

ANALIZA VPLIVOV NA KAKOVOST IZDELKOV UAV FOTOGRAMETRIJE

ANALYSIS OF THE IMPACTS ON THE QUALITY OF UAV PHOTOGRAHMETRIC PRODUCTS

Mojca Kosmatin Fras, Urška Drešček, Anka Liseč, Dejan Grigillo

UDK: UDK : 528.7

Klasifikacija prispevka po COBISS:SI: 1.02

Prispelo: 30. 9. 2020

Sprejeto: 28. 11. 2020

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507

REVIEW ARTICLE

Received: 30. 9. 2020

Accepted: 28. 11. 2020

IZVLEČEK

Daljinsko voden letalniki (angl. unmanned aerial vehicles), opremljeni z različnimi senzorji in napravami, se v geodeziji, geoinformatiki in okoljskih strokah vse pogosteje uporabljajo za zajem prostorskih podatkov. Razvilo se je novo področje, to je UAV fotogrametrija, ki obravnava fotogrametrični zajem in obdelavo fotografij, pridobljenih z daljinsko vodenimi letalniki. V študiji analiziramo različne dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije, s poudarkom na položajni točnosti. Predstavljamo jih v treh skupinah, in sicer obravnavamo dejavnike vpliva, ki so povezani z: (a) lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij, (b) načrtovanjem in izvedbo snemalne misije ter (c) oslonilnimi točkami za posreden način georeferenciranja fotografij. Izbrane dejavnike smo analizirali na podlagi pregleda relevantnih znanstvenih objav, vpliv števila in razporeditve oslonilnih točk na položajno točnost oblaka točk pa smo dodatno preverili na lastnem primeru. Na koncu podajamo ključne ugotovitve in priporočila za izvajanje UAV fotogrametričnih projektov, kjer poudarjam pomen snemanja v dobrih svetlobnih in vremenskih razmerah, uporabe čim boljše opreme, ustrezne izbire parametrov snemalne misije, zadostnega števila oslonilnih točk, ki so izmerjene z ustrezno položajno točnostjo, in njihove enakomerne razporeditve po območju obravnavane.

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles, equipped with various sensors and devices, are increasingly used to acquire geospatial data in geodesy, geoinformatics, and environmental studies. In this context, a new research and professional field has been developed – UAV photogrammetry – dealing with photogrammetry data acquisition and data processing, acquired by unmanned aerial vehicles. In this study, we analyse the selected factors that impact the quality of data provided using UAV photogrammetry, with the focus on positional accuracy; they are discussed in three groups: (a) factors related to the camera properties and the quality of images; (b) factors related to the mission planning and execution; and (c) factors related to the indirect georeferencing of images using ground control points. These selected factors are analysed based on the detailed review of relevant scientific publications. Additionally, the influence of the number of ground control points and their spatial distribution on point clouds' positional accuracy has been investigated for the case study. As the conclusion, key findings and recommendations for UAV photogrammetric projects are given; we have highlighted the importance of suitable lighting and weather conditions when performing UAV missions for spatial data acquisition, quality equipment, appropriate parameters of UAV data acquisition, and a sufficient number of ground control points, which should be determined with the appropriate positional accuracy and their correct distribution in the field.

KLJUČNE BESEDE

fotogrametrija, daljinsko voden letalnik, UAV, UAV fotogrametrija, kakovost, oslonilne točke

KEY WORDS

photogrammetry, unmanned aerial vehicle, UAV, UAV photogrammetry, quality, ground control points

1 UVOD

V klasični fotogrametriji so postopki in algoritmi pridobivanja prostorskih podatkov iz fotografij dobro raziskani in uveljavljeni. Z razvojem računalniške tehnologije in računalniškegavida v zadnjih letih pa se tudi v fotogrametriji precej spreminjača zajem in obdelava fotogrametričnih posnetkov. Pri tem imajo pomembno vlogo tudi daljinsko vodenī letalniki, ki omogočajo hiter in cenovno ugoden zajem fotografij iz zraka (Nex in Remondino, 2014). Razvilo se je novo področje UAV fotogrametrije, kjer kratica UAV izhaja iz angleškega termina za daljinsko vodenī letalnik (angl. *unmanned aerial vehicle*). Ker se je ta termin uveljavil v tuji strokovni literaturi (Rock, Ries in Udelhoven, 2012; Nocerino et al., 2013; Hastedt in Luhmann, 2015; idr.), ga zaradi enostavnosti in jasnega pomena uporabljamotudi v tem članku.

Namen prispevka je sistematično predstaviti in analizirati glavne dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije. Glavni izdelki so oblak točk, digitalni model površja, ortofoto in kot njihova nadgradnja 3D-modeli mest in pokrajini. Pri preučevanju dejavnikov, ki vplivajo na rezultate fotogrametrične obdelave posnetkov z letalniki, so razlike v primerjavi s klasično aerofotogrametrijo opazne že pri izbiri opreme in izvedbi snemanja. Daljinsko vodenī letalniki lahko za letenje uporabljajo fiksna krila ali rotorje. Vsaka vrsta letalnika ima svoje prednosti in slabosti. Letalniki s krili lahko nepretrgoma letijo dalj časa, tudi več ur, niso zelo občutljivi na veter in so razmeroma enostavni za upravljanje, potrebujejo pa ustrezno in dovolj veliko območje za pristajanje in vzletanje. Letalniki z rotorji lahko brez menjave baterij letijo le krajsi čas (okrog pol ure), bolj so občutljivi na veter, tresljaji zaradi delovanja rotorjev lahko slabo vplivajo na ostrino fotografij, njihovo upravljanje zahteva tudi več izurjenost. Njihove prednosti so v tem, da lahko lebdijo v zraku ali se premikajo zelo počasi, so okretnejši pri letenju in lahko vzletajo ter pristajajo v omejenem prostoru. Izberi opreme, ki je vgrajena v letalnik, je omejena z največjo dovoljeno skupno težo bremena na letalniku in zmogljivostjo baterij, ki omogočajo nemoteno delovanje senzorjev na letalniku. Za zajem fotografij se največkrat uporabljajo cenovno ugodni kompaktni fotoaparati, ki imajo za fotogrametrično uporabo precej pomanjkljivosti: majhen senzor, slabša kakovost objektiva, običajno je vgrajen pomicni zaklop, parametri notranje orientacije so nestabilni itd. Za doseganje kakovostnih rezultatov, primerljivih z uveljavljenimi fotogrametričnimi izdelki, je treba prilagoditi zajem podatkov, kar vključuje ustrezno izbiro parametrov snemalne misije že v fazì načrtovanja, kot tudi postopke obdelave zajetih fotografij.

Metode, ki smo jih uporabili v analizah, so predstavljene v drugem poglavju. Sledijo tri poglavja, v katerih podrobneje analiziramo posamezne sklope dejavnikov vpliva na kakovost izdelkov. V petem poglavju poleg rezultatov analize ugotovitev, pridobljenih iz literature, predstavimo rezultate analize vpliva števila in razporeditve oslonilnih točk (angl. *ground control points, GCPs*) na kakovost georeferenciranega oblaka točk za lasten primer. V sklepnih ugotovitvah, to je v šestem poglavju, izpostavimo ključne ugotovitve in priporočila za izvajanje projektov UAV fotogrametričnega zajema podatkov.

2 METODE RAZISKAVE

Kakovost fotogrametričnih izdelkov je rezultat številnih dejavnikov v celotnem postopku obdelave podatkov, ki jih je težko obravnavati ločeno. Analize kakovosti izdelkov se zato izvajajo eksperimentalno na testnih območjih, izvedba takšnih raziskav je zahtevna in dolgotrajna. Obravnavana testna območja so različnih velikosti, imajo različne geografske značilnosti, različna je uporabljenareprema, prav tako

metodologija itn. Rezultate raziskav je zato težko neposredno primerjati, kljub temu pa številne kakovostne objave v zadnjih letih omogočajo, da lahko iz njih izluščimo nekatera pomembna dognanja in predloge dobrih praks.

Obsežno metaanalizo in pregled znanstvenih objav z vidika uporabljeni snemalne opreme, parametrov leta, nadaljnjih obdelav in analiz podatkov sta opravila Singh in Frazier (2018). Naša analiza je usmerjena na izbrane dejavnike, pri tem pa smo se osredotočili na letalnike, ki so lažji od 25 kilogramov in za zajem fotografij uporabljajo optične senzorje v vidnem delu elektromagnetskega valovanja. Poleg tega smo obravnavali samo primere posrednega georeferenciranja fotografij preko terensko izmerjenih oslonilnih točk in projekte, kjer je zahtevana nekajcentimetrska (okvirno od 1 do 10 centimetrov) položajna točnost izdelkov. Izbrane dejavnike smo analizirali na podlagi pregleda relevantnih znanstvenih objav in lastnega študijskega primera. Nekaj vpliva na kakovost končnih rezultatov ima tudi uporabljeni programska oprema za obdelavo, vendar tega v analizi nismo obravnavali.

