

POSKUS AVTOMATSKE TRIDIMENZIONALNE REKONSTRUKCIJE ZGRADB IZ LETALSKIH STEREO POSNETKOV

*Drago Torkar
Institut Jožef Stefan, Ljubljana
Prispelo za objavo: 1995-11-13
Pripravljeno za objavo: 1995-11-21*

Izvleček

V članku opisujemo poskus avtomatske rekonstrukcije zgradb, pri katerem smo iz levega in desnega posnetka najprej izluščili ravne odseke obrisov objektov, nato pa med njimi iskali strukture, ki so potencialni kandidati za zgradbe, in jih zapisali z grafi. Korespondenčne zgradbe smo nato iskali s pomočjo algoritma za prileganje grafov.

Ključne besede: *Geodetski dan, luščenje značilk, odkrivanje zgradb, Otočec, rekonstrukcija zgradb, stereo primerjanje z značilkami, teorija grafov, 1995*

1 UVOD

Rekonstrukcija zgrad v treh dimenzijah iz letalskih stereo posnetkov je ena od pogostih aplikacij s področja stereo posnetkov. Ker gre za časovno zahtevno opravilo, so se v zadnjih letih povečala raziskovanja avtomatskih metod (Huertas et al., 1993, Dang et al., 1994, Deren et al., 1994).

Eden o problemov, ki ga je treba razrešiti pri avtomatski rekonstrukciji zgradb iz digitalnih stereo posnetkov, je samodejna določitev položaja korespondenčnih (istih) točk na levem in desnem posnetku. Iz lege korespondenčnih točk lahko izračunamo njihovo oddaljenost od perspektivnega centra kamere in nato položaj v absolutnih koordinatah. Do lege korespondenčnih točk oz. elementov slik pridemo tako, da med seboj primerjamo dele levega in desnega posnetka ali pa iz posnetkov najprej izluščimo simbolne zapise slik – značilke, ti morajo vsebovati opise objektov, ki nas zanimajo, in jih nato primerjamo med seboj. Nekatere metode pa uporabljajo tudi digitalni model reliefa (DMR), ki je lahko pridobljen s stereo prileganjem okolice točk iz letalskih posnetkov ali kako drugače (Weidner et al., 1994). V splošnem nam pri iskanju korespondenčnih točk ali značilk s prileganjem povzroča preglatvice več faktorjev, ki so pogojeni z geometrijo sterea.

2 ZASNOVA AVTOMATSKEGA POSTOPKA

Pri izdelavi lastnega postopka avtomatske rekonstrukcije zgradb iz letalskih stereo posnetkov smo se delno opirali na delo Horauda in Skordasa (Horaud et. al., 1989). Za najtežji del naloge, t.j. poiskati korespondenčne elemente na levem in desnem posnetku, smo si izbrali metodo, ki spada v skupino iskanja disparitet s prileganjem značilnk. Ker so zgradbe na posnetkih lahko tudi precej kompleksne, jih zadovoljivo opišemo le s strukturiranimi značilnkami, ki jih sestavimo iz enostavnejših. Vsaka strukturirana značilka tako predstavlja eno zgradbo ali kompleks med seboj stikajočih se zgradb. Treba je bilo torej najprej izdelati postopek za odkrivanje posameznih zgradb in njihovo predstavitev s strukturami, nato pa uporabiti učinkovito metodo za ugotovitev korespondenčnih zgradb na levem in desnem posnetku. Celoten postopek smo razbili na naslednje korake:

- ☐ izločitev osnovnih značilnk
- ☐ povezovanje osnovnih značilnk v strukture s pomočjo grafov
- ☐ iskanje korespondenčnih značilnk s prileganjem grafov
- ☐ tridimenzionalna rekonstrukcija zgradb.

