

Mojca Kosmatin Fras\*

## TEORETIČNE OSNOVE IZDELAVE DIGITALNEGA ORTOFOTO

### 1. Uvod

Obdelava slik je stara toliko kot življenje. Živali in ljudje obdelujemo slike po analognem principu. Obdelava poteka online, paralelno, multispektralno prek ekspozicijskega sistema. Analogni sistem obdelave slik, kot je realiziran pri človeku, je kompleksen sistem in ga umetno še ne moremo popolnoma simulirati. Današnje tehnologije omogočajo geometrično in radiometrično obdelavo digitalnih posnetkov. Z digitalno obdelavo slik oz. rastrskih podatkov se ukvarjajo različne vede in področja: matematika in računalništvo, daljinsko zaznavanje, fotogrametrija, kartografija, itd. V prispevku smo se omejili na uporabo digitalne obdelave posnetkov v fotogrametriji. Obdelali smo izdelavo digitalnega ortofoto kot eno od možnih aplikacij digitalne obdelave posnetkov.

### 2. Digitalna fotogrametrija

Fotogrametrija kot veda in tehnika pridobivanja merskih podatkov o objektih sodi v širše območje daljinskega zaznavanja. V fotogrametrijo sodi vsaka merska metoda, s katero rekonstruiramo položaj in obliko objektov iz fotografije oz. fotogrametričnega posnetka. Rezultati fotogrametričnega izvedenja so različni: koordinate posameznih točk objekta v prostorskem koordinatnem sistemu, karte in druge grafične predstavitve, ortofoto itd. Fotogrametrija je definirana z glavnimi ka-

rakteristikami in rezultati izvedenja, v definiciji pa niso zajeta sredstva tehnologije, s katerimi podatke izvednimo in obdelujemo. Tehnološka sredstva so se v preteklosti spreminjala in se še spreminjajo.

Fotogrametrijo glede na različne tehnologije pridobivanja merskih podatkov iz posnetkov razdelimo v nekaj značilnih skupin:

#### a) analogna fotogrametrija

Fotogrametrični posnetek je analogen zapis prostorskega objekta oz. terena. Pri analognih fotogrametričnih postopkih fotogrametrični posnetek v procesu izvedenja ostane osnovni nosilec podatkov. Instrumenti za analogno izvedenja so analogni fotogrametrični instrumenti.

#### b) analitična fotogrametrija

Informacijsko vsebino posnetka skrčimo na slikovne koordinate posameznih točk, s katerimi dalje računamo po pravilih analitične fotogrametrije in izravnalnega računa. V strokovni literaturi včasih zasledimo analitične postopke označene kot digitalne postopke, vendar tega ne priporočamo, ker je digitalna fotogrametrija definirana drugače. Instrumenti za izvedenja in obdelavo so analitični fotogrametrični instrumenti.

#### c) digitalna fotogrametrija

Celotno vsebino posnetka /tj. metrične in semantične informacije) numerično kodiramo. Dobimo t.i. "digitalni posnetek", ki ga nato z digitalnimi računalniki lahko poljubno procesiramo. Digitalni posnetek torej poleg geometričnih informacij vsebuje tudi radiometrične informacije (sive vrednosti). Analogni posnetek pretvorimo v digitalnega z instrumenti za analogno/digitalno pretvorbo, digitalni posnetek pa pretvorimo nazaj v analognega z instrumenti za digitalno/analogno pretvorbo.

Obdelava digitalnih fotogrametričnih posnetkov se je razvila iz satelitskega da-

\*61000 Ljubljana, YU, Geodetski zavod SRS  
dipl.ing.geod.

ljinskega zaznavanja in iz digitalne slikovne korelacije. Hiter razvoj digitalne fotogrametrije, posebno v zadnjem času, pripisujemo novim vrstam senzorjev, s katerimi lahko registriramo sive vrednosti, in vedno zmogljivejšim računalnikom, ki lahko obdelujejo velike količine podatkov. Možnosti najrazličnejše uporabe digitalne fotogrametrije na številnih področjih, ki se s to novo tehnologijo odpirajo, so neizmerne.