Številni viri opisujejo in raziskujejo različne dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije. Sistematično in celovito je to tematiko obdelal in predstavil Nasrullah (2016). Dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije, smo opisali in analizirali po naslednjih vsebinskih sklopih:

- (a) **dejavniki vpliva, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij:** uporaba nemerskih fotoaparatov, metode kalibracije, časovna stabilnost parametrov notranje orientacije, kakovost senzorja in objektiva, vrsta zaklopa, prostorska ločljivost, fotografiska kakovost fotografij itn.;
- (b) **dejavniki vpliva, ki so povezani z načrtovanjem in izvedbo snemalne misije:** snemalna višina, vzdolžno in prečno prekrivanje fotografij, zgradba bloka fotografij itn. ter
- (c) **dejavniki vpliva, ki so povezani z oslonilnimi točkami:** predvsem število oslonilnih točk in njihova razporeditev na območju snemanja.

3 DEJAVNIKI VPLIVA, POVEZANI Z LASTNOSTMI FOTOAPARATA IN KAKOVOSTJO FOTOGRAFIJ

Dejavnike vpliva, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij, obravnavamo po naslednjih vsebinah: geometrične lastnosti fotografij, splošna kakovost fotografij, ki vključuje radiometrične lastnosti in vpliv zunanjih razmer, ter parametri notranje orientacije.

3.1 Geometrične lastnosti fotografij

Digitalna fotografija je rastrska slika, ki jo sestavljajo vrstice in stolpci mrežnih celic oziroma piksov. Prostorska ločljivost fotografije GSD (angl. *ground sample distance*) je pomemben dejavnik, ki vpliva na geometrično kakovost fotogrametričnih izdelkov. Definirana je kot razdalja v naravi med središčema dveh sosednjih piksov in je odvisna od velikosti slikovnega senzorja, velikosti piksla na senzorju, goriščne razdalje objektiva in oddaljenosti med fotoaparatom ter objektom, ki ga fotografiramo. Prostorska ločljivost fotografije opredeljuje tudi najmanjšo velikost detajla, ki ga na fotografiji še lahko prepoznamo (Oštir, 2006). Na letalnikih se najpogosteje uporabljajo nemerski fotoaparati z relativno majhnim senzorjem, zato je višina leta temu prilagojena (običajno med nekaj 10 do 150 metri). S tem dobimo primerljivo ali boljšo prostorsko ločljivost fotografij kot z aerofotogrametričnimi kamerami, kar omogoča lažje prepoznavanje in pridobivanje oziroma ekstrakcijo podatkov o detajlih prostorskih entitet na posnetkih (Mikrut, 2016).

Pomemben dejavnik je še goriščna razdalja objektiva fotoaparata. Uporaba fotoaparata s krajšo goriščno razdaljo ob nespremenjenih ostalih parametrih leta pomeni povečanje zornega kota fotoaparata FOV (angl. *field of view*). To pomeni, da lahko naenkrat zajamemo podatke za širše območje in s tem zmanjšamo čas letenja, kar je zaradi omejitve delovanja baterij na letalnikih boljše. Na drugi strani se prostorska ločljivost fotografij zmanjša, večji so tudi popravki optične distorzije, kar lahko negativno vpliva na geometrično točnost izdelkov (Mosbrucker et al., 2017).

Na kakovost zajetih fotografij vpliva tudi vrsta senzorja in način delovanja zaklopa v fotoaparatu. Senzor CCD (angl. *charge-coupled device*) ima zaradi razmeroma enostavne zgradbe in načina prenosa signala dobro svetlobno občutljivost in ne proizvede veliko šuma na sliki. Po drugi strani pa je v svojem delovanju energijsko potraten. Senzor CMOS (angl. *complementary metal-oxide-semiconductor*) ima kompleksnejšo zgradbo, proizvede nekoliko več šuma na sliki kot senzor CCD, vendar je energijsko precej varčen. Poleg tega je njegova proizvodna cena nižja od cene senzorja CCD. Način delovanja zaklopa, ki je lahko globalni ali pomicni, pomembno vpliva na geometrijo slike. Pri globalnem zaklopu se celoten senzor osvetli naenkrat, pri pomicnem se vrstice ali stolpci fotodiod v senzorju osvetljujejo zaporedno s kratkim časovnim zamikom. Kompaktni fotoaparati imajo pogosto vgrajen senzor CMOS s pomicnim zaklopom. Zaradi premikanja letalnika med zajemom fotografij in zaporednega zajema posameznih vrstic pri pomicnem zaklopu se na fotografiji pojavi geometrična popačenja. Pri višinah do 50 metrov nad terenom in hitrostih letalnika nad 10 m/s so deformacije zaradi pomicnega zaklopa znatne. Vpliv pomicnega zaklopa lahko deloma odpravimo z analitičnim modeliranjem ali dodatnimi oslonilnimi točkami, enakomerno razporejenimi po celotnem snemальнem območju (Vautherin et al., 2016).

3.2 Splošna kakovost fotografij

Splošno kakovost fotografije opredelimo z njen radiometrično kakovostjo, na katero vplivajo fotografske nastavitev in zunanje razmere, predvsem vremenske in svetlobne razmere med fotografiranjem. Vsak piksel, ki sestavlja rastrsko podobo, vsebuje radiometrično vrednost, to je intenziteto odbitega elektromagnetnega valovanja. Radiometrične vrednosti pravzaprav opredeljujejo vsebino, ki jo vidimo na fotografijah. V fotogrametriji je radiometrična kakovost fotografij še posebej pomembna, saj je pogoj za kakovostno obdelavo in kasnejšo pridobitev želenih informacij o pojavih, ki jih beležimo. Fotogrametrična obdelava fotografij temelji na slikovnem ujemanju pikslov na več posnetkih in uspešnost postopka je močno odvisna od radiometrične kakovosti fotografij in ustrezne tekture na površinah (Meißner, Cramer in Piltz, 2017; Martensson in Reshetuk, 2017). To nadalje vpliva na kakovost določitve parametrov notranje orientacije fotoaparata, na gostoto točk v fotogrametričnem oblaku točk in na položajno točnost izdelanega 3D-modela (Mosbrucker et al., 2017).

Pred fotografiranjem je treba izbrati ustrezne vrednosti parametrov nastavitev fotoaparata, to so predvsem čas osvetlitve, odprtina zaslonke in občutljivost senzorja (ISO). Fotografija mora biti pravilno osvetljena, ostra in s čim manj šuma. Ostrino slik v fotogrametriji običajno zagotovimo s povečanjem globinske ostrine z uporabo bolj zaprte zaslonke, čas osvetlitve pa je določen z elektroniko fotoaparata. Zaradi gigantnega letalnika in tresljajev, ki so prisotni predvsem pri rotorskih letalnikih, so fotografije pogosto neostre (Nasrullah, 2016; Aber et al., 2019), zato morajo biti časi osvetlitve kratki. Čas osvetlitve je običajno stalen oziroma zaklenjen; avtorji uporabljajo različne vrednosti, največkrat je predlagana 1/800 s (npr.

Sanz-Ablanedo et al., 2018). Odprtino zaslonke nato samodejno določi fotoaparat, tako da so slike primerno osvetljene (Clapuyt, Vanacker in van Oost, 2016). Tak način nastavitev fotoaparata predstavlja kompromis glede na običajno fotografiranje v fotogrametriji. S tem se želimo izogniti daljšim časom osvetlitve v slabih svetlobnih razmerah, ki bi zaradi gibanja letalnika povzročila neostre fotografije. V idealnem primeru bi morala biti tudi odprtina zaslonke stalna, saj njeno spremenjanje vpliva na distorzijo objektiva. Velike odprtine zaslonke prav tako povečajo vpliv radialne distorzione in šum na fotografiji (Nasrullah, 2016). Pri snemanju z letalnikom se običajno izbere fokusiranje na fotografjsko neskončnost, s čimer zagotovimo ostrino fotografij ne glede na izbrano snemalno višino ali stopnjo razgibanosti terena. Poleg fotografjskih nastavitev na ostrino fotografij vplivajo tudi hitrost letalnika in višina leta ter nagibi letalnika, ki nastanejo zaradi različnih zunanjih vplivov, na primer vetra. Pojav neostrine zaradi premikanja fotoaparata med zajemom fotografije je očitnejši pri manjših razdaljah med fotoaparatom in objektom, ki ga snemamo. Sieberth, Wackrow in Chandler (2014 in 2015) so podrobneje analizirali vpliv uporabe neostrih fotografij v fotogrametrični obdelavi na kakovost izdelkov. Ugotovili so, da se s slabšo ostrino zmanjša točnost izmere slikovnih koordinat, kar neposredno vpliva na slabšo točnost določitev nadaljnji količin v obdelavi, med drugim parametrov kalibracije, predvsem koordinat glavne točke. Ob tem so tudi ugotovili, da pri uporabi neostrih fotografij algoritmi slikovnega ujemanja niso zmožni zaznati dovolj velikega števila veznih točk med prekrivajočimi se fotografijami, manjše je tudi število pravilno določenih veznih točk. Sieberth, Wackrow in Chandler (2016) so tudi predlagali algoritmom za samodejno prepoznavanje neostrih fotografij v nizu zajetih fotografij. Pri tem je treba paziti, da imamo kljub izločanju neostrih fotografij še vedno zagotovljen zadosten preklop med fotografijami.

