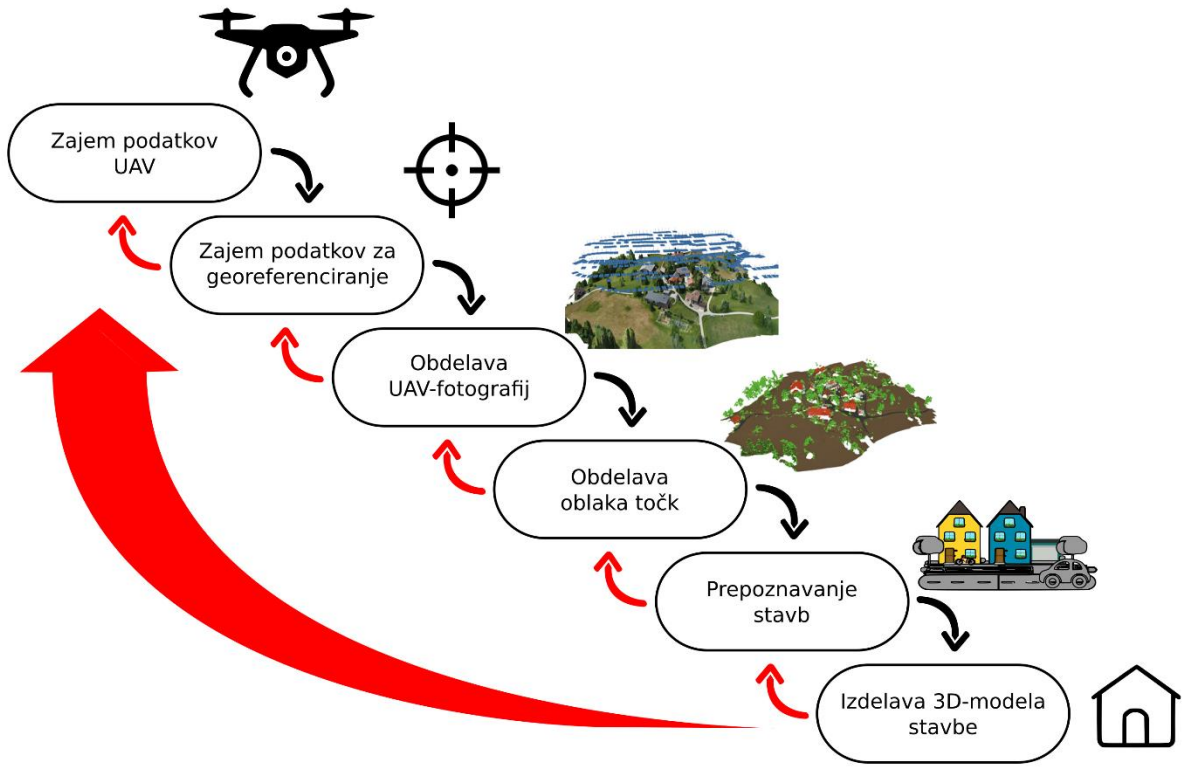
pogoji, minimalno prekrivanje med fotografijami ipd. Pri majhnih razlikah v vhodnih podatkih imajo torej na kakovost končnega 3D-modela stavb ali drugih entitet v prostoru večji vpliv izbrani algoritmi poenostavitve in regularizacije 3D-modelov.

Kot že omenjeno, se je v predlaganem postopku 3D-modeliranja stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk izkazalo, da je za kakovosten 3D-model stavb izredno pomembna določitev oboda stavbe. V ta namen smo analizirali vpliv gostote oblaka točk na položajno točnost določitve 2D-oboda stavbe, ki je eden od korakov prepoznavanja stavb v fazi 3D-modeliranja stavb iz podatkov fotogrametričnega oblaka točk. Ko je bila oddaljenost med točkami v oblaku točk manjša od mejnih vrednosti podrobnosti regularizacije 2D-oboda stavbe, vpliva gostote oblaka točk na položajno točnost oboda nismo zaznali. Ko je bila oddaljenost med točkami v območju tolerančnih vrednosti, je bilo vpliv gostote mogoče opaziti, vendar ni bilo linearne povezanosti med oddaljenostjo med točkami in položajno točnostjo 2D-oboda. Razlog za to je ponovno razmeroma velik vpliv uporabljenih metod poenostavitve in regularizacije oboda, ki so omogočile pridobitev poenostavljene in geometrično pravilne oblike stavbe v 2D-ravnini.

Podobne ugotovitve podajata tudi Oude Elberink in Vosselman (2011), ki kot pomemben vpliv na kakovost 3D-modela poleg lastnosti vhodnih podatkov izpostavljata kakovost postopka prepoznavanja objektov in izbrano stopnjo abstrakcije končnega modela stavb. Hkrati dodajata, da se z višjo gostoto oblaka točk izboljša kakovost prepoznavanja objektov v oblaku točk. V našem eksperimentu je bilo z vidika vpliva gostote oblaka točk na položajno točnost 2D-oboda stavbe potrjeno, da pri nižjih gostotah, recimo tisti, primerljivi s podatki ALS, manjša gostota oblaka točk negativno vpliva na prepoznavanje robov stavb v oblaku točk in posledično na položajno točnost izdelanega oboda stavbe. V eksperimentu smo analizirali relativno položajno točnost obodov stavb glede na vhodni oblak točk. Poudarek analize je bil na oceni vpliva gostote oblaka točk ob uporabi izbranega postopka modeliranja. Za celovito analizo položajne točnosti bi lahko preizkus razširili na absolutno položajno točnost in nadalje na vpliv na različne gostote oblaka točk na kakovost 3D-modela. Pri tem bi morali za korektno oceno zagotoviti referenčni model višje kakovosti, ki pa pri oceni kakovosti 3D-modelov stavb pogosto ni na voljo (Oude Elberink in Vosselman, 2011; Wong in Ellul, 2016). Pri analizi kakovosti 3D-modelov bi morali dodatno upoštevati še dejavnike, ki vplivajo na kakovost pri rekonstrukciji modela. V obeh primerih, tako pri oceni absolutne položajne točnosti oboda kot pri oceni položajne točnosti 3D-modela stavb, bi težje ocenili zgolj vpliv gostote na kakovost rezultatov modeliranja.

Na podlagi predhodnega pregleda literature (poglavje 4) in rezultatov lastnih eksperimentalnih preizkusov lahko ugotovimo, da je predlagani konceptualni model za spremljanje kakovosti, s tem pa tudi procesni model za zajem, obdelavo podatkov in 3D-modeliranje stavb na podlagi fotografij, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, primeren tudi za načrtovanje dejavnosti za zagotavljanje in nadzor

kakovosti, če imamo podane zahteve naročnika za ciljno kakovost končnega 3D-modela stavb. Na podlagi poznavanja želene ciljne kakovosti 3D-modela lahko s pristopom obrnjenega inženirstva določimo zahtevano kakovost izdelkov posameznih faz v procesu 3D-modeliranja od zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom do končnega 3D-modela stavbe (slika 55). Slednje smo predvidevali v delovni hipotezi H2.1, ki pravi, da *končna kakovost georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb opredeljuje zahtevano kakovost vsake posamezne faze procesa od zajema do izdelave končnega modela.*



Slika 55: Proces 3D-modeliranja stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk (črno) in koraki obrnjenega inženirstva za določitev kakovosti posameznih faz procesa 3D-modeliranja (rdeče).

Figure 55: The 3D building modelling process based on the photogrammetric point cloud (black) and reverse engineering steps for determination of the quality of the specific phases of the modelling process (red).

Predlagani podrobni procesni model z dejavnostmi kontrole kakovosti vmesnih rezultatov je sicer specifičen za predlagani procesni model, kjer smo se omejili na tako imenovani podatkovni pristop modeliranja stavb, a ga je mogoče razširiti ali prilagoditi tudi za nekoliko spremenjene procese pri drugačnih pristopih 3D-modeliranja stavb na podlagi fotografij, zajetih z daljinsko vodenimi letalniki. Dodatna omejitev naše raziskave je, da smo obravnavali le stavbe. Podobno bi lahko izdelovali 3D-modele tudi drugih entitet v prostoru, kot so na primer infrastrukturni objekti, vendar pa je treba za vsako entiteto v prostoru zaradi njenih fizičnih značilnosti in posebnih zahtev pri modeliranju mest in pokrajin uporabiti nekoliko prilagojene pristope, kar presega cilje te raziskave. Ne glede na prikazane omejitve raziskave lahko ugotovimo, da je predlagani konceptualni model za spremljanje kakovosti 3D- modelov stavb, izdelanih na podlagi podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, mogoče uporabiti tudi za

navedene specifične primere 3D-modeliranja, pri čemer so potrebne nekatere prilagoditve, zlasti to velja za podroben procesni model.

7 ZAKLJUČEK

V doktorski disertaciji smo se ukvarjali s področjem spremljanja in zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov, natančneje s kakovostjo podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk. Glavni raziskovalni problem je bil zagotavljanje kakovosti 3D-prostorskih podatkov v procesu izdelave georeferenciranih vektorskih 3D-modelov stavb. Zanimalo nas je, kako zagotoviti zahtevano kakovost 3D-modela stavb in kaj vse vpliva na kakovost tovrstnega modela, ki ga izdelamo na osnovi fotogrametričnega oblaka točk. Pri tem smo se omejili na uporabo novih tehnologij v obliki daljinsko vodenih letalnikov, ki se zaradi prilagodljivosti in cenovne dostopnosti danes pogosto uporabljajo tudi na področju fotogrametrije ter daljinskega zaznavanja. Iz digitalnih fotografij, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, lahko z uporabo algoritmov strukture iz gibanja in algoritmov gostega slikovnega ujemanja izdelamo fotogrametrični oblak točk, ki ga je mogoče nadalje uporabiti v postopku 3D-modeliranja stavb.