3 IZLOČITEV ZNAČILNK

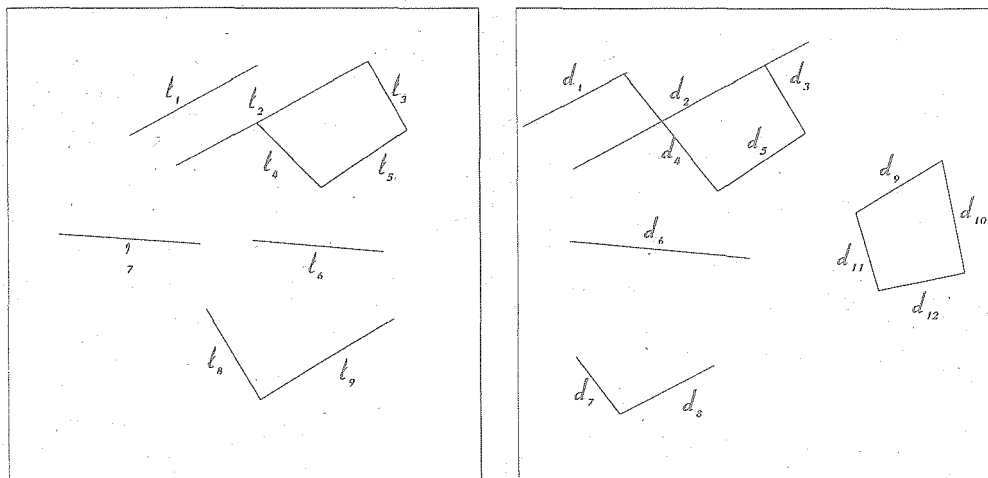
Za osnovne značilke smo si izbrali ravne odseke obrisov zgradb. S Cannyjevim Operatorjem (Canny, 1983) smo na levem in desnem posnetku poiskali robove objektov na sliki. S spreminjanjem širine operatorja lahko vplivamo na to, kako podrobne spremembe v intenziteti točk bodo privzete kot del roba. Izbira širine je odvisna od osvetlitve in kontrasta slike in od vsebine oz. objektov, ki jim želimo poiskati robove. Za vsak posnetek posebej smo s poskušanjem določili primerno širino operatorja. Ker imajo zgradbe obrise večinoma sestavljene iz ravnih segmentov, smo zato z algoritmom gradnje ravnih črtnih odsekov poiskali ravne odseke robov, ki predstavljajo potencialne stranice zgradb. Zaradi vpliva šuma in toleranc postopka odkrivanja ravnih odsekov robov, je bilo smiselno izvesti popravljanje daljic. Algoritem vsebuje dva koraka. Najprej med vsemi značilnkami iščemo tiste, ki so kolinearne in imajo krajišča dovolj blizu skupaj. Združimo jih v novo daljico. Nato pa za vsako krajišče vsake daljice pregledamo vsa preostala krajišča in v primeru, da sta dve ali več krajišč dovolj blizu, skrajšamo ali podaljšamo ustrezne daljice, tako da krajišča sovpadajo. Prav tako podaljšamo ali skrajšamo daljice, katerih krajišča so dovolj blizu drugih daljic, tako da so nova krajišča v presečiščih.

4 POVEZOVANJE OSNOVNIH ZNAČILNK V STRUKTURE S POMOČJO GRAFOV

Pri gradnji struktur želimo na koncu postopka dobiti množico struktur za levo in desno sliko stereo para, od katerih bo vsaka predstavljala simbolični opis zgradbe na sliki. Pri tem predpostavimo, da imajo zgradbe samo ravne robove in da je njihov obris vedno sklenjen. Gradnje struktur smo se lotili v dveh delih. V prvem smo gradili graf za levo in desno sliko iz osnovnih značilnk, t.j. linearnih segmentov robov. Rezultat tega dela je bil nepovezan, obtežen graf, ki ga lahko poimenujemo tudi relacijski graf, saj odraža odnose med osnovnimi značilnkami. V drugem pa smo izločili nekatera vozlišča in poiskali vse povezane podgrafe, ki opisujejo po eno zgradbo.