Na geometrično in radiometrično kakovost fotografij in fotogrametričnih izdelkov, kot sta ortofoto in 3D-model z dodanimi teksturami, pomembno vplivajo tudi vremenske in svetlobne razmere ob fotografiranju (Dandois, Olano in Ellis, 2015). Močna oblačnost, meglja ali dež povzročijo slabo osvetlitev ali premajhen kontrast fotografij. Na fotografijah, zajetih v slabih svetlobnih razmerah, je težje prepoznati posamezne detajle in je zato tudi težje določiti vezne točke. Wierzbicki, Kedzierski in Fryskowska (2015) so na podlagi preizkusa ugotovili, da se z uporabo fotografij, zajetih v slabih vremenskih razmerah, za približno 20 % zmanjša število 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 fotografij ter položajna točnost izdelanega digitalnega modela reliefa in posledično ortofota. Pomanjkanje veznih točk vpliva še na slabšo popolnost izdelanega fotogrametričnega oblaka točk in posledično slabšega 3D-modela. Na uspešnost algoritmov slikovnega ujemanja vpliva tudi prisotnost šuma na fotografijah. Več šuma na fotografijah pomeni manjšo uspešnost določanja veznih točk. 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 uporabljenou fotografijo. Predlagata izračun te ocene pred izvedbo slikovnega ujemanja, saj tako lahko 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 delež vhodnih podatkov in posledično v bloku nimamo več zagotovljenega zadostnega prekrivanja med sosednjimi fotografijami. Zato je zelo pomembno, da se fotografiranje izvaja v dobrih vremenskih razmerah. Omeniti je treba še vpliv prisotnosti senc na fotografijah. Če snemanje na terenu poteka dlje, se lahko spremenijo položaj sonca ali splošne vremenske razmere, kar povzroči spremembo položaja senc.

in osvetlitve fotografij. To lahko negativno vpliva na delovanje algoritmov za slikovno ujemanje (Rock, Ries in Udelhoven, 2012) in na samodejno prepoznavanje vsebine na fotografijah. V fazi predobdelave posnetkov lahko ta vpliv nekoliko zmanjšamo z ustreznimi funkcijami v programih za digitalno obdelavo slik (Shahbazi et al., 2015).

3.3 Parametri notranje orientacije fotoaparata

Parametre notranje orientacije fotoaparata (krajše: notranja orientacija) potrebujemo, da lahko določimo slikovni koordinatni sistem, v katerem merimo slikovne koordinate. Osnovni parametri notranje orientacije so goriščna razdalja, položaj glavne točke na fotografiji in podatki o optični distorziji objektiva. Pri cenejših nemerskih fotoaparatih imajo lahko objektivi precejšnjo optično distorzijo, ki jo običajno opišemo z analitičnim modelom (Brown, 1971). Poleg tega določamo predvsem pri nemerskih fotoaparatih še nekatere druge parametre, kot so nepravokotnost koordinatnih osi, različna merila v smeri koordinatnih osi itd. Postopek, s katerim določamo parametre notranje orientacije fotoaparata, imenujemo kalibracija fotoaparata. 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 koordinate ustreznega števila oslonilnih točk v izbranem objektnem koordinatnem sistemu (ta je lahko lokalni, referenčni državni, globalni itd.). Parametri zunanje orientacije so objektne koordinate projekcijskega centra in zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na izbrani objektni koordinatni sistem. V klasični fotogrametriji sta postopka določitve parametrov notranje in zunanje orientacije praviloma ločena.

Osnovni načini kalibracije fotoaparata so: laboratorijska kalibracija, kalibracija s testnimi polji in samokalibracija (Luhman et al., 2014; str. 568). Redkeje se uporablajo tudi nekatere druge metode, kot je kalibracija z uporabo znanih oblik, na primer navpične linije, prostorske linije. Merske fotoaparate kalibrira proizvajalec z laboratorijsko kalibracijo, za katero je potreben poseben laboratorij z ustrezeno opremo ali ustrezeno kalibracijsko polje na terenu, zato tega uporabnik ne more izvajati sam. V UAV fotogrametriji uporabljam manjše, lažje in cenejše nemerske fotoaparate, pri katerih so sestavnii deli sistema manj geometrično stabilni, zato laboratorijska kalibracija niti ni primerna. Kalibracijo moramo zato izvajati pogosteje in na drugačne načine.

Pri kalibraciji s testnimi polji se uporablajo polja posebej označenih točk (tarč), ki so razporejene v ravni 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. *in-situ calibration, on-the-job calibration*). Ta način kalibracije se uporablja predvsem pri terestričnih bližnjeslikovnih aplikacijah.

Pri samokalibraciji uporabimo dobro določljive podrobnosti na objektu oziroma površju (značilke), ki niso posebej označene. Za uspešnost te metode moramo zagotoviti takšno prostorsko razporeditev fotografij, da dobimo dobro določene preseke slikovnih žarkov, kar dosežemo predvsem s poševnimi posnetki (angl. *oblique images*) (Luhmann, Fraser in Maas, 2016).

Pri UAV fotogrametričnih projektih lahko uporabimo tri različne pristope za kalibracijo fotoaparata: predhodno kalibracijo s testnimi polji, samokalibracijo v okviru samega projekta oziroma kombinacijo obeh pristopov (Luhmann, Fraser in Maas, 2016; Nex in Remondino, 2014). Grigillo et al. (2018) so

z eksperimentalno raziskavo na terenskem kalibracijskem polju ugotovili, da je mogoče s predhodno izračunanimi parametri notranje orientacije, določenimi iz dobre geometrične strukture bloka fotografij, v primerjavi s samokalibracijo, izboljšati natančnost višin v fotogrametričnem oblaku točk. Zaradi potencialne nestabilnosti parametrov notranje orientacije pa takšen pristop v praksi ni zanesljiv in se zato tudi redkeje izvaja. Vsekakor pa je predhodna kalibracija smiselna, če bi uporabili merski fotoaparat. Največja težava pri uporabi metode samokalibracije v UAV fotogrametričnih projektih je, kako zagotoviti dobre preseke slikovnih žarkov. Če značilnosti letalnika to omogočajo, je najboljša možnost, da se v blok fotografij vključijo poševni posnetki (Harwin, Lucieer in Osborn, 2015). Če pa to ni mogoče, se geometrija bloka lahko utrdi s kombinacijo različnih konfiguracij fotografiranja, na primer snemanja na dveh višinah, snemanja v različnih smereh ipd. (Gerke in Przybilla, 2016). Nadaljnji pomemben pogoj za uspešnost metode samokalibracije je, da se nastavitev na fotoaparatu med fotografiranjem ne spreminja in tudi objekt fotografiranja se ne sme premikati.

S teoretičnega vidika za izvedbo samokalibracije ne potrebujemo znanih referenčnih (objektnih) koordinat, saj se lahko parametri notranje orientacije izračunajo zgolj iz geometrijsko določene oblike objekta. Če pa imamo na razpolago oslonilne točke, katerih koordinate so določene z neodvisnimi opazovanji v objektnem koordinatnem sistemu, se v izravnavi hkrati določijo parametri zunanje orientacije. Če nas zanima le pravo merilo modela, ne pa tudi njegovo geolociranje v objektnem koordinatnem sistemu, je treba poznati najmanj eno dolžino v objektnem prostoru. Pomembno je upoštevati tudi ugotovitve, da netočnost parametrov notranje orientacije povzroča znatne sistematične napake v fotogrametričnih oblakih točk in izpeljanih izdelkih (James in Robson, 2014; Carboneau in Dietrich, 2017).