V zaključnem delu naloge podajamo ključne ugotovitve glede zastavljenih raziskovalnih hipotez in ciljev, osvetlimo prispevek disertacije k razvoju znanosti in predlagamo usmeritve za nadaljnje delo na obravnavanem področju.

7.1 Vrednotenje raziskovalnih hipotez in ciljev

V prvem delu raziskave smo podrobno preučili postopke zajema, obdelave in modeliranja prostorskih podatkov za pridobitev georeferenciranega vektorskega 3D-modela stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk, zajetega z daljinsko vodenim letalnikom. Skladno z analizo celotne verige postopkov, ki jih izvedemo v tem procesu, smo s podrobnim pregledom dosedanjih znanstvenih objav identificirali ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posamezni fazi obravnavanega procesa. Na podlagi pregleda literature smo opredelili, v kateri fazi in kako posamezen dejavnik vpliva na kakovost prostorskih podatkov v postopku 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk, pridobljenega iz UAV-fotografij. Glede na rezultate tega dela raziskave, ki je predstavljen v četrtem poglavju doktorske disertacije, lahko sprejmemo prvo zastavljeno raziskovalno hipotezo H1, ki se glasi: *Identificirati je mogoče posamične dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema fotogrametričnega oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, skladnega z zahtevami mednarodnega standarda OGC CityGML z ravnjo podrobnosti modela LOD2.*

V osrednjem delu raziskave smo razvili procesni model za 3D-modeliranje stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk, izdelanega iz podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom. Procesni model vključuje celoten postopek, od zajema preko obdelave podatkov do izdelave

georeferenciranega topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavb v stopnji podrobnosti LOD2 v skladu z določili standarda OGC CityGML. Na podlagi navedenega procesa 3D-modeliranja stavb in ob poznavanju ključnih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost v tem procesu, smo nadalje predlagali konceptualni model za spremljanje in zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb. Konceptualni model vključuje predloge postopkov za spremljanje kakovosti v ključnih fazah procesa, ki smo jih nato vključili v podroben procesni model za 3D-modeliranje stavb na podlagi fotogrametričnega oblaka točk. Na podlagi rezultatov osrednjega dela raziskave, katerega rezultati so podani v petem poglavju doktorske disertacije, lahko sprejmemo drugo raziskovalno hipotezo H2: *Na temelju poznavanja dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, je mogoče razviti konceptualni model za spremljanje kakovosti po posameznih fazah obdelave podatkov, ki zagotavlja predpisano kakovost končnega 3D-modela.*

Ugotovili smo, da je poznavanje ključnih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost izdelkov v posameznih fazah procesa, bistveno za spremljanje in zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju stavb. Čeprav je bil konceptualni model za spremljanje in zagotavljanje kakovosti razvit na podlagi izbranega procesnega modela za 3D-modeliranje stavb, je mogoče predlagani model za spremljanje kakovosti uporabiti tudi pri drugačnem postopku 3D-modeliranja stavb, seveda ob ustreznih prilagoditvah procesnega modela in s tem povezanih postopkov spremljanja kakovosti vmesnih rezultatov. Prav tako je mogoče razviti model prilagajati želeni kakovosti končnega 3D-modela.

V skladu z zastavljenimi raziskovalnimi cilji smo v tretjem delu raziskave izvedli eksperimentalni preizkus predlaganega konceptualnega modela in tudi procesnega modela za spremljanje kakovosti vmesnih in končnih izdelkov 3D-modeliranja stavb. V ta namen smo najprej opravili splošni preizkus celotnega postopka za spremljanje kakovosti na prostorskih podatkih z dveh študijskih območij (Kandrše, Vače). Na prvem študijskem območju (Kandrše) smo procesni model preverili za primer dveh stavb s preprosto dvokapno streho. Na drugem študijskem območju (Vače) smo procesni model za spremljanje kakovosti preverili na več stavbah z različnimi oblikami strehe. V obeh primerih je bila ciljna kakovost 3D-modelov stavb izbrana glede na zahteve standarda OGC CityGML za izdelavo modelov stavb s stopnjo podrobnosti LOD2 in je primerljiva s kakovostjo modeliranja prostorskih entitet v temeljnih topografskih modelih večjih meril. S preizkusom procesnega modela na eksperimentalnih podatkih smo potrdili, da je razviti model mogoče uporabiti za spremljanje in zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov v obravnavanem postopku. Pri tem smo si pomagali tudi s prostorskim ETL-okoljem, ki smo ga uporabili v fazi modeliranja stavb, natančneje v koraku prepoznavanja stavb iz oblaka točk za določitev oboda stavbe in predvsem za izdelavo georeferenciranega topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavbe. Izkazalo se je, da ponuja prostorski ETL okolje za pregledno modeliranje izvedbenih procesov in kasnejšo obdelavo podatkov z izdelanim procesom ob uporabi

različnih geoprocesnih orodij. Pri tem lahko uporabnik nadzira izvedbo vsakega koraka z nastavitvijo ustreznih parametrov in izbiro ustreznih algoritmov ter spremlja tako vmesne kot končne rezultate procesa, tudi z vidika kakovosti. Tako lahko spremljamo kakovost podatkov že med obdelavo in imamo nadzor nad celotnim procesom, kar prispeva k zagotavljanju ustrezne kakovosti končnih rezultatov.

Nadalje smo z eksperimentom preverili vpliv izbranih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov v posamezni fazi procesa od zajema UAV-podatkov do končnega 3D-modela stavb. Preverili smo vpliv izbranih dejavnikov iz faze zajema na kakovost fotogrametričnega oblaka točk, nato smo analizirali še vpliv teh dejavnikov na kakovost končnega 3D-modela stavbe. Nadalje smo preverili vpliv gostote oblaka točk na kakovost določitve oboda stavbe, ki je eden pomembnejših korakov pri prepoznavanju stavb v oblaku točk z izbranim postopkom 3D-modeliranja in vpliva na kakovost končnega 3D-modela stavbe. Izvedena analiza vplivov izbranih dejavnikov na kakovost prostorskih podatkov je potrdila, da obravnavani dejavniki vplivajo na kakovost vmesnih rezultatov v posameznih fazah obravnavanega procesa 3D-modeliranja. Ugotovili smo tudi, da vpliva posameznega dejavnika iz posamezne faze procesa ni mogoče jasno identificirati v kasnejših fazah, če je njegov vpliv relativno majhen in je hkrati vpliv drugih dejavnikov večji od izbranega dejavnika. Zato moramo v vsaki fazi spremljati vplive ključnih dejavnikov, ki so v izbrani fazi prisotni, da lahko uspešno nadziramo kakovost vmesnih rezultatov procesa. S spremljanjem kakovosti vmesnih rezultatov procesa nadziramo vpliv posameznih dejavnikov, da ti ne presežejo mejnih vrednosti za zagotovitev želene kakovosti končnega 3D-modela. S tem lahko potrdimo tudi pomožno raziskovalno hipotezo H2.1: *Končna kakovost georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb opredeljuje zahtevano kakovost vsake posamezne faze procesa od zajema do izdelave končnega modela.* Pri tem je treba poudariti, da so vplivi dejavnikov med seboj povezani in težko neposredno opredelimo obseg vpliva enega dejavnika na kakovost končnega 3D-modela stavb. Obenem pa vsi dejavniki ne vplivajo enako na kakovost, prav tako ne na vse elemente kakovosti, temveč le na nekatere vidike kakovosti, kar moramo tudi upoštevati pri določitvi mejnih vrednosti vpliva dejavnikov za pridobitev 3D-modela stavb z zahtevano kakovostjo. Zahtevano kakovost rezultatov vmesnih faz postopka 3D-modeliranja stavb v odvisnost od mejnih vrednosti vpliva posameznih dejavnikov določimo izkustveno glede na želeno kakovost končnega izdelka, ob upoštevanju uporabljene strojne in programske opreme, zunanjih okoliščin ter algoritmov obdelave in modeliranja.

Ker so eksperimenti za določitev mejne vrednosti vpliva nekega dejavnika zahtevni in dolgotrajni, smo si v našem primeru pomagali s pregledom literature, na podlagi katerega smo identificirali ključne dejavnike in njihov vpliv na kakovost podatkov v obravnavanem procesu ter določili njihove okvirne vrednosti za pridobitev končnega rezultata z želeno kakovostjo. Vplive izbranih dejavnikov smo nato še eksperimentalno preverili. Kot glavne ugotovitve lahko povzamemo, da je v fazi zajema podatkov z daljinsko vodenim letalnikom treba izbrati kakovostno mersko opremo z ustrezno ločljivostjo senzorja.

Višina leta letalnika mora omogočiti zadostno prostorsko ločljivost fotografij za prepoznavanje detajlov, prekrivanje med fotografije naj bo vsaj 80 % vzdolžno in 60–70 % prečno glede na smer leta letalnika. Za posredno georeferenciranje moramo zagotoviti zadostno število oslonilnih točk, ki naj bodo enakomerno razporejene po celotnem snemalnem območju, na terenu pa naj bodo izmerjene z natančnejšo metodo izmere, kot je zahtevana kakovost končnega izdelka. Za kakovostno obdelavo fotografij moramo poleg ustrezne kakovosti vhodnih podatkov izbrati primerne parametre obdelave, ki so odvisni od lastnosti uporabljenih fotografij, med drugim od prostorske in radiometrične ločljivosti fotografij, in od značilnosti objekta, ki smo ga zajeli (razgibanost, prisotnost senc, tekstura, količina in vrsta detajlov). Slednje vpliva tudi na kakovost obdelave oblaka točk, hkrati moramo v tej fazi upoštevati značilnosti uporabljenih metod segmentacije in klasifikacije.