4.1 Gradnja relacijskega grafa iz osnovnih značilk

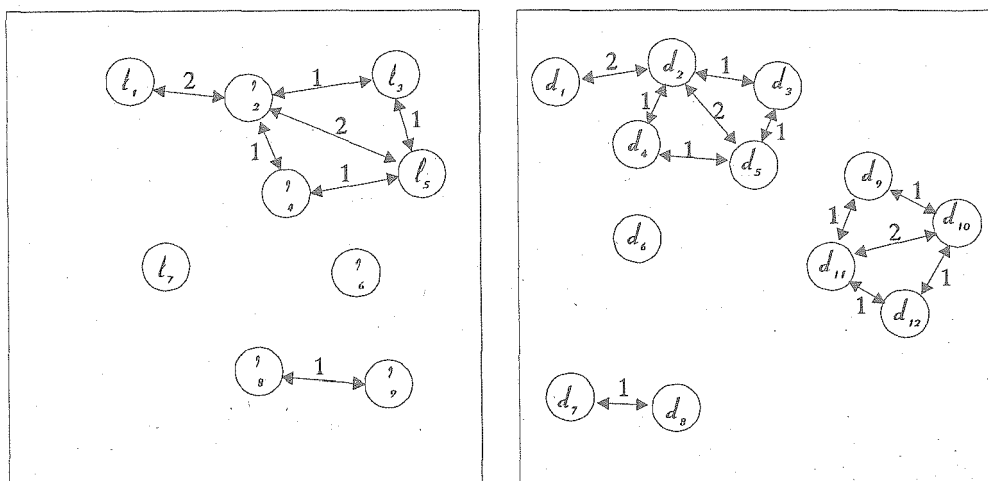
Vsaka značilka predstavlja vozlišče z vrednostmi: lega, velikost in kontrast ter polji kazalcev, ki predstavljajo povezave. Ti polji sta: polje kazalcev se *stika_z* in polje kazalcev je *vzporeden_z*. Kazalci iz polja se *stika_z* kažejo na značilke, ki se stikajo ali sečejo z obravnavano značilko. Kazalci polja je *vzporeden_z* pa na najbližje značilke, ki so vzporedne z omenjeno značilko. Tako ima vsaka značilka lahko največ dva kazalca je *vzporeden_z*. Vsakemu vozlišču priredimo še število povezav tipa se *stika_z* in število povezav je *vzporeden_z*.



Slika 1: Značilke leve in desne slike, za katere želimo zgraditi relacijska grafa

Vrednosti vozlišč, ki predstavljajo uteži, določimo tako: lega je določena s koordinatami krajišč, velikost je enaka dolžini značilk in jo enostavno izračunamo, kontrast pa določimo s pregledovanjem okolice vsake daljice v obeh smereh, pravokotnih na njo, dokler ne naletimo na nov rob ali smo oddaljeni za dolžino daljice. Povezave tipa se *stika_z* (na sliki 2 označene z 1) določimo tako, da za vsako značilko izračunamo presečišče premice, na katerih leži, s premicami, na katerih ležijo preostale značilke. Če leži presečišče na obeh značilkah, priredimo kazalcu ustrezno vrednost. Če ne najdemo nobene povezave, postavimo vrednost, ki opisuje število povezav tipa se *stika_z*, za ustrezno vozlišče grafa na nič.

Podobno iščemo tudi povezave tipa je *vzporeden_z* (na sliki 2 označene z 2). Za vsako daljico izračunamo smerni naklon premice, na kateri leži. Izmed daljic, katerih naklon je znotraj meja $\pm 10\%$, hkrati pa se vzajemno prekrivajo v dolžini 60% ali več dolžine obravnavane daljice, izberemo tisto, ki ji je najbližja v eni od obeh smeri. Gradnja relacijskega grafa za primer iz slike 1 je prikazana na sliki 2.



Slika 2: Relacijska grafa leve in desne slike

4.2 Izločanje vozlišč in odkrivanje podgrafov

Zgradili smo torej obteženi relacijski graf, ki pa je nepovezan, saj obstaja množica značilnk, ki nimajo stičišč s sosedni niti niso z njimi vzporedne. Take proglasimo za neuporabne in jih izločimo tako, da iz grafa odstranimo vozlišča, ki jih predstavljajo. Prav tako odstranimo vozlišča, ki imajo samo eno povezavo posamezne vrste. S tem izločimo značilke, ki imajo le eno vzporedno značilko ali se z njo stikajo. V praksi se zelo redko zgodi, da bi dve med seboj tako organizirani značilki v resnici predstavljali zgradbo. Če jo, je to posledica zelo slabe detekcije robov in ravnih odsekov, ki je običajno povezano s slabo izbiro parametrov, ki jih imamo pri tem na voljo.