Kakovost določitve parametrov notranje orientacije in njen vpliv na kakovost pridobljenega fotogrametričnega oblaka točk sta raziskovala tudi Hastedt in Luhmann (2015), ki sta z eksperimenti dokazala, da so parametri notranje orientacije pri cenejših nemerskih fotoaparativih med seboj zelo korelirani, kar je posledica nestabilnosti posameznih komponent teh fotoaparativov. Korelacija se pogosto pojavi tudi med goriščno razdaljo, položajem glavne točke in parametri zunanje orientacije (Luhmann et al., 2014), kar pomeni, da se lahko slabo izmerjene objektne ali slikovne koordinate oslonilnih točk odrazijo na notranji orientaciji fotoaparata. Koreliranost parametrov lahko zmanjšamo s fotografiranjem z različnih višin, uporabo prečnih pasov in s poševnimi fotografijami. Z obsežnimi eksperimenti sta James in Robson (2014) nadalje dokazala, da je mogoče z večjim številom primerno razporejenih oslonilnih točk znatno zmanjšati vpliv sistematičnih pogreškov pri samokalibraciji. Če v izravnavo bloka posnetkov niso vključili oslonilnih točk, se je pogrešek določitve radialne distorzije v postopku kalibracije močno izrazil kot sistematični pogrešek digitalnega modela reliefa, ki ima obliko (vbočene ali izbočene) kupole (angl. *doming effect*). To pomeni, da se teren, ki je v resnici raven, modelira v obliki kupole. Za odstranitev ali vsaj zmanjšanje tega vpliva navedena avtorja predlagata vključitev enakomerno razporejenih oslonilnih točk v izravnavo, tako na sredini študijskega območja kot na njegovih robovih, in uporabo poševnih fotografij.

Cilj nekaterih raziskav je bil tudi ugotavljanje časovne stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparativov. Cramer, Przybilla in Zurhorts (2017) so med seboj primerjali vrednosti kalibracijskih parametrov, ki so jih določili z večkratno kalibracijo. Primerjavo so izvedli za več različnih nemerskih digitalnih fotoaparativov, in sicer za kompaktni, brezzrcalni in zrcalno-refleksni fotoaparat ter rezultate primerjali z merskim fotoaparatom. Po večkratni izvedbi kalibracije v laboratoriju ob nadzorovanih

razmerah snemanja so ugotovili, da se pri vseh nemerskih fotoaparatih parametri notranje orientacije med več zaporednimi kalibracijami razlikujejo, iz česar lahko sklepamo o mehanski nestabilnosti testiranih fotoaparatov.

Zaradi optičnih distorzij na fotografijah se močno poslabša položajna točnost končnih fotogrametričnih izdelkov. Radialna distorzija, katere vpliv je običajno največji, je močno odvisna od goriščne razdalje. Z zmanjševanjem goriščne razdalje povečamo zorni kot, hkrati pa povečamo radialno distorzijo in zmanjšamo merilo zajete podobe. Ta učinek je najbolj opazen pri ekstremno širokokotnih (angl. *fish-eye*) objektivih, ki imajo izjemno širok zorni kot, kar omogoča hitrejši zajem večjih snemalnih območij, a so fotografije zaradi prisotnosti distorzij močno popačene in so vrednosti GSD na istem posnetku zelo različne (Strecha et al., 2015). Za dosego ustrezne položajne točnosti fotogrametričnega izdelka moramo zagotoviti ustrezno kalibracijo optičnih distorzij in te v nadaljnji obdelavi upoštevati (odpraviti). V splošnem velja, da je pri izbiri objektiva za fotogrametrična snemanja primernejše izbrati objektiv s fiksno goriščno razdaljo in nastavitev fiksnega fokusa, s čimer zmanjšamo vpliv spremenljajoče gorišče razdalje in se izognemo neostrim fotografijam (Mosbrucker et al., 2017).

4 DEJAVNIKI VPLIVA, POVEZANI Z NAČRTOVANJEM IN IZVEDBO SNEMALNE MISIJE

Glavni dejavniki vpliva na kakovost UAV izdelkov, ki so povezani s snemalno misijo, so prostorska ločljivost fotografij, višina leta in prekrivanje fotografij. Za dobre rezultate je treba zagotoviti tudi ustrezno zgradbo fotogrametričnega bloka, pri čemer je treba upoštevati zahteve za uspešno izvedbo samokalibracije (opisano v poglavju 3.4).

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), zato avtorji raziskav svoje izsledke velikokrat podajajo glede na snemalno višino. Z različnimi programi za načrtovanje snemalne misije lahko hitro in preprosto določimo ustrezne parametre. 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 (npr. Dandois, Olano in Ellis, 2015; Santise et al., 2014). Včasih so rezultati tudi manj jasni (Nasrullah, 2016), vendar, kot že povedano, lahko prevladajo drugi dejavniki, kot so slabše svetlobne razmere, veter, 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. Prostorska ločljivost fotografij določa tudi maksimalno položajno točnost izdelkov, ki jo lahko dosežemo. Ob uporabi zadostnega števila oslonilnih točk ravninska točnost izdelkov konvergira proti ± 1 GSD pri dveh do treh oslonilnih točkah na sto fotografij, višinska točnost izdelkov pa proti $\pm 1,5$ GSD pri štirih oslonilnih točkah za vsakih sto fotografij (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Prekrivanje oziroma preklop fotografij je naslednji zelo pomemben parameter pri načrtovanju snemanja. Prekrivanje fotografij se podaja v odstotkih glede na smer leta, in sicer vzdolžno in prečno. Prekrivanje med posnetki v vzdolžni smeri omogoča ustvarjanje stereo učinka med sosednjimi fotografijami. Prekrivanje med fotografijami v prečni smeri služi povezovanju fotografij v enoten blok. Velik odstotek prekrivanja v prečni smeri dodatno zagotavlja večjo stabilnost bloka fotografij, saj je več skupnih območij za določanje veznih točk.

Navajamo nekaj izsledkov izbranih raziskav, v katerih so analizirali vplive različnih parametrov snemalnih misij na položajno točnost izdelkov. Rock, Ries in Udelhoven (2012) so ugotovili, da višina leta vpliva na točnost izdelanega digitalnega modela površja. Na podlagi snemanj na različnih višinah od 50 do 550 metrov nad terenom so ugotovili, da položajna odstopanja na kontrolnih točkah na modelu od pravih vrednosti v splošnem naraščajo z višino leta. Na višinah med 50 in 70 metri so opazili, da se lahko pojavijo večja odstopanja od pričakovanih zaradi spremenjenih radiometričnih vrednosti na fotografijah. Nižja višina snemanja zagotavlja dobro prepoznavanje detajlov na fotografijah in končnih izdelkih. Pri tem pa se je treba zavedati, da se z letenjem na nižjih višinah podaljša čas letenja, saj je treba za pokritje želenega območja posneti več fotografij. V daljšem času letenja je več možnosti, da se spremenijo svetlobne in druge razmere, ki vplivajo na radiometrično kakovost fotografij in posledično na kakovost slikovnega ujemanja. Z več podrobnostmi na fotografijah in velikim številom posnetkov se tudi podaljša čas fotogrametrične obdelave. Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez in Martínez-Carricundo (2017a) so ugotovili, da ima lahko višina snemanja drugačen vpliv na ravninsko in višinsko točnost. Njihovi rezultati so pokazali, da višina leta ne vpliva bistveno na ravninsko točnost izdelkov, če je prostorska ločljivost fotografij primerna glede na zahteve položajne točnosti. Ugotovili pa so, da višina leta bolj vpliva na višinsko točnost, saj se je le-ta z višino leta zmanjševala. Do podobnih rezultatov sta prišla Udin in Ahmad (2014), ko sta primerjala položajno točnost ortofotov, zajetih na različnih višinah med 40 in 100 metri nad terenom. Tudi v tem primeru se ravninska točnost ortofota s spremenjanjem višine ni bistveno spremojala, medtem ko se je višinska točnost digitalnega modela površja z naraščanjem višine zmanjševala.

Glede zagotavljanja zadostnega prekrivanja fotografij je treba že v fazi načrtovanja snemanja z letalnikom predvideti večje prekrivanje kot pri klasičnem letalskem snemanju, s čimer zagotovimo zadostno nadstevilnost med prekrivajočimi se fotografijami in preprečimo premajhno prekrivanje v primeru neugodnih razmer za snemanje, na primer pri sunkih vetra (Colomina in Molina, 2014; Rosnell in Honkavaara, 2012). Osnovno priporočilo je, da je treba pri snemanju z letalniki zagotoviti najmanj 70 % preklopa v vzdolžni in najmanj od 50 do 60 % v prečni smeri glede na smer letenja letalnika (Singh in Frazier, 2018).