Pri 3D-modeliranju stavb iz oblaka točk moramo biti dodatno pozorni na lastnosti vhodnih podatkov. Nadalje se v skladu z želeno končno kakovostjo 3D-modela stavbe opredelimo o zahtevani stopnji podrobnosti modela in izberemo predpostavke o vsebini ter lastnostih 3D-modela glede na želeno stopnjo abstrakcije stvarnosti. Pri izbiri metode modeliranja stavb moramo biti pozorni na uporabljen pristop modeliranja in poenostavitve tako pri prepoznavanju ali določitvi oboda stavbe kot tudi nadalje pri izdelavi 3D-modela stavb. Poenostavitve ne smejo presegati zahtevane končne kakovosti 3D-modela stavb.

7.2 Prispevek k znanosti

V doktorski disertaciji smo celovito analizirali proces modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk in predlagali korake za spremljanje in zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov v tem procesu, kar je eden glavnih prispevkov disertacije k razvoju znanosti.

Na podlagi preučene literature smo določili posamezne faze ter razvili podroben procesni model za 3D-modeliranje stavb na podlagi UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Razviti procesni model celovito zajema vse faze in postopke od zajema in obdelave podatkov do 3D-modeliranja stavb, kar je pomemben prispevek k razumevanju dejavnikov, ki vplivajo na kakovost končnega izdelka. V nadaljevanju smo identificirali ključne dejavnike, ki jih moramo spremljati za zagotovitev ustrezne kakovosti vmesnih izdelkov v posamezni fazi ter kakovosti končnega 3D-modela stavb. Na podlagi identificiranih dejavnikov in predhodno razvitega konceptualnega modela za spremljanje kakovosti smo razširili procesni model za 3D-modeliranje stavb, tako da smo vključili tudi postopke preverjanja kakovosti v posameznih fazah. Procesni model, ki vključuje poleg postopkov obdelave podatkov tudi postopke preverjanja kakovosti, je novost na obravnavanem raziskovalnem področju, saj pregledno opisuje vse faze obravnavanega procesa. Celovita obravnava procesa od zajema UAV-podatkov do 3D-modela stavb v nam dosegljivi literaturi še ni bila podrobno predstavljena.

Dodaten prispevek k znanosti na področju 3D-modeliranja stavb iz oblakov točk je inovativna uporaba prostorskega ETL-okolja, ki je sicer na področju geoinformatike uveljavljeno orodje za integracijo prostorskih podatkov različnih formatov in iz raznolikih virov. V sklopu naše raziskave smo prostorsko ETL-okolje uporabili za razvoj izbranega dela procesnega modela za 3D-modeliranje stavb, ki je omogočal avtomatizirano in pregledno obdelavo podatkov ter je olajšal spremljanje kakovosti rezultatov (glej tudi Drešček et al., 2020). Slednje je pomemben prispevek tudi za stroko, saj je izvedbo procesnega modela v ETL-okolju mogoče uporabiti na drugih podatkovnih nizih.

V eksperimentalnem delu smo podroben procesni model verificirali na dveh študijskih območjih, kjer smo tudi preverjali vplive izbranih dejavnikov na kakovost vmesnega izdelka (fotogrametričnega oblaka točk) in končnega izdelka (3D-modela stavb). Rezultati so tako izredno pomembni za razumevanje vplivov dejavnikov na kakovost 3D-modelov mest. Daljinsko vodeni letalniki se danes na področju fotogrametrije vse širše uporabljajo in ugotovitve eksperimentalnega dela se lahko uporabijo za oblikovanje priporočil za zagotavljanje kakovosti – skupaj z že znanimi ugotovitvami, objavljenimi v literaturi. Poleg prispevkov k znanosti imajo rezultati velik potencial za prenos znanja v prakso.

7.3 Priložnosti za nove raziskave

Ob izvedbi raziskav v okviru doktorske disertacije so se pokazale tudi možnosti za nadaljnje delo na tem področju. Z dodatnimi eksperimenti bi lahko podrobneje analizirali vpliv dejavnikov na kakovost v posamezni fazi procesa 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk. Poleg parametrov leta letalnika, ki smo jih analizirali v raziskavi, bi lahko preverili vpliv izbire strojne opreme za zajem UAV-podatkov, vpliv različne programske opreme na kakovost obdelave in vpliv zunanjih pogojev pri zajemu podatkov na terenu.

Vse aktualnejša tema na področju fotogrametrije in daljinskega zaznavanja je integracija prostorskih podatkov iz različnih virov. Pri tem bi bilo zanimivo preučiti, kako učinkovito združiti raznolike podatkovne nize, kot so laserski in fotogrametrični oblaki točk, kako jih učinkovito uporabiti za 3D-modeliranje stavb in kako nadzirati kakovost pri obravnavi raznolikih podatkovnih nizov.

Z vidika modeliranja bi bilo zanimivo razširiti raziskavo na kakovost 3D-modelov stavb višjih stopenj podrobnosti. Z vključitvijo poševnih fotografij bi lahko modelirali fasade stavb, s povezavo z oblaki točk notranjih prostorov pa bi lahko poleg zunanjosti modelirali tudi notranjost stavb. Za celovito obravnavo urbanega okolja bi lahko model za zagotavljanje kakovosti 3D-modelov stavb nadalje razširili na druge pomembne entitete v mestih, kot sta na primer vegetacija in javna infrastruktura. Z vidika nadaljnje uporabe 3D-modelov mest bi lahko modeliranje razširili tudi na semantično obogatitev

3D-modelov stavb z dodatnimi atributnimi podatki in spremljali kakovost pri semantičnem modeliranju podatkov v 3D-okolju ter njihovo uporabo v različnih 3D-prostorskih analizah.

8 POVZETEK

Poznavanje kakovosti prostorskih podatkov je izredno pomembno z vidika ustrezne uporabe prostorskih podatkov ter iz njih izvedenih informacij v podporo odločanju v prostoru. Medtem ko je bilo v preteklosti modeliranje prostora v okoljih geografskih informacijskih sistemov (GIS) osredotočeno na dve razsežnosti (2D), višina pa se je obravnavala kot dodaten opisni podatek, se danes vse pogosteje uporabljajo modeli prostorskih entitet v treh razsežnostih. Prednost uporabe 3D-modelov prostora v obliki prostorskih podatkov se potrjuje na številnih področjih, med drugim pri upravljanju nepremičnin, v gradbeništvu, prostorskem načrtovanju, pri navigaciji in lokacijskih storitvah, okoljskih študijah idr. (Stoter in Salzmann, 2003; Van Oosterom et al., 2008; Stylianidis in Remondino, 2016).

3D-prostorski podatki so se začeli pogosteje uporabljati predvsem z uveljavitvijo novih rešitev za množični zajem prostorskih podatkov. Ena od takih tehnoloških rešitev so (optični) senzorji na brezpilotnem daljinsko vodenem letalniku – UAV (angl. *unmanned aerial vehicle*). Na podlagi zajetih digitalnih fotografij izdelamo tako imenovani fotogrametrični oblak točk, ki ga je treba pred nadaljnjo obdelavo umestiti v ciljni prostorski koordinatni sistem. Oblak točk je mogoče uporabiti za izdelavo 3D-modelov entitet v prostoru. Zajem, obdelava podatkov in 3D-modeliranje prostorskih entitet na podlagi podatkov, zajetih z UAV-tehnologijo, so relativno novi postopki, zato je še precej neraziskano področje zagotavljanja kakovosti v celotnem procesu od zajema UAV-podatkov do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela prostorskih entitet.

Raziskovalni izziv, s katerim smo se ukvarjali v disertaciji, je zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov v postopku 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk, izdelanega iz UAV-fotografij, kjer smo ločeno preučevali dejavnike, ki lahko vplivajo na kakovost izdelkov, in vprašanje, kako doseči ciljno kakovost.

V prvem delu raziskave smo na podlagi literature preučili korake, ki jih izvedemo v postopku 3D-modeliranja iz UAV-podatkov. Identificirali smo ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov, in proces razdelili na tri faze:

i. zajem,
ii. obdelava in
iii. modeliranje.

V prvi fazi zajamemo UAV-podatke in podatke za georeferenciranje. Pred izmero moramo pripraviti podroben načrt snemalne misije. Pri tem moramo biti pozorni na dejavnike, ki vplivajo na kakovost izvedbe izmere. Kot ključne smo opredelili izbiro merske opreme, izbiro vrednosti parametrov leta in upoštevanje zunanjih pogojev v času izmere. Predvsem merska oprema in parametri leta določajo tako prostorsko kot radiometrično ločljivost fotografij, slednji pa vplivata na kakovost nadaljnje obdelave

podatkov. Med parametre leta uvrščamo vrednost snemalne višine letalnika nad terenom, velikost prekrivanja med fotografijami in geometrijo bloka zajetih fotografij. Drugi korak se nanaša na zajem podatkov za georeferenciranje oblaka točk. V predlaganem procesu smo se omejili na uporabo posrednega georeferenciranja preko danih položajev oslonilnih točk (angl. *ground control points*), katerih koordinate v ciljnem koordinatnem sistemu določimo z neodvisno geodetsko izmero. Za kontrolo kakovosti izvedbe georeferenciranja oblaka točk na temelju geodetske izmere določimo tudi koordinate kontrolnih točk (angl. *check points*). Položajna kakovost oslonilnih in kontrolnih točk je izredno pomemben dejavnik, ki vpliva na kakovost fotogrametričnih izdelkov, dodatno pa na kakovost izdelkov vplivata število in razporeditev oslonilnih točk. V drugi fazi, to je v fazi obdelave, z algoritmom grajenja strukture iz gibanja (angl. *structure from motion*) iz UAV-fotografij in danih položajev oslonilnih točk izdelamo redek oblak točk v izbranem koordinatnem sistemu. Sledi izdelava gostega fotogrametričnega oblaka točk z algoritmom za gosto slikovno ujemanje (angl. *dense image matching*). Pri tem na kakovost vmesnih rezultatov vplivajo predvsem kakovost vhodnih podatkov in parametri obdelave. V drugem delu faze obdelave lahko izvedemo segmentacijo in klasifikacijo oblaka točk, če se rekonstrukcija 3D-modela izbranih objektov izvede na klasificiranem oblaku točk. Na kakovost izvedbe segmentacije in klasifikacije vpliva predvsem izbira metod. V tretji fazi izvedemo prepoznavanje stavb v oblaku točk in rekonstrukcijo 3D-modela stavbe. Kakovost rezultatov obeh korakov je odvisna od kakovosti vhodnih podatkov in izbire metod modeliranja. Na kakovost izdelanega 3D-modela objekta dodatno vplivajo tudi izbira stopnje podrobnosti modela in izbrane poenostavitve modela. S podrobno preučitvijo postopkov modeliranja smo na podlagi preučene literature identificirali ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost pri 3D-modeliranju stavb od zajema podatkov do končnega 3D-modela stavbe. S tem smo potrdili prvo raziskovalno hipotezo, ki se glasi: *Identificirati je mogoče posamične dejavnike, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema fotogrametričnega oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, skladnega z zahtevami mednarodnega standarda OGC CityGML z ravnjo podrobnosti modela LOD2.*