Poiskali bi radi tiste podgrafe, ki predstavljajo eno samo zgradbo na sliki. Le-ta je lahko sestavljena iz več sklopov, ki pa morajo biti med seboj povezani. Iskanje zaprtosti tokrat prevedemo na iskanje ciklov v grafu. Odkrivanje ciklov je dovolj preprosto in učinkovito. Predpostavljamo, da so zgradbe s stališča robov zaključene celote in da je predhodno odkrivanje osnovnih značilnk dovolj učinkovito, da poišče vse robove na njih. Pri iskanju ciklov smo upoštevali samo povezave tipa se_stika_z. Uporabili pa smo metodo preiskovanja grafa v globino, s katero pa dobimo tudi cikle, ki na sliki ne predstavljajo zaprtosti. Zato jih s ponovnim preverjanjem vseh odkritih ciklov izločimo. Prav tako s pregledom preostalih ciklov odkrijemo tiste, ki so med seboj povezani. Tako smo našli vse povezane podgrafe. Vsak povezan podgraf načelno predstavlja eno ali več med seboj dotikajočih se zgradb. Ker smo take podgrafe odkrili na levi in desni sliki posebej, nam preostane še, da ugotovimo, kateri med njimi so korespondenčni.

5 ISKANJE KORESPONDENČNIH ZNAČILNK S PRILEGANJEM GRAFOV

Zaradi raznih vzrokov, kot so fotometrične razlike med levo in desno sliko, zakrivljanje, problemi s sencami, napake pri pridobivanju osnovnih značilnk, napake pri grajenju struktur idr. ne moremo pričakovati izomorfizma med povezanimi podgrafi relacijskih grafov. Korespondenčne podgrafe bomo torej morali

ugotavljati na osnovi podobnosti. Zato smo najprej definirali mero podobnosti med dvema vozliščema (i in j) relacijskega grafa.

$$mp_{ij} = \frac{2}{5} \left(\frac{\min(K_i, K_j)}{\max(K_i, K_j)} + \frac{1}{4} \frac{\min(l_i, l_j)}{\max(l_i, l_j)} + \frac{1}{4} \frac{\pi - 2\phi_{ij}}{\pi} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{\min(\Sigma p_{li}, \Sigma p_{lj})}{\max(\Sigma p_{li}, \Sigma p_{lj})} + \frac{1}{2} \frac{\min(\Sigma p_{2i}, \Sigma p_{2j})}{\max(\Sigma p_{2i}, \Sigma p_{2j})} \right)$$

Mera podobnosti je število na intervalu (0,1). Prvi člen predstavlja podobnost kontrasta. Drugi člen ugotavlja ujemanje v dolžini daljic in je utežen s faktorjem $\frac{1}{4}$. Tretji člen meri podobnost v naklonu in je prav tako utežen s faktorjem $\frac{1}{4}$. Četrty člen meri ujemanje v številu povezav tipa se_stika_z in je utežen s faktorjem $\frac{1}{2}$, peti pa v številu povezav tipa je_vzporeden_z in je utežen z $\frac{1}{2}$. Največjo težo smo forej pripisali ujemanju v kontrastu. Povezavam obeh tipov (je_vzporeden_z in se_stika_z) pa smo pripisali le polovično težo, saj se velikokrat zgodi, da je določena značilka povezana s samostojnimi značilkami, ki niso del zgradbe. Ujemanju v dolžini in naklonu daljic smo pripisali majhno težo, saj sta pri večji razdalji med položajema kamere pri levem in desnem posnetku lahko obe lastnosti zelo različni.

Sedaj lahko sestavimo mero podobnosti med dvema podgrafoma relacijskih grafov leve in desne slike kot vsoto mer podobnosti med vsemi kombinacijami vozlišč, ki podgrafoma pripadajo in jo normiramo na interval (0,1).

$$M_{mn} = \frac{1}{N_m N_n} \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_n} mp_{ij}$$