Zelo obsežne raziskave na temo vpliva prekrivanja posnetkov na kakovost rezultatov so izvedli Dandois, Olano in Ellis (2015) ter Torres-Sánchez et al. (2017). Ugotovili so, da je za dosego zadostne popolnosti oblaka točk in nekajcentimetrsko položajne točnosti, ob hkratni optimizaciji trajanja zajema in obdelave podatkov, pri snemanju na višini od 50 do 60 metrov smiselno zagotoviti od 80- do 85-odstotno vzdolžno prekrivanje in vsaj 60-odstotno prečno prekrivanje. Če snemamo na višji višini, je lahko vzdolžno prekrivanje še nekoliko večje (do 90 %), vendar se s tem podaljša čas zajema istega območja, trajanje obdelave pa ni bistveno daljše. Pri višjih vrednostih prekrivanja se zahtevnost obdelave zelo poveča, hkrati pa ne dobimo bistveno kakovostnejših rezultatov. Do podobnih ugotovitev so prišli Rupnik et al. (2015). S povečanim prekrivanjem se sicer podaljša čas zajema posnetkov na terenu in trajanje obdelave, a višja nadstevilnost veznih točk priporoča k boljši točnosti rezultatov. Za praktično delo, kjer je treba upoštevati razmerje med ekonomičnostjo snemanja in obdelave ter točnostjo izdelkov, se priporočajo vrednosti vzdolžnega prekrivanja 80 % in prečnega prekrivanja od 60 do 70 %.

5 DEJAVNIKI VPLIVA, POVEZANI Z OSLONILNIMI TOČKAMI ZA GEOREFERENCIRANJE FOTOGRAMETRIČNEGA BLOKA

S fotogrametrično obdelavo fotografij v programih strukture iz gibanja SfM (angl. *structure from motion*) rezultate najprej pridobimo v obliki gostega fotogrametričnega oblaka točk. Pravo merilo, položaj in orientacijo tega oblaka točk dobimo, če v izravnavo SfM vključimo slikovne koordinate terenskih oslonilnih točk, katerih koordinate so določene na podlagi neodvisnih terenskih opazovanj v referenčnem koordinatnem sistemu (posredno georeferenciranje). Pomembno je, da so oslonilne točke primerno signalizirane in da so njihove koordinate določene z neodvisnimi terenskimi opazovanji z ustreznim točnostjo. Lahko pa uporabimo tudi postopek neposrednega (direktnega) georeferenciranja, pri katerem parametre zunanje orientacije pridobimo z dodatnimi senzorji za določanje položaja in orientacije, ki so nameščeni na letalniku. Podrobna obravnava neposrednega načina georeferenciranja bi bila tu preobsežna, zato smo se v naši analizi osredotočili na posredni način georeferenciranja, ki se v praksi za zdaj tudi pogosteje uporablja.

V začetnem obdobju uporabe tehnologije UAV so bile oslonilne točke uporabljene šele v drugi fazi fotogrametrične obdelave, ko se je že izdelan 3D-model na osnovi podobnostne transformacije transformiral iz modelnega v ciljni objektni koordinatni sistem. V tem primeru se pogosto zgodi, da dobimo rezultat, ki je notranje deformiran, in posledično so izdelki slabše kakovosti. Model se na oslonilnih točkah dobro prilega pravim vrednostim, z oddaljenostjo od oslonilnih točk pa se pojavi odstopanja, kar sicer velja tudi v že opisanem primeru samokalibracije. Sodobnejši algoritmi obdelave posnetkov, zajetih z letalnikom, ki uporabljajo pristop strukture iz gibanja, 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).

V nadaljevanju podajamo ugotovitve različnih avtorjev, ki so med drugim raziskovali vpliv števila oslonilnih točk in njihove razporeditve na kakovost rezultatov fotogrametrične obdelave, nato pa predstavimo še lasten primer raziskave na to temo.

Vpliv različnega števila oslonilnih točk na točnost izravnave bloka fotografij, ki so jo opredelili z odstopanjimi na kontrolnih točkah, so med drugimi raziskovali Harwin, Lucieer in Osborn (2015), Reshetnyuk in Mårtensson (2016), Gindraux, Boesch in Farinotti (2018), Martínez-Carricundo et al. (2018) in Sanz-Ablanedo (2018). Testna območja so se razlikovala glede na površino in število uporabljenih oslonilnih točk, vendar je skupna in splošna ugotovitev teh raziskav, da prinaša večje število oslonilnih točk višjo točnost fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer se izboljšanje izraziteje pozna na višinski točnosti izdelkov. Pomembno je tudi, kot smo predstavili že pri tematiki samokalibracije, da so oslonilne točke enakomerno razporejene po celotnem območju.

Število in razporeditev oslonilnih točk ne vpliva samo na kakovost izravnave bloka fotografij in pridobljenega oblaka točk, ampak posledično tudi na izdelke, ki jih pridobimo z nadaljnjo obdelavo oblaka točk. Več avtorjev je analiziralo vpliv števila oslonilnih točk na položajno točnost digitalnega modela površja. Tonkin in Midgley (2016) sta v obsežni raziskavi analizirala ponovljivost in robustnost določitve modela površja ob uporabi različnega števila oslonilnih točk. Na območju s površino $0,145 \text{ km}^2$ sta primerjala digitalne modele površja, ki so bili izdelani iz oblakov točk, georeferenciranih z različnim številom oslonilnih točk (od 3 do 101). Najslabši rezultat je bil pričakovano pri uporabi samo treh oslonilnih točk,

povečevanje števila oslonilnih točk od 4 do 101 pa ni izraziteje vplivalo na točnost modela površja, pri čemer gre razlog iskati predvsem v tem, da so bile oslonilne točke na terenu izmerjene z metodo, ki ni bistveno natančnejša od izdelanega modela površja. Ni torej pomembno le število in razporeditev oslonilnih točk, temveč tudi položajna točnost določitve njihovih koordinat v ciljnem koordinatnem sistemu, ki bi morala biti, po splošno uveljavljenih načelih zagotavljanja kakovosti, najmanj trikrat boljša od zahtevane položajne točnosti izdelkov. Doseganje višje točnosti digitalnega modela površja ob uporabi več oslonilnih točk za georeferenciranje fotografij so potrdili tudi Shahbazi et al. (2015). Dodatno svetujejo, da je treba, če ni mogoče zagotoviti zadostnega števila oslonilnih točk, zanje izbrati takšne lokacije, da so vidne na čim več posnetkih. Rezultate zelo obsežnega eksperimenta, iz katerega so izpeljana uporabna priporočila, so objavili Gindraux, Boesch in Farinotti (2017). Na treh snemalnih območjih lednikov v švicarskih Alpah, velikih med 1,4 in 6,9 km², so analizirali vpliv števila in razporeditve oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja. Snemanje je bilo izvedeno z vzdolžnim prekrivanjem 80 %, prečnim prekrivanjem 75 % ter srednjo vrednostjo GSD 6 centimetrov. Iz osmih izmer v različnih časovnih obdobjih so z uporabo različnega števila oslonilnih točk izdelali preko tisoč različnih digitalnih modelov površja in jih analizirali z odstopanjem na več tisoč kontrolnih točkah. S postopnim povečevanjem števila oslonilnih točk se je položajna točnost modela izboljševala, vendar le do določenega števila oziroma gostote točk, potem pa dodajanje novih točk ni prineslo bistveno večje točnosti. Avtorji so to poimenovali optimalna gostota oslonilnih točk, ki je za njihov primer za ravninsko komponento znašala 7 oslonilnih točk/km² in za višinsko komponento 17 oslonilnih točk/km². Pri tej optimalni gostoti oslonilnih točk je bila dosežena ravninska točnost od 3 do 9 centimetrov in višinska točnost od 10 do 25 centimetrov.

Tonkin in Midgley (2016) ter Gindraux, Boesch, in Farinotti (2017) so podrobneje analizirali tudi vpliv razporeditve oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja. Površje je bilo v objavi Tonkin in Midgley (2016) definirano z oblakom točk povprečne gostote 160 točk/m², v objavi Gindraux, Boesch, in Farinotti (2017) pa z rastrom ločljivosti 0,50 metra. Avtorji ugotavljajo, da omogoča enakomerna in dovolj gosta razporeditev oslonilnih točk homogeno točnost modela po celotnem območju, saj se s povečevanjem oddaljenosti od najbliže 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 najbliže oslonilne točke. Avtorji obeh prispevkov podajajo primerljive rezultate, in sicer, da znaša na oddaljenosti 100 metrov od najbliže oslonilne točke višinsko odstopanje digitalnega modela površja okrog 10 centimetrov, medtem ko je na oddaljenosti 250 metrov to odstopanje že okrog 40 centimetrov. Podobno so ugotovili nekateri drugi avtorji, ki izpostavljajo pomen ustrezne razporeditve oslonilnih točk na zunanjem obodu snemalnega območja, hkrati pa naj bodo točke enakomerno razporejene tudi znotraj območja, predvsem na večjih snemalnih območjih, saj s tem zagotovimo boljšo višinsko točnost in preprečimo notranje deformacije modela (James in Robson, 2014; Gerke in Przybilla, 2016; Coveney in Roberts, 2017; Martínez-Carricundo et al., 2018; Sanz-Ablanedo et al., 2018; Stöcker et al., 2019).