V osrednjem delu disertacije smo razvili konceptualni model za zagotavljanje kakovosti prostorskih podatkov v postopku 3D-modeliranja stavb iz UAV-fotogrametričnega oblaka točk. Konceptualni model temelji na podrobnem procesnem modelu, slednjega pa smo na temelju konceptualnega modela razširili s postopki za sprotno spremljanje kakovosti vmesnih rezultatov procesa 3D-modeliranja stavb z zahtevano kakovostjo. V fazi zajema nadziramo dejavnike, ki vplivajo na kakovost zajetih UAV-fotografij in kakovost izmere za posredno georeferenciranje. V fazi obdelave je pomembno, da nadziramo kakovost izvedenega georeferenciranja, predvsem z vidika položajne točnosti. Nadalje nadziramo popolnost izdelanega gostega oblaka točk, ob izvedbi segmentacije in klasifikacije pa tudi pravilnost in logično skladnost. Zadnja faza obsega 3D-modeliranje stavb. Pri prepoznavanju stavb v oblaku točk nadziramo kakovost prepoznavanja, kjer je pomembna tako položajna točnost kot topološka pravilnost in popolnost. 3D-rekonstrukciji stavbe sledi preverjanje kakovosti 3D-modela stavbe z

analizo položajne točnosti, popolnosti in logične skladnosti glede na predhodno zahtevano kakovost. Na podlagi rezultatov tega dela raziskave smo potrdili pravilnost druge raziskovalne hipoteze, ki se glasi: *Na temelju poznavanja dejavnikov, ki vplivajo na kakovost prostorskih podatkov v posameznih fazah procesa od zajema oblaka točk do izdelave georeferenciranega 3D-vektorskega modela stavb, je mogoče razviti konceptualni model za spremljanje kakovosti po posameznih fazah obdelave podatkov, ki zagotavlja predpisano kakovost končnega 3D-modela.* Razviti procesni model, ki vključuje poleg postopkov obdelave podatkov tudi postopke preverjanja kakovosti, je novost na obravnavanem raziskovalnem področju, ki pregledno predstavlja vse faze od zajema UAV-podatkov do končnega 3D-modela stavbe, ki pa je sicer omejen za primer stavb v stopnji podrobnosti LOD2 glede na standard OGC CityGML.

V sklepnem delu disertacije smo s preizkusom preverili predlagani konceptualni in podrobni procesni model za spremljanje kakovosti prostorskih podatkov pri 3D-modeliranju stavb iz fotogrametričnega oblaka točk. Model smo preizkusili na dveh študijskih območjih in prikazali, kako je mogoče spremljati kakovost pri 3D-modeliranju stavb. V ta namen smo razvili inovativno rešitev v ETL-okolju, kar je pomemben prispevek k znanosti. Prostorsko ETL-okolje smo namreč uporabili za izvedbo izbranega dela procesnega modela 3D-modeliranja stavb, ki je omogočal samodejno in pregledno obdelavo podatkov ter olajšal spremljanje kakovosti rezultatov (glej tudi Drešček et al., 2020).

Dodatno smo analizirali vpliv izbranih dejavnikov na kakovost podatkov v procesu modeliranja, in sicer smo analizirali vpliv snemalne višine leta letalnika nad terenom, velikosti prekrivanja med fotografijami in števila oslonilnih točk na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk. Pri vseh treh dejavnikih smo potrdili vpliv na položajno točnost oblaka točk, med drugim smo potrdili, da nižja snemalna višina in večje število oslonilnih točk prispevata k višji kakovosti fotogrametričnih izdelkov, to je oblaka točk. Preverjali smo še vpliv izbranih dejavnikov na kakovost končnega 3D-modela stavbe. Za uporabljen postopek modeliranja, ki sloni na podatkovnem pristopu, in za izbrane podatke smo ugotovili, da imajo parametri 3D-modeliranja večji vpliv na kakovost izdelanega 3D-modela kot sama položajna točnost vhodnih podatkov zaradi različne snemalne višine ali prekrivanja med fotografijami. V zadnjem delu preizkusa smo analizirali vpliv gostote oblaka točk na kakovost prepoznavanja stavb v oblaku točk, natančneje na položajno točnost 2D-oboda stavbe. Primerjava med obodi stavb, določenimi iz oblakov točk z različnimi gostotami, je potrdila domnevo, da se z manjšanjem gostote točk slabša položajna točnost določitve oboda stavbe. Pri tem je treba dodatno upoštevati vpliv metode določitve oboda stavbe, saj predvsem različni postopki poenostavitve in regularizacije vplivajo na položaj ter obliko prepoznanih stavb v oblaku točk.

V raziskavi smo analizirali in modelirali postopke od zajema UAV-podatkov, njihove obdelave do izdelave georeferenciranega vektorskega 3D-modela stavbe. Pri tem smo identificirali ključne

dejavnike, ki vplivajo na kakovost v tem procesu, in predlagali model, s katerimi je mogoče spremljati kakovost prostorskih podatkov od zajema do končnega 3D-modela stavbe. Kljub nekaterim omejitvam raziskave, ki so jasno prikazane, so rezultati izredno pomembni za razumevanje vplivov dejavnikov na kakovost 3D-modelov mest in imajo med drugim velik potencial za prenos v prakso.

9 SUMMARY

Knowledge about the spatial data quality is important in terms of the proper use of data and the information obtained from this data to support spatial decision-making. In the past, spatial data modelling within geographic information systems (GIS) was focused on two dimensions (2D), height was regarded as an additional attribute. Whereas today, spatial data models in three dimensions are increasingly used. The advantage of using 3D spatial data is confirmed in several domains, including real estate management, construction, spatial planning, navigation and location-based services, environmental studies, etc. (Stoter and Salzmann, 2003; Van Oosterom et al., 2008; Stylianidis and Remondino, 2016).

The increasing use of 3D spatial data occurred mainly with the new solutions for mass spatial data acquisition. One of these technological solutions is the optical sensors on unmanned aerial vehicles (UAVs). Based on acquired UAV digital imagery, we produce the so-called photogrammetric point cloud, which is georeferenced in the targeted spatial coordinate system before further processing. The point cloud can be used to create 3D models of various spatial entities. Data acquisition, processing and 3D modelling of spatial entities based on UAV data are relatively new procedures in the geospatial domain; consequently, quality assurance throughout this process is still a challenging research topic.

The research challenge we dealt with in this dissertation was the spatial data quality assurance in 3D building modelling from a photogrammetric point cloud derived from UAV imagery, where we specifically studied factors that can influence product quality aiming also to answer the question of how to achieve targeted quality.

In the first part, we examined the steps in the 3D modelling process from UAV data based on literature. We have identified key factors that influence the spatial data quality within the whole process, which was divided into three phases:

i. data acquisition,
ii. data processing and
iii. modelling.

In the first phase, we studied the processes of UAV data acquisition, including data for georeferencing. Before the fieldwork, a detailed flight mission planning should be prepared. Here, factors affecting the quality of data acquired by UAV have to be considered. As key factors that influence the acquired data quality, we have defined the quality of equipment and flight parameters, and weather conditions at the time of data acquisition. In particular, measurement equipment and flight parameters determine both the spatial and radiometric resolution of the UAV images, which influence the quality of further data

processing. Flight parameters include the flight altitude above ground, the image overlap and the geometry of the image block. The second step within the data acquisition phase relates to data acquisition for point cloud georeferencing. Here, we have limited our research to the indirect georeferencing using ground control points, having the coordinates determined in the target coordinate system based on independent geodetic observations. To control the quality of the georeferencing, we also have emphasized the importance of using quality check points. The positional accuracy of the ground control points and check points is an important factor affecting the quality of photogrammetric products. Additionally, the data quality is influenced by the number and geographic distribution of the ground control points. The second phase is data processing, where UAV imagery and data for georeferencing are processed with "structure-from-motion" algorithms to produce a sparse point cloud in the selected coordinate system. Further, a dense photogrammetric point cloud is generated using dense image matching algorithms. In this step, the quality of intermediate results is mainly influenced by the input data quality and processing parameters. In the second part of the processing phase, we can perform the segmentation and classification of the point cloud, if the reconstruction of the 3D model is later conducted on a classified point cloud. The quality of the segmentation and classification is mainly influenced by selected methods. In the third phase, buildings from the point cloud are firstly detected and extracted, and then 3D building models are reconstructed. The data quality, i.e. the quality of the results in both steps, depends on the input data quality and the selected modelling methods. The quality of the 3D model is further influenced by the selected model's level of detail (LOD) and the related generalisation. Based on the literature review, we have examined the modelling procedures into detail, and we have identified key factors that influence the quality in 3D building modelling from data acquisition to the final 3D building model. With this, we have confirmed the first research hypothesis: *It is possible to identify individual factors that influence the quality of spatial data in each data processing phases from photogrammetric point cloud acquisition to the reconstruction of a georeferenced vector 3D building model, compliant with the requirements of the international standard OGC CityGML for LOD2*.