Digitalno fotogrametrijo glede na način zajemanja digitalnih podatkov o objektu delimo na "off-line" in "on-line". Pri off-line digitalni fotogrametriji je analogni fotogrametrični posnetek temeljni vir za zajemanje digitalnih podatkov. Postopek snemanja je enak kot v klasični fotogrametriji, razlika je le v izvedenosti informacijske vsebine posnetka. Pri on-line digitalni fotogrametriji pa objekt snemamo z digitalno kamero, to pomeni, da objekt direktno zapisujemo v digitalni obliki, brez vmesne faze analogne registracije na svetlobno občutljivem materialu. Celoten fotogrametričen postopek je tako avtomatiziran, da do rezultatov pridemo v zelo kratkem času. Taki fotogrametrični sistemi danes spadajo v vrhunsko tehnologijo nekaterih industrijsko razvitih držav, s katero krmilijo različne dinamične procese. Ta tehnologija odpravlja glavni slabosti fotogrametrije: fotografski proces, ki je vir različnih napak in subjektivni vpliv operaterja. Popolnoma avtomatizirana on-line tehnologija še ni osvojena, zato je ena glavnih smeri razvoja fotogrametrije usmerjena prav na to področje. Digitalna on-line fotogrametrija je izziv prihodnosti.

### 3. Digitalni ortofoto

Vsebina linijskih kart oziroma načrtov za nekatere namene ne zadošča. Prostorski načrtovalci, geografi, geologi, arheologi itd. v linijskih kartah ne najdejo vseh potrebnih detajlov. Po drugi strani pa so detajli, ki so namenjeni za interpretacijo semantičnih podatkov v celoti na fotogrametričnem posnetku. Smiselno je torej združiti bogastvo vsebine fotogrametričnega posnetka in metrične lastnosti karte oziroma načrta.

Fotogrametrični posnetek je centralna perspektivna upodobitev snemanega objekta, načrt pa ortogonalna upodobitev. Na aerofotogrametričnem posnetku so v primerjavi s karto radialna odstopanja zaradi nagiba posnetka in radialna odstopanja zaradi višinskih razlik terena glede na privzeto ravnino.

Aerofotogrametrični posnetek ravnega terena lahko z redresiranjem v celoti pretvorimo iz perspektivne v ortogonalno projekcijo. Posnetek manj razgibanega terena lahko redresiramo po delih, ki jih obravnavamo kot ravnino in sestavimo t.i. fotomozaik. Običajno pa imamo opravka s poljubno razgibanimi tereni, kjer postopek enostavnega redresiranja ni mogoč. V fotogrametriji tako za izdelavo ortofoto načrtov/kart v glavnem uporabljamo postopek diferencialnega redresiranja, ki ga opravljamo z instrumenti izdelanimi posebej za te namene. Tak postopek diferencialnega je analogen postopek, saj je temeljni nosilec podatkov v celotnem procesu izvedenosti fotogrametrični posnetek.

Izraz ortofoto pomeni diferencialno redresiran aeroposnetek. Ortofoto je torej produkt diferencialnega redresiranja. Izraz digitalni ortofoto pomeni diferencialno redresiran aeroposnetek zapisan v digitalni obliki. Torej izraz pomeni produkt in postopek. Vendar se je v strokovni literaturi ustalil izraz digitalni ortofoto za oznako celega postopka, čeprav to ni najbolj primeren. Tudi H.P. Bähr se sprašuje o smiselnosti tako porabljenih izrazov in ugotavlja, da je v strokovnem izrazoslovju precejšnja zmeda.

Kot smo ugotovili, ima digitalna fotogrametrija opravka z digitalnimi posnetki. Tako kot smo posnetek razpačili po majhnih delčkih v ortofoto instrumentu, ga lahko razpačimo tudi z ustreznim računalniškim algoritmom, če imamo posnetek zapisan v digitalni obliki. Postopek bi lahko poimenovali digitalno diferencialno redresiranje, rezultat pa digitalni ortofoto, ki ga z instrumentom za digitalno/analogno pretvorbo zapišemo v analogni obliki. Kratka definicija se glasi: Digitalni ortofoto je digitalni posnetek, ki ga dobimo z digitalnim postopkom diferencialnega redresiranja.

#### 4. Matematična zasnova izdelave digitalnega ortofoto posnetka

##### 4.1 Terminologija

V strokovni terminologiji je na obravnavanem področju precej nedoslednosti. Za lažje razumevanje bomo ključne termine opisali z definicijami. Pri tem smo ustaljene definicije upoštevali, kolikor je mogoče.

Analogno-digitalna pretvorba - posnetek, ki je analogen zapis snemanega objekta, pretvorimo v digitalen zapis; instrument, ki to izvede, imenujemo skaner /ang. scanner/; v nadaljevanju krajšamo z oznako A/D.

Digitalno-analogna pretvorba - digitalni posnetek pretvorimo nazaj v analogni zapis; instrument, ki to izvede imenujemo fotoprinter; v nadaljevanju D/A.

Vhodna matrika sivih vrednosti je matrika sivih vrednosti (angl. grey level) fotogrametričnega aeroposnetka; dobimo jo s skeniranjem posnetka; v nadaljevanju uporabljamo krajši izraz vhodna matrika; sive vrednosti se nanašajo na koordinatni sistem skeniranja.