Tudi Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez in Martínez-Carricundo (2017b) so raziskovali vpliv števila oslonilnih točk na ravninsko točnost ortofota in višinsko točnost digitalnega modela površja. Na območju velikosti 17,6 hektara so izvedli več obdelav posnetkov z upoštevanjem od 4 do 20 oslonilnih točk. Ugotovili so, da je mogoče najboljšo položajno točnost doseči pri uporabi od 15 do 20 oslonilnih točk, in sicer nekje od 3 do 4 centimetre pri ravninskih koordinatah in nekje od 5 do 6 centimetrov pri višinah. V tem primeru se je 15 oslonilnih točk izkazalo kot optimalno z vidika točnosti rezultatov in vloženega dela na

terenu. Podobno analizo so na enako velikem območju izvedli Martínez-Carricundo et al. (2018). Tudi v tem primeru se je v splošnem točnost rezultatov povečevala z dodajanjem oslonilnih točk. Avtorji so opozorili, da je pomembno oslonilne točke enakomerno razporediti po robovih obravnavanega območja, poleg tega jih je treba enakomerno razporediti tudi znotraj območja, kar vpliva predvsem na boljšo višinsko točnost. Kot optimalno število oslonilnih točk z vidika točnosti rezultatov in vloženega dela za izmero območja primerljive velikosti so podali vrednost od 0,5 do 1 oslonilna točka/ha. Ta vrednost je večja od prej navedenih priporočil avtorjev Gindraux, Boesch in Farinotti (2017), vendar se velikosti obravnavanih območij in drugi parametri snemanja precej razlikujejo. Za prenos ugotovitev raziskav v vsakodnevno prakso je zato zelo pomembno, da uporabimo rezultate raziskav, ki so primerljive glede velikosti območja in uporabljene opreme ter zahtevane kakovosti izdelkov.

Nekoliko drugačno raziskavo točnosti fotogrametričnih izdelkov so izvedli Galván Rangel, Gonçalves in Pérez (2018). Z vidika različnega števila in razporeditve oslonilnih točk so primerjali ustreznost izdelanega ortofota in digitalnega modela površja glede na zahteve treh ameriških standardov, ki opredeljujejo zahtevano točnost fotogrametričnega izdelka. Uporabili so standard NMAS (angl. *National Map Accuracy Standard*), standard ameriškega združenja ASPRS (angl. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) in standard NSSDA (angl. *National Standard for Spatial Data Accuracy*). Ugotovili so, da omogoča enakomerna razporeditev oslonilnih točk na robovih snemalnega območja in v njegovi notranjosti, ob upoštevanju zadostnega prekrivanja fotografij ter dovolj visoki natančnosti določitve koordinat oslonilnih točk, uporabo UAV tehnologije za izdelavo fotogrametričnih izdelkov s točnostjo, ki je skladna z zahtevami izbranih standardov. Hkrati so ugotovili, da na ravninsko točnost vplivajo predvsem 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 ravninski točnosti, kar je poznano že iz klasične fotogrametrije. Oslonilne točke, razporejene po notranjosti območja, pa imajo velik vpliv na višinsko točnost, kar se sklada tudi z ugotovitvami prej navedenega vira (Martínez-Carricundo et al., 2018).

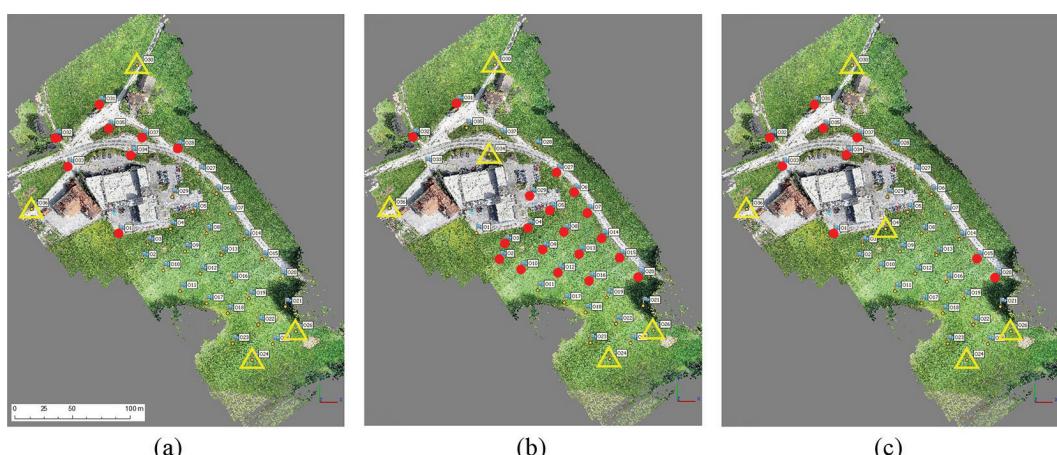
5.1 Primer analize vpliva števila in razporeditve oslonilnih točk na položajno točnosti oblaka točk

Vpliv števila in razporeditve oslonilnih točk (OT) na položajno točnost oblaka točk smo raziskovali tudi na lastnem študijskem primeru, ki je del širše raziskave v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V2-1934. Na testnem območju v Kandšah, razsežnosti približno 300 metrov x 120 metrov, smo s klasično geodetsko izmero določili koordinate 37 oslonilnih točk. Natančnosti določitve njihovih koordinat po koordinatnih komponentah (e , n , H) v državnem referenčnem koordinatnem sistemu D96/TM smo ocenili na 2,8 mm, 2,6 mm in 3,3 mm. Takšno visoko točnost referenčnih podatkov smo zagotovili zato, ker smo v eksperimentu želeli preveriti, kakšno najboljšo točnost oblaka točk lahko dosežemo. Med fotogrametrično izmero smo oslonilne točke signalizirali z belimi tarčami dimenzije 40 centimetrov x 40 centimetrov in črnim krogom s premerom 30 centimetrov v sredini tarče (slika 1a). Za izmero smo uporabili letalnik s štirimi rotorji DJI Phantom 4 Pro (slika 1b) s fotoaparatom FC6310, ki ima goriščno razdaljo 8,8 mm, velikost slikovnega senzorja 13,2 mm x 8,8 mm in geometrično ločljivost 20M pikslov. Z navpičnim načinom fotografiranja na višini 35 metrov nad terenom in vzdolžnim ter prečnim preklopom 85 % oziroma 75 % smo dobili 545 fotografij s povprečno prostorsko ločljivostjo približno en centimeter. Obdelavo

fotografij smo izvedli v programu Agisoft Metashape. Notranjo orientacijo fotoaparata smo izračunali s samokalibracijo. Meritev oslonilnih točk smo izvedli samodejno, a so bile v vseh primerih potrebne tudi ročne domeritve, saj je program posamezno oslonilno točko spoznal le na približno tretjini fotografij, na katerih je bila oslonilna točka.



Slika 1: Primer signalizirane oslonilne točke (a) in uporabljeni letalnik DJI Phantom 4 Pro (b).



Slika 2: Pomen enakomerne rasporeditve oslonilnih točk za zmanjšanje učinka kupole (OT – rumeni trikotniki; KT – rdeči krogi); (a) pri štirih oslonilnih točkah v vogalih območja so največja višinska odstopanja v zgornjem delu območja; (b) dodana oslonilna točka na območju največjih odstopanj ne zagotovi izboljšanja na celiem območju; (c) višinska točnost na celiem območju se izboljša z dodano točko na sredini območja.