In the central part of the research, we have developed a conceptual model for ensuring the spatial data quality in the process of 3D building modelling based on UAV photogrammetric point cloud. The conceptual model is based on a detailed process model, and the latter has been expanded with steps based on the conceptual model for data-quality controlling within a 3D building modelling process. In the acquisition phase, factors that influence the quality of acquired UAV images and the quality of the measurement for indirect georeferencing are controlled. In the processing phase, it is important to monitor the quality of the point cloud georeferencing, in particular the positional accuracy. We further suggest controlling the completeness of the dense point cloud. In the case the point cloud segmentation and classification is conducted, the correctness and completeness of data has to be controlled as well. The final phase consists of 3D building modelling. Firstly, the quality of detected buildings has to be

controlled, where positional accuracy, topological correctness and completeness are important. Secondly, the quality check of the reconstructed 3D building model has to be performed by assessing positional accuracy, completeness, and logical consistency. Based on the results of this part of the study, we have confirmed the second research hypothesis: *»Based on the identified factors that influence the spatial data quality in individual phases of the process from the acquisition of the point cloud to the reconstruction of the georeferenced 3D building model, it is possible to develop a conceptual model for data-quality monitoring in each data processing step that ensures the required quality of the final 3D model.«* The developed process model, which includes not only data processing steps but also quality control procedures, is a novelty in the scientific domain. The process model transparently presents all phases from the acquisition of UAV data to the final 3D building model. However, it is limited to the building models in the LOD2 according to the OGC CityGML standard.

Additionally, we have verified the proposed conceptual model and the detailed process model for spatial data-quality monitoring within the process of 3D building modelling from the photogrammetric point cloud. The model has been verified on datasets in two study areas. For this purpose, we have developed an innovative solution using the ETL environment, which is an important contribution in the geospatial domain. The spatial ETL environment has been used to implement the selected part of the 3D building modelling process model, which enabled automatic and transparent data processing and facilitated the monitoring of the quality of results (see also Drešček et al., 2020).

For the selected datasets, we have further analysed the impact of selected factors on the data quality of in the modelling process. Here, the impact of the UAV flight altitude, the image overlap, and the number of ground control points on the positional accuracy of the photogrammetric point cloud has been analysed. It has been shown that these factors are influencing the positional accuracy of the point cloud. We also have confirmed that flying at a lower altitude and employing more ground control points contribute to the quality of photogrammetric products, i.e. the point cloud. We have further analysed the impact of selected factors on the quality of the final 3D building model. Concerning the used data-driven modelling process and the selected data, we found that 3D modelling parameters have a greater impact on the model quality than the positional accuracy of input data conditioned by flight altitude or image overlap. In the last part of the experiment, we have analysed the impact of the point cloud density on the quality of building detection, i.e. positional accuracy of 2D building outlines. The comparison between the building outlines determined from the point cloud with different densities confirmed the assumption that the lowering of the point density deteriorates the positional accuracy of the building outline. Additionally, the method for outline extraction should be considered due to the different generalisation and regularisation procedures affect the position and shape of identified buildings in the point cloud.

In this research, we have analysed and modelled processes from UAV data acquisition and processing to the reconstruction of georeferenced vector 3D building models. We have identified the key factors that influence data quality in this process and proposed a model for monitoring the spatial data quality in the whole process – from data acquisition to 3D building modelling. Despite some presented limitations of the research, the results are important for understanding the impact of factors on the quality of 3D city models and have, among other things, great potential for knowledge transfer into the practice.

VIRI

Abdul-Rahman, A., Pilouk, M. 2008. Spatial Data Modelling for 3D GIS. Berlin, Heidelberg, Springer: 291 str. doi:10.1007/978-3-540-74167-1

Agisoft. 2020. Metashape. https://www.agisoft.com/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2017a. Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. Journal of Surveying Engineering 143, 2: 1–10. doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2017b. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. Measurement 98: 221–227. doi:10.1016/j.measurement.2016.12.002

Albers, B., Kada, M., Wichmann, A. 2016. Automatic extraction and regularization of building outlines from airborne LIDAR point clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B3: 555–560. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B3-555-2016

Anderson, K., Gaston, K. J. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. Frontiers in Ecology and the Environment 11, 3: 138–146. doi:10.1890/120150

Apollonio, F. I., Ballabeni, A., Gaiani, M., Remondino, F. 2014. Evaluation of feature-based methods for automated network orientation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5: 47–54. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-47-2014

Ariza López, F. J., Atkinson Gordo, A. D. 2008. Analysis of Some Positional Accuracy Assessment Methodologies. Journal of Surveying Engineering 134, 2: 45–54. doi:10.1061/(asce)0733-9453(2008)134:2(45)

ASPRS. 1990. ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56, 7: 1068–1070.

ASPRS. 2015. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 81, 3: A1–A26. doi:10.14358/PERS.81.3.A1-A26

Astriani, W., Trisminingsih, R. 2016. Extraction, Transformation, and Loading (ETL) Module for Hotspot Spatial Data Warehouse Using Geokettle. Procedia Environmental Sciences 33: 626–634. doi:10.1016/j.proenv.2016.03.117

Awrangjeb, M., Zhang, C., Fraser, C. S. 2013. Automatic extraction of building roofs using LIDAR data and multispectral imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 83: 1–18. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.05.006

Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L. Van 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. V: Goos, G. (ur.), Hartmanis, J. (ur.), Leeuwen, J. van (ur.). Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer: 404–417. doi:10.1007/11744023_32

Bianco, S., Ciocca, G., Marelli, D. 2018. Evaluating the performance of structure from motion pipelines. Journal of Imaging 4, 8: 98. doi:10.3390/jimaging4080098

Bielecka, E. 2015. Geographical data sets fitness of use evaluation. Geodetski vestnik 59, 2: 335–348. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2015.02.335-348

Biljecki, F., Heuvelink, G. B. M., Ledoux, H., Stoter, J. 2018. The effect of acquisition error and level of detail on the accuracy of spatial analyses. Cartography and Geographic Information Science 45, 2: 156–176. doi:10.1080/15230406.2017.1279986

Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J. 2016. Generation of multi-LOD 3D city models in CityGML with the procedural modelling engine RANDOM3DCITY. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4/W1: 51–59. doi:10.5194/isprs-annals-IV-4-W1-51-2016

Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., Vosselman, G. 2016. The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 116: 42–54. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.03.003

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., Çöltekin, A. 2015. Applications of 3D city models: state of the art review. ISPRS International Journal of Geo-Information 4, 4: 2842–2889. doi:10.3390/ijgi4042842

Billen, R., Cutting-Decelle, A. F., Marina, O., de Almeida, J. P., M, C., Falquet, G., Leduc, T., Métral, C., Moreau, G., Perret, J., Rabin, G., San José, R., Yatskiv, I., Zlatanova, S. 2014. 3D city models and urban information: current issues and perspectives. Final publication of the European Cost action TU0801 – Semantic enrichment of 3D city models for sustainable urban development. Les Ulis, France, EDP Sciences: 129 str. doi:10.1051/TU0801/201400001

Boin, A. T., Hunter, G. J. 2006. Do spatial data consumers really understand data quality information? V: Caetano (ur.), M., Painho, M. (ur.). Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Lisbon, Portugal, 5–7 July 2006: 215–224.

Brenner, C. 2000. Towards fully automatic generation of city models. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIII-B3/1: 84-92.

van den Brink, L., Stoter, J., Zlatanova, S. 2013. Establishing a national standard for 3D topographic data compliant to CityGML. International Journal of Geographical Information Science 27, 1: 92–113. doi:10.1080/13658816.2012.667105

Lo Brutto, M., Garraffa, A., Meli, P. 2014. UAV platforms for cultural heritage survey: First results. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5: 227–234. doi:10.5194/isprsannals-II-5-227-2014

C-Astral. 2019. https://www.c-astral.com/ (Pridobljeno: 6. 9. 2020.)

CAA. 2020. Javna agencija za civilno letalstvo Republike Slovenije. Brezpilotni zrakoplovi – Nova skupna EU ureditev. https://www.caa.si/nova-skupna-eu-ureditev.html (Pridobljeno: 14. 12. 2020.)

Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C., Fua, P. 2010. BRIEF: Binary robust independent elementary features. V: Lecture Notes in Computer Science, 11th European Conference on Computer Vision. Heraklion, Crete, Greece, 5–11 September 2010: 778–792. doi:10.1007/978-3-642-15561-1_56

Campanaro, D. M., Landeschi, G., Dell'Unto, N., Leander Touati, A. M. 2016. 3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow. Journal of Cultural Heritage 18: 321–332. doi:10.1016/j.culher.2015.09.006

Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., Gattelli, M. 2015. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. Remote Sensing 7, 4: 4026–4047. doi:10.3390/rs70404026

Cappelle, C., El Najjar, M. E., Charpillet, F., Pomorski, D. 2012. Virtual 3D city model for navigation in urban areas. Journal of Intelligent and Robotic Systems 66, 3: 377–399. doi:10.1007/s10846-011-9594-0

Chen, J., Dowman, I., Li, S., Li, Z., Madden, M., Mills, J., Paparoditis, N., Rottensteiner, F., Sester, M., Toth, C., Trinder, J., Heipke, C. 2016. Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115: 3–21. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.09.008

Chen, R. 2011. The development of 3D city model and its applications in urban planning. V: Proceeding of 19th International Conference on Geoinformatics. Shanghai, China, 24–26 June 2011: 1–5. doi:10.1109/GeoInformatics.2011.5981007

CloudCompare. 2020. https://www.cloudcompare.org/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

Colomina, I., Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92: 79–97. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013

Coote, A., Knight, P., Svan Colding, T., Home, R., Fröjdenlund, J., Lysell, G., Streilein, A., Kane, P., Brady, K., Wozniak, P., Plá, M., Bayers, E., Ilves, R., Tuokko, J., Rijsdijk, M., Witmer, R., Cantat, F., Crompvoets, J., Stoter, J. 2017. Assessing the economic value of 3D Geo-Information. EuroSDR Official Pubilcation No. 68: 128 str.