Prišli smo do mere, s katero lahko ocenimo „afiniteto“ vsakega podgrafa leve slike do vsakega podgrafa desne slike. Tako lahko zgradimo nov graf, ki ga poimenujemo korespondenčni graf. Vozlišča predstavljajo podgrafe relacijskih grafov. Povezave potegnemo med vsemi vozlišči, ki ustrezajo podgrafom leve slike, in med vsemi vozlišči, ki predstavljajo podgrafe desne slike. Povezave obtežimo (označimo) z vrednostmi mere podobnosti med posameznima vozliščema. Poiskati moramo tako podmnožico povezav, v kateri se bo vsako vozlišče pojavljalo samo enkrat. To pomeni, da je vsako vozlišče, ki se ga dotika določena povezava, povezano samo z vozliščem na drugem koncu te povezave. Hkrati pa morajo biti izpolnjeni pogoji, ki jih določajo mere podobnosti oz. uteži. Vozlišče, ki je povezano z drugim vozliščem, mora imeti do njega večjo mero podobnosti, kot jo ima do drugih vozlišč. Nekatera vozlišča pa lahko ostanejo nepovezana. To rešimo s pomočjo klasičnega algoritma iz teorije grafov za reševanje t.i. „problema stabilne poroke“ (Sedgewick, 1988), ki uspešno poišče korespondenčna vozlišča v korespondenčnem grafu. Po istem postopku nato poiščemo še korespondenčne značilke v posameznih parih podgrafov. Tako pridemo do korespondenčnih značilk leve in desne slike. S pomočjo znanih položajev krajišč daljic na slikah in njihovih orientacij ter kamere v času nastanka levega in desnega posnetka lahko izračunamo tridimenzionalni položaj posameznih točk v koordinatnem sistemu leve in desne kamere. S pomočjo položaja perspektivnega centra kamere pa lahko položaj točke nato preračunamo še v katerega od absolutnih koordinatnih sistemov.

6 TRIDIMENZIONALNA REKONSTRUKCIJA ZGRADB

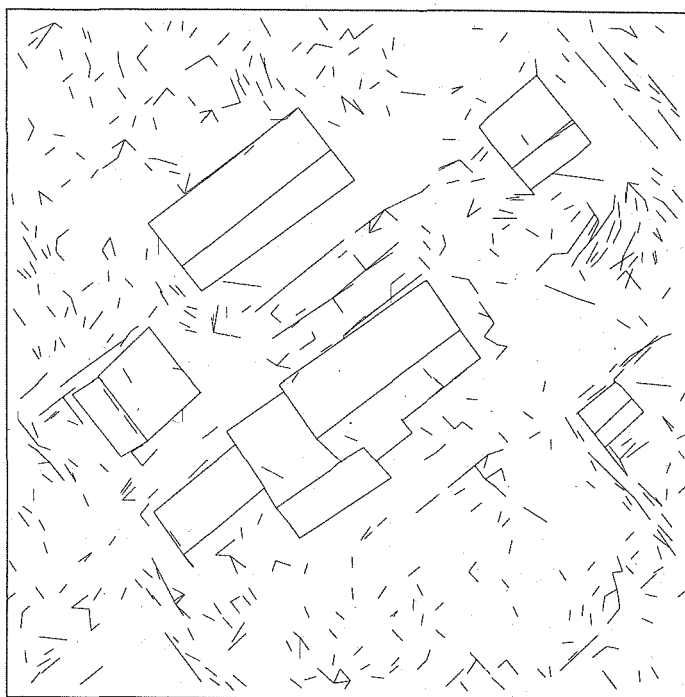
Opisani postopek pridobivanja globinskih slik zgradb smo preizkusili na letalskih posnetkih, ki so nastali pri sistematičnem periodičnem slikanju ozemlja Slovenije iz zraka (CAS). Poleg posnetkov, ki nam jih je v uporabo odstopil Geodetski zavod Slovenije, smo dobili tudi absolutno orientacijo kamere v trenutku nastanka posnetka. Na voljo so nam bili posnetki v merilih snemanja 1:5 000. Vnos v računalnik (skaniranje) se običajno izvaja z velikostjo točke 15-30 μm v 256 nivojih sivine, kar pomeni veliko število slikovnih elementov za posnetek, ki meri približno 23x23 cm. V našem primeru je bila velikost točke približno 20 μm , kar pomeni ločljivost 500 točk/cm oz. 1 270 točk/inčo (dpi). To pomeni približno 11 500 x 11 500 točk za celotni posnetek oz. okoli 130 MB podatkov. Zato smo za obdelavo uporabljali majhne izseke, velikosti okoli 2x2 cm, iz območja prekrivanja levega in desnega posnetka. Prekrivanje levega in desnega posnetka je bilo 60 odstotno. V nadaljevanju prikazujemo na slikah primer postopka tridimenzionalne rekonstrukcije zgradb z vmesnim rezultatom.