Najprej predstavljamo pomen enakomerne rasporeditve oslonilnih točk. Na sliki 2 so oslonilne točke označene z rumenimi trikotniki, vse ostale točke so uporabljene kot kontrolne točke (KT), na katerih smo ocenili položajno točnost fotogrametričnega bloka. V preglednici 1 so podana največja odstopanja in koren srednjega kvadratnega pogreška RMSE (angl. *Root Mean Square Error*) (Chai in Draxler, 2014) po koordinatnih komponentah (e , n , H) kontrolnih točk glede na število in rasporeditev oslonilnih točk. Pri uporabi le štirih oslonilnih točk na vogalih bloka (slika 2a) se v severnem delu bloka pojavijo večja odstopanja na kontrolnih točkah. Z rdečimi krogovi so označene kontrolne točke, na katerih skupno odstopanje presega 40 milimetrov. Enostaven sklep, da lahko točnost fotogrametričnega bloka izboljšamo z dodano

oslonilno točko na območju največjih odstopanj, ne obrodi sadov, saj se učinek kupole pojavi na drugem delu bloka. Na sliki 2b so z rdečimi krogmi prikazane kontrolne točke, kjer skupna odstopanja presegajo 40 milimetrov. Pravilnejša je enakomerna razporeditev oslonilnih točk, pri čemer peto oslonilno točko dodamo v sredino bloka. S tem izboljšamo celotno točnost fotogrametričnega bloka (zadnja vrstica v preglednici 1). Rdeči krogji na sliki 2c označujejo kontrolne točke, na katerih skupna odstopanja presegajo 30 milimetrov. V idealnem primeru naj bi bile oslonilne točke razporejene v trikotniško mrežo, ki minimizira največjo oddaljenost med sosednjimi oslonilnimi točkami (Sanz-Ablanedo et al., 2018). Gindraux, Boesch in Farinotti (2017) so z ocenjevanjem položajne točnosti digitalnega modela površja, izdelanega iz fotogrametričnega oblaka točk, potrdili tudi ugotovitve ostalih avtorjev, da se točnost digitalnega modela površja zmanjša za približno 10 centimetrov za vsakih 100 metrov oddaljenosti do najbližje oslonilne točke.

Preglednica 1: Največja odstopanja in RMSE na kontrolnih točkah v odvisnosti od števila in razporeditve oslonilnih točk

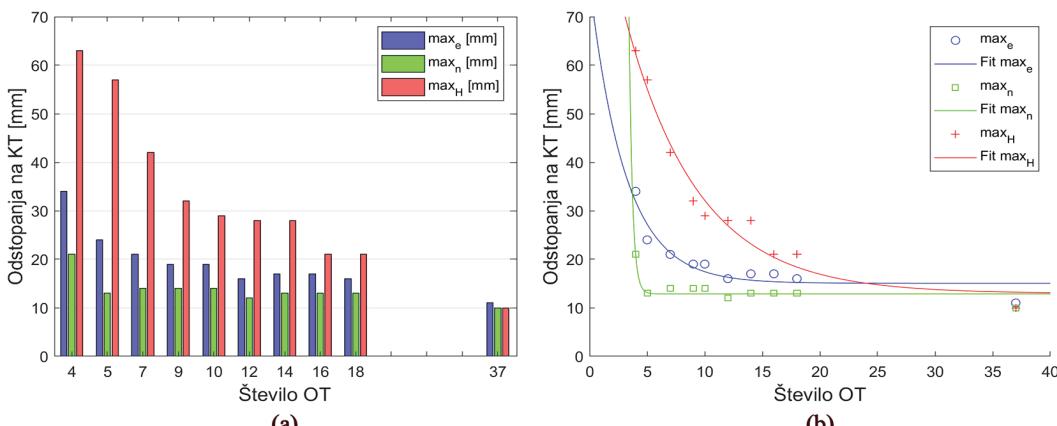
Število oslonilnih točk	max(e) [mm]	max(n) [mm]	max(H) [mm]	RMSE(e) [mm]	RMSE(n) [mm]	RMSE(H) [mm]
4	34	21	63	16	9	27
5 (razporejene neenakomerno)	28	19	73	13	8	43
5 (razporejene enakomerno)	24	13	57	10	5	23

Izboljševanje točnosti orientacije fotogrametričnega bloka z vključevanjem dodatnih oslonilnih točk prikazujeta sliki 3 in 4. Slika 3a prikazuje največja odstopanja na kontrolnih točkah, slika 4a pa RMSE kontrolnih točk po koordinatnih komponentah e , n in H . Ko je za orientacijo uporabljenih vseh 37 oslonilnih točk, so podani največji popravki in RMSE oslonilnih točk. Sliki 3b in 4b prikazujeta eksponentno naraščanje točnosti orientacije fotogrametričnega bloka. Za prilagoditev eksponentne krivulje smo uporabili enačbo (1) Gindraux, Boesch in Farinotti (2017):

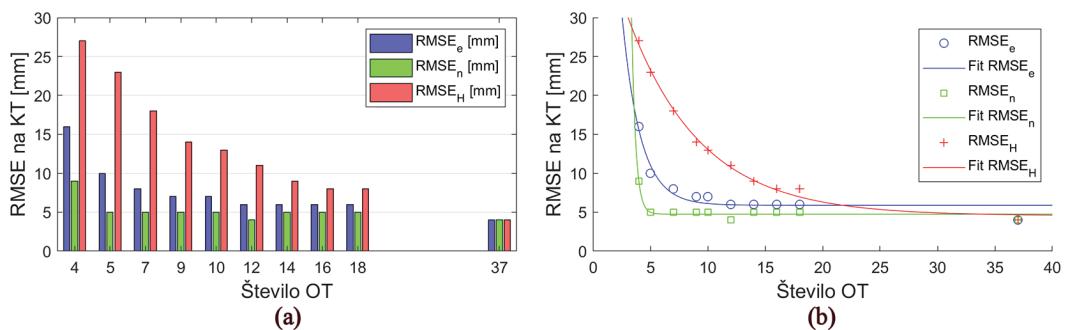
$$\sigma = a \cdot e^{-b \cdot \rho_{OT}} + c, \quad (1)$$

kjer je σ točnost (višinska oziroma ravninska), ρ_{OT} je gostota oslonilnih točk na površinsko enoto ($1 / \text{km}^2$), a , b in c so parametri eksponentne krivulje.

Opazimo, da se ravninska točnost ustali nekje pri 8 do 10 oslonilnih točkah, višinska točnost pa nekje med 15 in 20 oslonilnimi točkami.



Slika 3: Največja odstopanja na kontrolnih točkah (KT) glede na uporabljeno število oslonilnih točk (OT).



Slika 4: RMSE na kontrolnih točkah glede na uporabljeno število oslonilnih točk.

Naše ugotovite se skladajo z ugotovitvami drugih avtorjev (npr. Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez in Martínez-Carricundo, 2017b; Martínez-Carricundo et al., 2018) v tem, da je pomembna enakomerna razporeditev oslonilnih točk po robovih in v notranjosti območja, da oslonilne točke znotraj območja pomembno vplivajo na izboljšanje višinske točnosti bloka ter da se tako ravninska kot višinska točnost ustalita pri določenem številu oslonilnih točk. Ustrezno število oslonilnih točk, ki smo ga ugotovili za pridobitev optimalne ravninske in višinske točnosti izdelkov, se sklada z ugotovitvami avtorjev Gindraux, Boesch in Farinotti (2017).

6 SKLEPNE UGOTOVITVE

Uporaba daljinsko vodenih letalnikov za izvedbo fotogrametričnega snemanja iz zraka se je že dobra uveljavila v vsakdanji praksi v Sloveniji in svetu. Za doseganje visoke položajne točnosti in na splošno kakovosti fotogrametričnih izdelkov, ki jih pridobimo iz fotografij z letalnika, je treba dobro poznati in razumeti celoten postopek zajema in obdelave podatkov ter dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov. Ker je tema zelo obsežna, smo se v članku osredotočili na pregled in analizo izbranih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije, s poudarkom na položajni točnosti georeferenciranih fotografij in fotogrametričnega oblaka točk. Le-te smo na temelju pregledanih objav predstavili v treh skupinah, in sicer smo obravnavali dejavnike, ki so povezani z: (a) lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij, (b) načrtovanjem in izvedbo snemalne misije ter (c) oslonilnimi točkami za posreden način georeferenciranja fotografij. Pri tem smo se omejili na študije, v katerih so uporabljali letalnike, lažje od 25 kilogramov, za zajem fotografij so uporabljali optične senzorje v vidnem delu elektromagnetnega valovanja, zahtevana položajna točnost zajetih prostorskih podatkov pa je bila nekaj centimetrov (okvirno od 1 do 10 centimetrov). Zaradi najbolj široke uporabe smo analizo dodatno omejili na primere, kjer je bilo uporabljeno posredno georeferenciranje fotografij preko terensko izmerjenih oslonilnih točk. Ugotovili smo, da je objavljenih vedno več kakovostnih raziskav, ki bodisi potrjujejo že znana teoretična dejstva, na primer pomen poševnih posnetkov pri samokalibraciji, ali pa posamezne vplive dodatno eksperimentalno raziščejo. V prispevku smo predstavili tudi rezultate lastnega eksperimenta, kjer smo analizirali vpliv števila oslonilnih točk in njihove razporeditve na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk. Naše ugotovitve potrjujejo izsledke in priporočila drugih avtorjev, in sicer da: (a) morajo biti oslonilne točke enakomerno razporejene po obodu in notranjosti območja, (b) oslonilne točke v notranjosti območja pomembno vplivajo na izboljšanje višinske točnosti celotnega bloka in (c) se tako ravninska kot višinska točnost ustalita pri določenem številu oslonilnih točk.