Izhodna matrika sivih vrednosti je matrika sivih vrednosti ortofoto posnetka; dobimo jo kot rezultat računalniške obdelave fotogrametričnega posnetka; z digitalno-analogno pretvorbo jo pretvorimo v ortofoto; v nadaljevanju uporabljamo krajši izraz izhodna matrika; sive vrednosti se nanašajo na koordinatni sistem fotointerpretatorja.

Slikovna matrika je matrika sivih vrednosti posnetka; vrsta posnetka in koordinatni sistem matrike nista posebej definirana.

Piksel - /ang. picture element/ je najmanjši slikovni element; radiometrična vsebina je predstavljena na površini kvadrata ali pravokotnika, geometrična vrednost piksla pa je predstavljena z njegovim središčem.

Element slikovne matrike - najmanjši slikovni element; piksel.

##### 4.2. Analogno-digitalna (A/D) pretvorba

Slika oz. fotogrametrični posnetek matematično definiramo kot slikovno funkcijo. Izraz slika oz. posnetek predstavlja ravninski objekt, čigar videz se spreminja od točke do točke. Na črno-belem posnetku lahko to spreminjanje opišemo z enim samim parametrom, ki ustreza količini svetlobe, ki doseže opazovalca z dane točke. Analogni posnetek pretvorimo v digitalnega tako, da "prečitamo" sive vrednosti posameznih točk posnetka in jih shranimo v digitalni obliki. Osnovne pojme A/D pretvorbe lahko preprosto prikažemo na enodimenzionalnem primeru (slika 1).

Analogna funkcija  $f(x)$  je zvezna v abscisni in ordinatni smeri. Digitalizacija funkcije  $f(x)$  predstavlja diskretizacijo funkcije v obeh smereh. V abscisni smeri govorimo o "otipanju" s fiksno periodo, v ordinatni smeri pa o "kvantifikaciji" funkcijske vrednosti  $f(x)$ , ki v dvodimenzionalni sliki predstavlja sivo vrednost.

Zaloga sivih vrednosti  $S$  je množica naravnih števil, vključno z ničlo.  $S$  simboli to zapisemo:  $S = \mathbb{N} \cup 0$ .

Sive vrednosti zapisujemo v digitalni obliki. Glede na različno število razpoznavnih stopenj sive vrednosti lahko le-te zapisujemo v različno število bitov. Če bi želeli na računalniškem mediju shraniti 256 različnih stopenj "sivosti", bi za en zapis potrebovali 8 bitov.

Posnetek matematično definiramo kot realno funkcijo dveh spremenljivk. Vrednost slikovne funkcije v točki imenujemo siva vrednost slike v točki. Značilno je, da je vsaka slikovna funkcija omejena in ni negativna. Procesiranje posnetkov pomeni izvajanje matematičnih operacij na slikovni funkciji.

Če kvantificiramo slikovno funkcijo po majhnih slikovnih elementih (pikslih), dobimo matriko sivih vrednosti slikovne funkcije. Tako dobljeno matriko z različnimi matematičnimi operacijami procesiramo. Rezultat procesiranja je nova matrika sivih vrednosti. Le-ta je tudi diskretizirana slikovna funkcija, ki pa je od vhodne matrike različna. S procesiranjem posnetka izboljšujemo njegov kontrast, generaliziramo njegove elemente, ga geometrično razpačujemo ipd.

#### 4.3 Vhodni podatki za izdelavo digitalnega ortofota

Poznavanje osnov analitične fotogrametrije in obdelave digitalnih posnetkov je pogoj za razumevanje postopka izdelave digitalnega ortofota. Predlagana tehnologija je rezultat študija tuje strokovne literature in lastnih razmišljanj o zastavljenem vprašanju.

Za izdelavo digitalnega ortofota potrebujemo naslednje vhodne podatke:

- vhodno matriko sivih vrednosti fotogrametričnega posnetka,
- matematično povezavo med vhodno matriko in slikovnim koordinatnim sistemom,
- elementi notranje orientacije kamere,
- elementi zunanje orientacije posnetka in
- digitalni model reliefa za območje, ki je upodobljeno na posnetku.

Vhodno matriko dobimo s skeniranjem fotogrametričnega posnetka.