7 ZAKLJUČEK

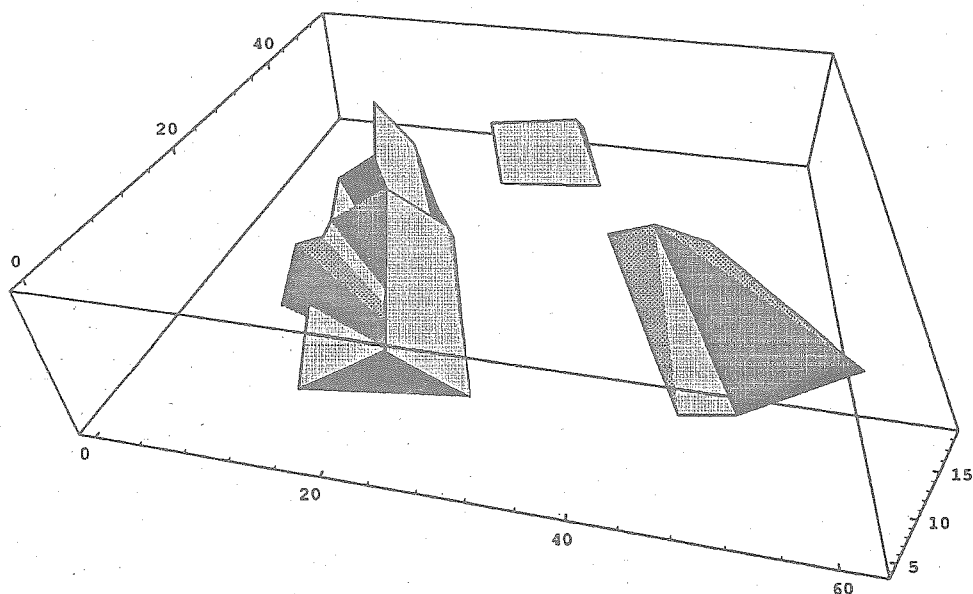
Izdelali smo metodo za avtomatsko rekonstrukcijo zgradb iz letalskih stereo posnetkov, ki zahteva, da nekatere tolerančne parametre pri izločanju in popravljanju značilk ocenimo oz. jih določimo s poskušanjem. Iz rezultatov je razvidno, da lahko pridemo po opisanem postopku le do delne rekonstrukcije zgradb. Pridobljene točke se skoraj v vseh primerih nahajajo na strehah zgradb, kar je posledica navpičnega položaja kamere pri snemanju. Napake pri izločanju značilk in vplivi neželenih pojavov senc in zakrivanj povzročijo napake in pomanjkljivo rekonstrukcijo nekaterih zgradb. Postopek se po količini uspešno rekonstruiranih točk še ne more kosati z ročnimi ali polavtomatskimi metodami. Opisana metoda predstavlja eno od možnih poti pri razvoju avtomatskega pridobivanja zgradb iz letalskih stereo posnetkov.



Slika 3: Levi (zgoraj) in desni (spodaj) posnetek stereo para



Slika 4: Odkrite značilke na levi (zgoraj) in desni (spodaj) sliki



Slika 5: Tridimenzionalni prikaz uspešno pridobljenih točk

Literatura:

- Canny, J.F., *Finding edges and lines in images*. Technical report AI-TR 720, M.I.T. Artificial Intell. Lab., Cambridge, MA, 1983
- Dang, T. et al., *Applying perceptual grouping of surface models to the detection and stereo reconstruction of buildings in aerial imagery*. V: *Proc. ISPRS 1994 – Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision*, SPIE, DGPF, IEEE, 1994
- Deren, L., Juliang S., *House extraction with multiresolution analysis and informational fusion*. In *Comm. III Symposium 94, WG/2*, 1994
- Horaud, R., Skordas, T., *Stereo correspondence through feature grouping and maximal cliques*. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1989, letnik 11, št. 11, str. 1168-1180
- Huertas, A. et al., *Detecting of buildings from monocular views of aerial scenes using perceptual grouping of shadows*. V: *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, 1993
- Sedgewick, R., *Algorithms*. Addison-Wesley Publishing Company, 1988
- Weidner, U., Foerstner, W., *Toward automatic building extraction from high resolution digital elevation models*. V: *Digital Photogrammetry*, Muenchen, 1994

Recenzija: mag. Vasja Bric
mag. Radovan Dalibor