Coveney, S., Roberts, K. 2017. Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: Data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling. International Journal of Remote Sensing 38, 8–10: 3159–3180. doi:10.1080/01431161.2017.1292074

Cramer, M., Przybilla, H. J., Zurhorts, A. 2017. UAV cameras: Overview and geometric calibration benchmark. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W6: 85–92. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017

Dai, Y., Gong, J., Li, Y., Feng, Q. 2017. Building segmentation and outline extraction from UAV image-derived point clouds by a line growing algorithm. International Journal of Digital Earth 10, 11: 1077–1097. doi:10.1080/17538947.2016.1269841

Dandois, J. P., Ellis, E. C. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. Remote Sensing of Environment 136: 259–276. doi:10.1016/j.rse.2013.04.005

Dandois, J. P., Olano, M., Ellis, E. C. 2015. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. Remote Sensing 7, 10: 13895–13920. doi:10.3390/rs71013895

Delavar, M. R., Devillers, R. 2010. Spatial data quality: From process to decisions. Transactions in GIS 14, 4: 379–386. doi:10.1111/j.1467-9671.2010.01224.x

Devillers, R., Bédard, Y., Jeansoulin, R., Moulin, B. 2007. Towards spatial data quality information analysis tools for experts assessing the fitness for use of spatial data. International Journal of Geographical Information Science 21, 3: 261–282. doi:10.1080/13658810600911879

Devillers, R. (ur.), Jeansoulin, R. (ur.). 2006. Fundamentals of spatial data quality. London, UK, Newport Beach, CA, USA, ISTE: 310 str. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Devillers, R., Stein, A., Bédard, Y., Chrisman, N., Fisher, P., Shi, W. 2010. Thirty years of research on spatial data quality: Achievements, failures, and opportunities. Transactions in GIS 14, 4: 387–400. doi:10.1111/j.1467-9671.2010.01212.x

Dorninger, P., Pfeifer, N. 2008. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds. Sensors 8, 11: 7323–7343. doi:10.3390/s8117323

Drešček, U., Kosmatin Fras, M., Lisec, A., Grigillo, D. 2020. The impact of point cloud density on building outline extraction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science XLIII-B2-2: 407–413. doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-407-2020

Drešček, U., Kosmatin Fras, M., Tekavec, J., Lisec, A. 2020. Spatial ETL for 3D building modelling based on unmanned aerial vehicle data in semi-urban areas. Remote Sensing 12, 12: 1972. doi:10.3390/rs12121972

Drobež, P. 2016. Analiza možnosti vzpostavitve 3D katastra ob uporabi virov daljinskega zaznavanja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Drobež): 167 str.

Drobež, P., Grigillo, D., Lisec, A., Fras, M. K. 2016. Remote sensing data as a potential source for establishment of the 3D cadastre in Slovenia. Geodetski vestnik 60, 3: 392–422. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2016.03.392-422

Drobne, S., Lisec, A. 2009. Multi-attribute decision analysis in GIS: Weighted linear combination and crdered weighted averaging. Informatica 33: 459–474. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Eisenbeiss, H. 2009. UAV Photogrammetry. Doctoral dissertation. Zürich, ETH (samozaložba: H. Eisenbeiss): 203 str. doi:10.3929/ethz-a-010782581

Ellul, C., Stoter, J., Harrie, L., Shariat, M., Behan, A., Pla, M. 2018. Investigating the state of play of

geobim across Europe. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W10: 19–26. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-19-2018

Eriksson, H.-E., Penker, M., Lyons, B., Fado, D. 2004. UML™ 2 Toolkit. Indianapolis, IN, USA, Wiley Publishing: 511 str.

ESRI. 2020. ArcGIS Pro ver. 2.4. https://www.esri.com/en-us/home (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

EuroSDR. 2020. European Spatial Data Research. http://www.eurosdr.net/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

Everaerts, J. 2009. NEWPLATFORMS – Unconventional Platforms (Unmanned Aircraft Systems) for Remote Sensing. Final report. V: EuroSDR Official Publication No. 56: 57–102.

FGDC. 1998. National Standard for Spatial Data Accuracy. Reston, VA, USA, Federal Geographic Data Committee: 38 str. doi:10.1007/BF03006812

von Fintel, R. 2015. Modern CMOS Cameras as Replacements for CCD Cameras. NASA Tech Briefs. https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/issue-archive/23206 (Pridobljeno: 28. 9. 2020.)

Furukawa, Y., Hernández, C. 2013. Multi-View Stereo: A Tutorial. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision 9, 1–2: 1–148. doi:10.1561/0600000052

Furukawa, Y., Ponce, J. 2008. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32, 8: 1362–1376. doi:10.1109/TPAMI.2009.161

Galván Rangel, M. J., Gonçalves, G. R., Pérez, J. A. 2018. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. International Journal of Remote Sensing 39, 21: 7154–7171. doi:10.1080/01431161.2018.1515508

Gerke, M., Przybilla, H.-J. 2016. Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 1: 17–30. doi:10.1127/pfg/2016/0284

Gillan, J. K., Karl, J. W., Elaksher, A., Duniway, M. C. 2017. Fine-resolution repeat topographic surveying of dryland landscapes using UAS-based structure-from-motion photogrammetry: Assessing accuracy and precision against traditional ground-based erosion measurements. Remote Sensing 9, 5: 437. doi:10.3390/rs9050437

Gindraux, S., Boesch, R., Farinotti, D. 2017. Accuracy assessment of digital surface models from Unmanned Aerial Vehicles' imagery on glaciers. Remote Sensing 9, 2: 186. doi:10.3390/rs9020186

Griffiths, D., Burningham, H. 2019. Comparison of pre- and self-calibrated camera calibration models for UAS-derived nadir imagery for a SfM application. Progress in Physical Geography 43, 2: 215–235. doi:10.1177/0309133318788964

Grigillo, D., Kanjir, U. 2012. Urban object extraction from digital surface model and digital aerial images. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I-3: 215–220. doi:10.5194/isprsannals-I-3-215-2012

Grilli, E., Menna, F., Remondino, F. 2017. A review of point clouds segmentation and classification algorithms. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W3: 339–344. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017

Gröger, G., Plümer, L. 2012. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 71: 12–33. doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004

Haala, N. 2013. The Landscape of Dense Image Matching Algorithms. V: Fritsch, D. (ur.). Photogrammetric Week '13. Stuttgart, Germany, 9–13 September 2013. Belin, Offenbach, Wichmann: 271–284.

Haala, N., Cavegn, S. 2016. High density aerial image matching: State-of-the-art and future prospects. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science XLI-B4: 625–630. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B4-625-2016

Haala, N., Kada, M. 2010. An update on automatic 3D building reconstruction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 6: 570–580. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.09.006

Hackel, T., Wegner, J. D., Savinov, N., Ladicky, L., Schindler, K., Pollefeys, M. 2018. Large-Scale Supervised Learning For 3D Point Cloud Labeling: Semantic3D.Net. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 84, 5: 297–308. doi:10.14358/PERS.84.5.297

Hackel, T., Wegner, J. D., Schindler, K. 2016. Contour detection in unstructured 3D point clouds. V: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. IEEE: 1610–1618. doi:10.1109/CVPR.2016.178

Harwin, S., Lucieer, A., Osborn, J. 2015. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. Remote Sensing 7, 9: 11933–11953. doi:10.3390/rs70911933

Hastedt, H., Luhmann, T. 2015. Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4: 321–328. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015

Henn, A., Gröger, G., Stroh, V., Plümer, L. 2013. Model driven reconstruction of roofs from sparse LIDAR point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 76: 17–29. doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.11.004

Hirschmüller, H. 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30, 2: 328–341. doi:10.1097/01.prs.0000472301.00568.5b

Hirschmüller, H. 2011. Semi-Global Matching – Motivation, Developments and Applications. V: Fritsch, D. (ur.). Photogrammetric Week '11. Stuttgart, Germany, 5–9 September 2011. Belin, Offenbach, Wichmann: 173–184.

Höhle, J., Potuckova, M. 2011. Assessment of the quality of digital terrain models. EuroSDR, Official Pubilcation No. 60: 91 str.

Hosseininaveh Ahmadabadian, A., Robson, S., Boehm, J., Shortis, M., Wenzel, K., Fritsch, D. 2013. A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 78: 157–167. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.01.015

Huang, H., Brenner, C., Sester, M. 2013. A generative statistical approach to automatic 3D building roof reconstruction from laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 79: 29–43. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.02.004

ICAO. 2011. Unmanned Aircraft Systems (UAS). The Global Perspective 2009/2010. 7th Edition. International Civil Aviation Organization: 38 str.

Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., Rosette, J. 2019. Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. Current Forestry Reports 5: 155–168. doi:10.1007/s40725-019-00094-3

Indrajit, A., van Loenen, B., Ploeger, H., van Oosterom, P. 2020. Developing a spatial planning information package in ISO 19152 land administration domain model. Land Use Policy 98: 104111. doi:10.1016/j.landusepol.2019.104111

ISO. 2020. Mednarodna organizacija za standardizacijo. https://www.iso.org/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

ISPRS. 2019. The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. https://www.isprs.org/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

James, M. R., Robson, S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. Earth Surface Processes and Landforms 39, 10: 1413–1420. doi:10.1002/esp.3609

Jarzabek-Rychard, M. 2012. Reconstruction of building outlines in dense urban areas based on LIDAR data and address points. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B3: 121–126. doi:10.5194/isprsarchives-xxxix-b3-121-2012

Jarzabek-Rychard, M., Borkowski, A. 2016. 3D building reconstruction from ALS data using unambiguous decomposition into elementary structures. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 118: 1–12. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.04.005

Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., Yang, L. 2017. UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. Remote Sensing 9, 3: 278. doi:10.3390/rs9030278

Kaartinen, H., Hyyppä, J., Gülch, E., Hyyppä, H., Matikainen, L., Vosselman, G., Hofmann, A. D., Mäder, U., Persson, Å., Söderman, U., Elmqvist, M., Ruiz, A., Dragoja, M., Flamanc, D., Maillet, G., Kersten, T., Carl, J., Hau, R., Wild, E., Frederiksen, L., Holmgaard, J., Vester, K. 2005. EuroSDR Building Extraction Comparison. V: Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop 2005: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. Hannover, Germany, 17–20 May 2005: 1–6.