Na kratko izpostavljamo ključne ugotovitve in priporočila za izvajanje projektov fotogrametričnega zavoda podatkov z daljinsko vodenimi letalniki. Izjemnega pomena je, da se fotografiranje izvaja v dobrih svetlobnih in vremenskih razmerah ter da se upoštevajo osnovna fotografiska pravila. Za kakovostne izdelke je potreben fotoaparat z ustrezno geometrično ločljivostjo senzorja in kakovostnim objektivom. S tem se lahko izognemo številnim negativnim vplivom v nadaljnji obdelavi fotografij, kar je pokazalo že veliko raziskav. Izbrati moramo primerno prostorsko ločljivost fotografij (GSD) glede na zahteve projekta, kjer sta pomembna predvsem zahtevana položajna točnost in prepoznavanje detajlov, pri čemer moramo upoštevati tudi ekonomičnost izvedbe. Prekrivanje fotografij naj bo vsaj 80-odstotno v vzdolžni smeri in od 60- do 70-odstotno v prečni smeri. Kot izrednega pomena za položajno točnost UAV fotogrametričnih izdelkov je ustrezno število oslonilnih točk, ki morajo biti primerno signalizirane, njihove koordinate v ciljnem koordinatnem sistemu pa morajo biti določene na podlagi neodvisnih terenskih opazovanj s položajno točnostjo, ki je najmanj trikrat boljša od zahtevane položajne točnosti izdelkov. Zelo pomembno je tudi, da so oslonilne točke enakomerno razporejene po robovih in notranjosti območja snemanja. Z večjim številom enakomerno razporejenih oslonilnih točk se dokazano izboljšajo rezultati samokalibracije in posredno odpravljajo nekateri sistematični vplivi, kot je na primer učinek kupole v digitalnem modelu površja. Kakovost rezultatov samokalibracije, predvsem v primeru ravnega terena, lahko izboljšamo tudi z dodajanjem prečnih pasov fotografij oziroma s fotografiranjem na dveh višinah, pri čemer pa še ni dovolj raziskano, kakšne naj bodo razlike med obema višinama.

Za konec velja omeniti, da pomeni dovolj veliko število oslonilnih točk pri posrednem načinu georeferenciranja fotografij veliko dodatnega dela, zato je uporaba postopkov neposrednega georeferenciranja vse bolj aktualna. Na voljo so že kakovostne raziskave, kot so predstavljene na primer v delih Gerke in Przybilla, (2016), Benassi et al. (2017) ter Carbonneau in Dietrich (2017), ki to temo podrobnejše obravnavajo in z eksperimenti pokažejo, da lahko število oslonilnih točk ob hkratni uporabi senzorjev za geolociranje in orientacijo na krovu letalnika znatno zmanjšamo.

Zelo pomembno je, da na koncu projekta ustrezno ocenimo tudi kakovost fotogrametričnih izdelkov. Kontrola položajne točnosti izdelkov mora temeljiti na oceni položajne točnosti na kontrolnih točkah in/ali na primerjavi izdelkov z referenčnim modelom, po možnosti z uporabo robustnih statističnih metod (Höhle in Höhle, 2009; Kosmatin Fras et al., 2016). Aposteriori ocena točnosti po izravnavi fotogrametričnega bloka ni dovolj zanesljiv pokazatelj dejanske točnosti in je največkrat precenjena (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Zahvala

Raziskovalno delo je bilo opravljeno v okviru (1) ciljnega raziskovalnega projekta V2-1934: *Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmerno z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota*, ki ga sofinancirata Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) in Geodetska uprava RS pri Ministrstvu za okolje in prostor (MOP – GURS), ter (2) raziskovalnega programa P2-0406: *Opazovanje Zemlje in geoinformatika*, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Literatura in viri:

- Aber, J. S., Marzolff, I., Ries, J. B., Aber, S. E. W. (2019). Small-Format aerial photography and UAS imagery, 2nd edition. Elsevier.
- 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). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>
- Benassi, F., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., Morra di Cellà, U., Roncella, R., Santise, M. (2017). Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation. *Remote Sensing*, 9, 172. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020172>
- Brown, D. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37 (8), 855–866.
- Carboneau, P. E., Dietrich, J. T. (2017). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (3), 473–486. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4012>
- Chai, T., Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? — Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7 (3), 1247–1250. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Clapuyt, F., Vanacker, V., van Oost, K. (2016). Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 260, 4–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011>
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- 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), 1–22. DOI: <https://doi.org/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 (September), 4–7. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017)
- 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: <https://doi.org/10.3390/rs71013895>
- 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: <https://doi.org/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*, 2016 (1), 17–30. DOI: <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>
- Gindraux, S., Boesch, R., Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from Unmanned Aerial Vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, 9 (2), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020186>
- Grigillo, D., Uršič, M., Bone, M., Ambrožič, T., Pavlovič Prešeren, P., Kosmatin Fras, M. (2018). Analysis of the impact of interior orientation parameters in different UAV-based image-block compositions on positional accuracy. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, 25, 617–629. DOI: <https://doi.org/10.24425/123897>
- 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: <https://doi.org/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. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL (1/W4), 321–328. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015>
- Höhle, J., Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, 64, 398–406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003>
- 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: <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- Kedzierski, M., Wierzbiicki, D. (2015). Radiometric quality assessment of images acquired by UAV's in various lighting and weather conditions. *Measurement*, 76, 156–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.003>
- Kosmatin Fras, M., Kerin, A., Mesarić, M., Peterman, V., Grigillo, D. (2016). Assessment of the quality of digital terrain model produced from unmanned aerial system imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 893–899. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-893-2016>
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2014). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Berlin/Boston: De Gruyter.
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>
- Martensson, S.-G., Reshetuk, Y. (2017). Height uncertainty in digital terrain modelling with unmanned aircraft systems. *Survey Review*, 49 (355), 312–318. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- Meißner, H., Cramer, M., Piltz, B. (2017). Benchmarking the optical resolving power of UAV based camera. *XLI-2/W6*, 243–249. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-2-W6-243-2017>

- org/10.5194/isprs-archives-XLI-2-W6-243-2017
- Mikrut, S. (2016). Classical photogrammetry and UAV – Selected aspects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI(B1), 947–952. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XLB1-947-2016>
- 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: <https://doi.org/10.1002/esp.4066>
- Nasrullah, A. R. (2016). Systematic analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived product quality. Master's Thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Enschede.
- Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6 (1), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- 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), 2–6. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprannuals-II-5-W1-203-2013>
- Őstir, K. (2006). Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU.
- Reshetnyuk, Y., Mårtensson, S. G. (2016). Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles. *Photogrammetric Record*, 31 (154), 143–165. DOI: <https://doi.org/10.1111/phor.12143>
- Rock, G., Ries, J. B., Udelhoven, T. (2012). Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/ (September), 69–73. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XXXVIII-1-C22-69-2011>
- Rosnelli, 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: <https://doi.org/10.3390/s120100453>
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.020>
- Santise, M., Fornari, M., Forlani, G., Roncella, R. (2014). Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL (5), 529–536. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XL-5-529-2014>
- 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 (1606), 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/RS10101606>
- 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: <https://doi.org/10.3390/s151127493>
- Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. (2014). Influence of blur on feature matching and a geometric approach for photogrammetric deblurring. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40 (3), 321–326. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XL-3-321-2014>
- Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. (2015). UAV image blur – its influence and ways to correct it. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(1W4), 33–39. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-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: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420941>
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., Gerke, M. (2019). UAV-based cadastral mapping: An assessment of the impact of flight parameters and ground truth measurements on the absolute accuracy of derived orthoimages. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 613–617. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XLII-2-W13-613-2019>
- 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 Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W4 (March), 215–222. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprannuals-II-3-W4-215-2015>
- 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: <https://doi.org/10.3390/rs8090786>
- Torres-Sánchez, J., Lopez-Granados, F., Borra-Serrano, I., Pena, J. M. (2017). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9502-0>
- Udin, W. S., Ahmad, A. (2014). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation flying altitude using unmanned aerial vehicle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012027>
- 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 Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III(3), 139–146. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprannuals-III-3-139-2016>
- Wierzbicki, D., Kedzierski, M., Fryskowska, A. (2015). Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL(1/W4), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XL-1-W4-1-2015>



Kosmatin Fras M., Drešček U., Liseč A., Grigillo D. (2020). Analiza vplivov na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije. Geodetski vestnik, 64 (4), 489-507. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507>

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: mojca.kosmatin-fras@fgg.uni-lj.si

assist. Urška Drešček, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: urska.drescek@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Anka Liseč, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: anka.lisec@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Dejan Grigillo, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: dejan.grigillo@fgg.uni-lj.si