Kada, M., McKinley, L. 2009. 3D building reconstruction from LiDAR based on a cell decomposition approach. V: Stilla, U. (ur.), Rottensteiner, F. (ur.), Paparoditis, N. (ur.). Proceedings of the CMRT09:

Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring – Concepts, Algorithms and Evaluation. Paris, France, 3–4 September 2009: 47–52.

Kedzierski, M., Wierzbicki, D. 2015. Radiometric quality assessment of images acquired by UAV's in various lighting and weather conditions. Measurement 76: 156–169. doi:10.1016/j.measurement.2015.08.003

Kolbe, T. H., Nagel, C., Stadler, A. 2009. CityGML – OGC standard for photogrammetry? V: Fritsch, D. (ur.). Photogrammetric Week '09. Stuttgart, Germany, 7–11 September 2009. Heidelberg, Wichmann: 265–277.

Kosmatin Fras, M. 2002. Total quality management in photogrammetric projects – models and applications in Slovenia. Doktorska disertacija. Milano, Politecnico di Milano (samozaložba M. Kosmatin Fras): 254 str.

Kosmatin Fras, M., Drešček, U., Lisec, A., Grigillo, D. 2020. Analiza vplivov na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije. Geodetski vestnik 64, 4: 489–507. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507

Krämer, M., Haist, J., Reitz, T. 2007. Methods for spatial data quality of 3D city models. V: Proceedings of 5th Eurographics Italian Chapter Conference, Trento, Italy, 14 February 2007: 167–172. doi:10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2007/167-172

Kraus, K. 2007. Photogrammetry. Geometry from Images and Scans. Second Edition. Berlin, New York, De Gruyter: 459 str.

Kresse, W. (ur.), Danko, D. M. (ur.). 2012. Handbook of Geographic Information. Berlin, Heidelberg, Springer: 1120 str. doi:10.1007/978-3-540-72680-7

Kutzner, T., Chaturvedi, K., Kolbe, T. H. 2020. CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science 88, 1: 43–61. doi:10.1007/s41064-020-00095-z

Ledoux, H. 2013. On the validation of solids represented with the international standards for geographic information. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 28, 9: 693–706. doi:10.1111/mice.12043

Ledoux, H. 2018. val3dity: validation of 3D GIS primitives according to the international standards. Open Geospatial Data, Software and Standards 3, 1: 1–12. doi:10.1186/s40965-018-0043-x

Lemmens, M. 2011. Geo-information. Technologies, Applications and the Environment. Dordrecht [etc.], Springer: 350 str. doi:10.1007/978-94-007-1667-4_1

Li, D., Zhang, J., Wu, H. 2012. Spatial data quality and beyond. International Journal of Geographical Information Science 26, 12: 2277–2290. doi:10.1080/13658816.2012.719625

Lisec, A., Ferlan, M., Lobnik, F., Šumrada, R. 2008. Modelling the rural land transaction procedure. Land Use Policy 25, 2: 286–297. doi:10.1016/j.landusepol.2007.08.003

Litwiller, D. 2001. CCD vs. CMOS: Facts and fiction. Photonics Spectra 35, 1: 154–158.

https://www2.cs.duke.edu/courses/fall11/cps274/papers/Littwiller01.pdf (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

Lowe, D. G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60, 2: 91–110. doi:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. 2014. Close-range photogrammetry and 3D imaging. Second Edition. Berlin, De Gruyter: 684 str. doi:10.1515/9783110607253

Luhmann, T., Fraser, C., Maas, H. G. 2016. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115: 37–46. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006

Maas, H. G., Vosselman, G. 1999. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, 2–3: 153–163. doi:10.1016/S0924-2716(99)00004-0

Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. New York [etc.], John Wiley and Sons: 393 str.

Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science 20, 7: 703–726. doi:10.1080/13658810600661508

Malihi, S., Zoej, M. J. V., Hahn, M. 2018. Large-scale accurate reconstruction of buildings employing point clouds generated from UAV imagery. Remote Sensing 10, 7: 1148. doi:10.3390/rs10071148

Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., Eisenbeiss, H. 2012. Unmanned aerial vehicle in cadastral applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science XXXVIII-1/C22: 57–62. doi:10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-57-2011

Martell, A., Lauterbach, H. A., Schilling, K., Nuchtcer, A. 2018. Benchmarking Structure from Motion Algorithms of Urban Environments with Applications to Reconnaissance in Search and Rescue Scenarios. V: IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Philadelphia, PA, USA, 6–8 August 2018: 1–7. doi:10.1109/SSRR.2018.8468612

Martensson, S.-G., Reshetyuk, Y. 2017. Height uncertainty in digital terrain modelling with unmanned aircraft systems. Survey Review 49, 355: 312–318. doi:10.1080/00396265.2016.1180754

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.-J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F.-J. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 72: 1–10. doi:10.1016/j.jag.2018.05.015

Meijer, M., Vullings, L. A. E., Bulens, J. D., Rip, F. I., Boss, M., Hazeu, G., Storm, M. 2015. Spatial data quality and a workflow tool. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W3: 55–59. doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-55-2015

Meißner, H., Cramer, M., Piltz, B. 2017. Benchmarking the optical resolving power of UAV based camera. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W6: 243–249. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-243-2017

Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J. J., Gavelle, E., Borghini, S. 2015. Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4: 397–402. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-397-2015

Mikolajczyk, K., Schmid, C. 2005. The concept of satisfaction in industrial markets: A contextual perspective and a case study from the software industry. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 27, 10: 1615–1630. doi:10.1016/S0019-8501(00)00114-0

Mikrut, S. 2016. Classical photogrammetry and UAV – Selected ascpects. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B1: 947–952. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-947-2016

Mohamed, M., Landes, T., Grussenmeyer, P., Zhang, W. 2013. Multi-dimensional quality assessment of photogrammetric and lidar datasets based on a vector approach. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-2/W1: 93–98. doi:10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-93-2013

Mongus, D., Lukač, N., Žalik, B. 2014. Ground and building extraction from LiDAR data based on differential morphological profiles and locally fitted surfaces. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 93: 145–156. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.12.002

Morel, J.-M., Yu, G. 2009. ASIFT: A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison. SIAM Journal on Imaging Sciences 2, 2: 438–469. doi:10.1137/080732730

Mosbrucker, A. R., Major, J. J., Spicer, K. R., Pitlick, J. 2017. Camera system considerations for geomorphic applications of SfM photogrammetry. Earth Surface Processes and Landforms 42, 6: 969–986. doi:10.1002/esp.4066

Nasrullah, A. R. 2016. Systematic Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Product Quality. Master thesis. Enschede, the Netherlands, University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (samozaložba A. R. Nasrullah): 83 str.

Nex, F., Remondino, F. 2014. UAV for 3D mapping applications: A review. Applied Geomatics 6: 1–15. doi:10.1007/s12518-013-0120-x

Niemeyer, J., Rottensteiner, F., Soergel, U. 2014. Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 87: 152–165. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.11.001

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Saleri, R. 2013. Accuracy and block deformation analysis in automatic UAV and terrestrial photogrammetry – lesson learnt. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W1: 203–208. doi:10.5194/isprsannals-II-5-W1-203-2013

OGC. 2020. Open Geospatial Consortium. https://www.ogc.org/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

Van Oosterom, P. (ur.), Zlatanova, S. (ur.), Peninga, F. (ur.), Elfriede, F. (ur.). 2008. Advances in 3D Geoinformation Systems. Berlin, Heidelberg, Springer: 441 str. doi:10.1007/978-3-540-72135-2

Open Geospatial Consortium. 2012. City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, version 2.0. https://www.ogc.org/standards/citygml (Pridobljeno: 24. 9. 2020.)

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.

Oude Elberink, S., Vosselman, G. 2009. Building reconstruction by target based graph matching on incomplete laser data: Analysis and limitations. Sensors 9, 8: 6101–6118. doi:10.3390/s90806101

Oude Elberink, S., Vosselman, G. 2011. Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, 2: 157–165. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.09.009

Ozbek, E. D., Zlatanova, S., Aydar, S. A., Yomralioglu, T. 2016. 3D geo-information requirements for disaster and emergency management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B2: 101–108. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-101-2016

Pajares, G. 2015. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 81, 4: 281-329. doi:10.14358/PERS.81.4.281

Pfeifer, N., Rutzinger, M., Rottensteiner, F., Muecke, W., Hollaus, M. 2007. Extraction of building footprints from airborne laser scanning: Comparison and validation techniques. V: 2007 Urban Remote Sensing Joint Event. Paris, France, 11–13 April 2007: 1–9. doi:10.1109/URS.2007.371854

Piermattei, L. 2016. The use of Structure from Motion technologies for high-resolution terrain modelling on high altitude catchments. Doctoral dissertation. Padova, Università degli Studi di Padova (samozaložba L. Piermattei): 134 str.

Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F. 2014. State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record 29, 146: 144–166. doi:10.1111/phor.12063

Reshetyuk, Y., Mårtensson, S.-G. 2016. Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles. The Photogrammetric Record 31, 154: 143–165. doi:10.1111/phor.12143

Rinner, C. 2018. Spatial Decision Support. V: Wilson, J. P. (ur.). The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge. doi:10.22224/gistbok/2018.2.1

Rock, G., Ries, J. B., Udelhoven, T. 2011. Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22: 69–73. doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-69-2011

Rosnell, T., Honkavaara, E. 2012. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadrocopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. Sensors 12, 1: 453–480. doi:10.3390/s120100453

Rosser, J. F., Long, G., Zakhary, S., Boyd, D. S., Mao, Y., Robinson, D. 2019. Modelling UK residential housing stock for 3D building energy simulation using CityGML EnergyADE. ISPRS International Journal of Geo-Information 8, 4: 163. doi:10.3390/ijgi8040163

Rottensteiner, F. 2003. Automatic generation of high-quality building models from LiDAR data. IEEE Computer Graphics and Applications 23, 6: 42–50. doi:10.1109/MCG.2003.1242381

Rottensteiner, F., Sohn, G., Gerke, M., Wegner, J. D., Breitkopf, U., Jung, J. 2014. Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 93: 256–271. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.10.004

Rouhani, M., Lafarge, F., Alliez, P. 2017. Semantic segmentation of 3D textured meshes for urban scene analysis. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 123: 124–139. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.12.001

Rupnik, E., Nex, F., Toschi, I., Remondino, F. 2015. Aerial multi-camera systems: Accuracy and block triangulation issues. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 101, 60: 233–246. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.12.020

SafeSoftware. 2020. FME (Feature Manipulation Engine). https://www.safe.com/ (Pridobljeno: 30. 9. 2020.)

Sampath, A., Shan, J. 2007. Building boundary tracing and regularization from airborne lidar point clouds. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 73, 7: 805–812. doi:10.14358/PERS.73.7.805

Santise, M., Fornari, M., Forlani, G., Roncella, R. 2014. Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5: 529–536. doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-529-2014

dos Santos, R. C., Galo, M., Carrilho, A. C. 2019. Extraction of Building Roof Boundaries from LiDAR Data Using an Adaptive Alpha-Shape Algorithm. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 16, 8: 1289–1293. doi:10.1109/LGRS.2019.2894098

Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J., Rodríguez-Pérez, J., Ordóñez, C. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sensing 10, 10: 1606. doi:10.3390/rs10101606

Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R. 2007. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. Computer Graphics Forum 26, 2: 214–226. doi:10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x

Shahbazi, M., Sohn, G., Theau, J., Menard, P. 2015. Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. Sensors 15, 11: 27493–27524. doi:10.3390/s151127493

Shi, W. (ur.), Wu, B. (ur.), Stein, A. (ur.). 2015. Uncertainty Modelling and Quality Control for Spatial Data. Boca Raton, CRC Press: 294 str. doi:10.1201/b19160

Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. 2014. Influence of blur on feature matching and a geometric approach for photogrammetric deblurring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3: 321–326. doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-321-2014

Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. 2015. UAV image blur-its influence and ways to correct it. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences

XL-1/W4: 33–39. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-33-2015

Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. 2016. Automatic detection of blurred images in UAV image sets. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 122: 1–16. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.09.010

Singh, K. K., Frazier, A. E. 2018. A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. International Journal of Remote Sensing 39: 15–16: 5078–5098. doi:10.1080/01431161.2017.1420941

SIST EN ISO 19157:2015. Geografske informacije – Kakovost podatkov.

SIST EN ISO 19115:2005. Geografske informacije – Metapodatki.

SIST EN ISO 19107:2020: Geografske informacije – Prostorska shema.

Schwalbe, E., Maas, H.-G., Seidel, F. 2005. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-3/W19: 209–214.

Sithole, G., Vosselman, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 59, 1–2: 85–101. doi:10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004

Snavely, N., Seitz, S. M., Szeliski, R. 2006. Photo tourism: Exploring Photo Collections in 3D. ACM Transactions on Graphics 25, 3: 835–846. doi:10.1145/1141911.1141964

Sohn, G., Huang, X., Tao, V. 2008. Using a Binary Space Partitioning Tree for Reconstructing Polyhedral Building Models from Airborne Lidar Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 74, 11: 1425–1438. doi:10.14358/PERS.74.11.1425

Stoter, J., de Kluijver, H., Kurakula, V. 2008. 3D noise mapping in urban areas. International Journal of Geographical Information Science 22, 8: 907–924. doi:10.1080/13658810701739039

Stoter, J., Peters, R., Commandeur, T., Dukai, B., Kumar, K., Ledoux, H. 2020. Automated reconstruction of 3D input data for noise simulation. Computers, Environment and Urban Systems 80: 101424. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2019.101424

Stoter, J., Salzmann, M. 2003. Towards a 3D cadastre: Where do cadastral needs and technical possibilities meet? Computers, Environment and Urban Systems 27, 4: 395–410. doi:10.1016/S0198-9715(02)00039-X

Strecha, C., Zoller, R., Rutishauser, S., Brot, B., Schneider-Zapp, K., Chovancova, V., Krull, M., Glassey, L. 2015. Quality Assessment of 3D Reconstruction Using Fisheye and Perspective Sensors. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3/W4: 215–222. doi:10.5194/isprsannals-II-3-W4-215-2015

Stylianidis, E. (ur.), Remondino, F. (ur.). 2016. 3D recording, documentation and management of cultural heritage. Dunbeath, Scotland, UK, Whittles Publishing: 388 str.

Šumrada, R. 2009. Slovenski, evropski in mednarodni standardi za prostorske podatke. Geodetski vestnik 53, 2: 319–329.

Szeliski, R. 2011. Computer Vision – Algorithms and Applications. London, Springer: 812 str. doi:10.1007/978-3-642-20144-8_11

Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P. 2008. Extended RANSAC Algorithm for Automatic Detection of Building Roof Planes From Lidar Data. The Photogrammetric Journal of Finland 21, 1: 97–109.

Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., Koehl, M. 2007. Model-driven and data-driven approaches using LIDAR data: Analysis and comparison. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-3/W4: 87–92.

Tola, E., Lepetit, V., Fua, P. 2010. DAISY: An efficient dense descriptor applied to wide-baseline stereo. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32, 5: 815–830. doi:10.1109/TPAMI.2009.77

Tomljenovic, I., Höfle, B., Tiede, D., Blaschke, T. 2015. Building extraction from Airborne Laser Scanning data: An analysis of the state of the art. Remote Sensing 7, 4: 3826–3862. doi:10.3390/rs70403826

Tonkin, T., Midgley, N. 2016. Ground-Control Networks for Image Based Surface Reconstruction: An Investigation of Optimum Survey Designs Using UAV Derived Imagery and Structure-from-Motion Photogrammetry. Remote Sensing 8, 9: 786. doi:10.3390/rs8090786

Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., Borra-Serrano, I., Pena, J. M. 2018. Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. Precision Argiculture 19: 115–133. doi:10.1007/s11119-017-9502-0

Toschi, I., Ramos, M. M., Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Moe, K., Poli, D., Legat, K., Fassi, F. 2017. Oblique photogrammetry supporting 3D urban reconstruction of complex scenarios. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science XLII-1/W1: 519–526. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-519-2017

Triglav Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin Fras, M. 2010. Theoretical LiDAR point density for topographic mapping in the largest scales. Geodetski vestnik 54, 3: 403–416.

Triglav, J. 2012. Analiza pomena geolokacije kot funkcije časa. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaloža J. Triglav): 150 str.

Turner, D., Lucieer, A., de Jong, S. M. 2015. Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Remote Sensing 7, 2: 1736–1757. doi:10.3390/rs70201736

Udin, W. S., Ahmad, A. 2014. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation flying altitude using unmanned aerial vehicle. V: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 8th International Symposium of the Digital Earth. Sarawak, Malaysia, 6–29 August 2013: 1–7. doi:10.1088/1755-1315/18/1/012027

UN-GGIM. 2020. Future Trends in geospatial information management: the five to ten year vision.

Third Edition, August 2020: 44 str. https://ggim.un.org/future-trends/ (Pridobljeno: 22. 9. 2020.)

Uredba o sistemih brezpilotnih zrakplovov. Uradni list RS, št. 52/16 in 81/16 – popr.

Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A., Strecha, C. 2016. Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-3: 139–146. doi:10.5194/isprsannals-III-3-139-2016

Wahl, R., Schnabel, R., Klein, R. 2008. From Detailed Digital Surface Models to City Models Using Constrained Simplification. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 3: 207–215.

Weinmann, M., Jutzi, B., Hinz, S., Mallet, C. 2015. Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 105: 286–304. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.016

Wen, X., Xie, H., Liu, H., Yan, L. 2019. Accurate reconstruction of the LoD3 building model by integrating multi-source point clouds and oblique remote sensing imagery. ISPRS International Journal of Geo-Information 8, 3: 135. doi:10.3390/ijgi8030135

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology 179: 300–314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021

Widyaningrum, E., Gorte, B., Lindenbergh, R. 2019. Automatic building outline extraction from ALS point clouds by ordered points aided Hough transform. Remote Sensing 11, 14: 1727. doi:10.3390/rs11141727

Wierzbicki, D., Kedzierski, M., Fryskowska, A. 2015. Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4: 1–8. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-1-2015

Wong, K., Ellul, C. 2016. Using geometry-based metrics as part of fitness-for-purpose evaluations of 3D city models. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W1: 129–136. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-129-2016

Wong, K. K. Y. 2015. Economic Value of 3D Geographic Information. EuroSDR Report: 23 str.

Xiong, B., Oude Elberink, S., Vosselman, G. 2014. A graph edit dictionary for correcting errors in roof topology graphs reconstructed from point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 93: 227–242. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.01.007

Zhang, J., Zhao, X., Chen, Z., Lu, Z. 2019. A Review of Deep Learning-Based Semantic Segmentation for Point Cloud. IEEE Access 7, 179118–179133. doi:10.1109/ACCESS.2019.2958671

Zhang, K., Yan, J., Chen, S. C. 2006. Automatic construction of building footprints from airborne LIDAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44, 9: 2523–2533. doi:10.1109/TGRS.2006.874137

Zheng, Y., Weng, Q. 2015. Model-driven reconstruction of 3-D buildings using LiDAR data. IEEE

Geoscience and Remote Sensing Letters 12, 7: 1541–1545. doi:10.1109/LGRS.2015.2412535