Digitalni fotogrametrični posnetek moramo povezati s slikovnim koordinatnim sistemom, ker vse matematične povezave

med posnetkom in prostorskim objektom izvajajo prek slikovnega koordinatnega sistema. Ta povezava je dejansko vez med digitalno in analitično fotogrametrijo. Za povezavo lahko izberemo poljubno ravninsko transformacijo. Priporočljiva je ravninska afina transformacija, ker poleg dveh translacij in enega zasuka upošteva različno spremembo merila v obeh smereh koordinatnih osi in prečni strig. Na ta način delno zmanjšamo napake, ki so rezultat nepopolne podobnosti digitalnega in analognega posnetka. Matematično povezavo vhodne matrike in slikovnega koordinatnega sistema torej predstavlja šest parametrov afile transformacije, ki jih izračunamo iz najmanj treh točk, za katere poznamo koordinate v slikovnem koordinatnem sistemu in koordinatnem sistemu skanerja. Elemente notranje orientacije kamere dobimo v kalibracijskem protokolu kamere. Elemente zunanje orientacije posnetka izračunamo po postopku fotogrametričnega zunanjega ureza. Za območje, ki je upodobljeno na posnetku, moramo priskrbeti podatke o digitalnem modelu reliefa. Poznati moramo ključ, po katerem so podatki zapisani na računalniškem mediju.

#### 4.4. Določitev ustreznih sivih vrednosti izhodne matrike

Osnovni problem pri izdelavi digitalnega ortofota je določitev ustrezne sive vrednosti za vsak piksel izhodne matrike glede na vhodno matriko. Možni sta dve različni metodi določitve sivih vrednosti izhodne matrike: direktna in indirektna metoda.

##### Direktna metoda

Pri direktni metodi za vsak piksel vhodne matrike izračunamo položaj v izhodni matriki in mu pripišemo sive vrednosti vhodnega piksla. Ta metoda je zelo enostavna, vendar ima slabo stran, da lahko v izhodni matriki pride do "luknje" oziroma "prekrivanj" sivih vrednosti.

##### Indirektna metoda

V praksi se pogosto uporablja indirektna metoda. Pri tej metodi najprej definiramo izhodno matriko /v geometričnem smi-

slu/, za vsak piksel izhodne matrike nato poiščemo položaj v vhodni matriki in mu pripišemo sivo vrednost.

Načinov prireditve sivih vrednosti je več. Najenostavnejša možnost je ta, da izhodnemu pikslu priredimo sivo vrednost piksla vhodne matrike, v katerega je "padla" izračunana geometrična vrednost. Zanesljivost take prireditve je mihna. H.P.Bähr navaja, da je interpretacijska napaka pri takem načinu prireditve približno 15%. Če uporabimo bilinearno interpolacijo sivih vrednosti (interpolacija med štirimi sosednjimi piksli), pa se ta napaka zmanjša na samo 3%. Uporabimo lahko tudi zapletenejše interpolacije, vendar število potrebnih matematičnih operacij zelo hitro narašča s številom dodatnih parametrov, zato pridobitev natančnosti ni več smoterna.

#### 4.5 Opis postopka izdelave digitalnega ortofota

Izdelava digitalnega ortofota je kompleksna naloga, sestavljena iz posameznih manjših delov, ki jih lahko rešujemo samostojno. Celotni postopek lahko razdelimo v tele faze:

##### a/ predhodna dela:

- priprava fotogrametričnega posnetka,
- priprava podatkov digitalnega modela reliefa za obravnavano območje,
- določitev koordinatnega sistema izhodne matrike;

##### b/ fotogrametrična dela:

- izračun elementov zunanje orientacije fotogrametričnega posnetka,
- izračun parametrov afine transformacije,
- določitev planimetričnih koordinat digitalnega modela reliefa v koordinatnem sistemu skanerja;

##### c/ otipavanje posnetka;

##### d/ glavna matematična obdelava:

- bilinearna interpolacija centrov pikslov izhodne matrike v transformirani mreži DMR,
- pridobitev sivih vrednosti izhodne matrike;

e/ filtriranje izhodne matrike (ni neobhodno potrebno);

f/ izpis konče matrike na fotoprinterju.

## 5. Sklep

Izdelava ortofoto kart z digitalnim postopkom je razmeroma mlada tehnologija. V razvitem svetu je danes še malo središč, ki se ukvarjajo s takimi raziskavami oziroma razvijajo to tehnologijo. To nasploh velja za celotno področje digitalne fotogrametrije, izdelava ortofoto kart z digitalnim postopkom pa je le ena izmed možnosti uporabe digitalne fotogrametrije.

Razmislimo še o morebitnih prednostih in slabostih te nove tehnologije. Največja prednost digitalno zapisanih posnetkov je v praktično neomejeni možnosti procesiranja posnetkov. Namen procesiranja posnetkov je lahko različen: npr. želimo izboljšati kontrast posnetka, generaliziramo posamezne elemente posnetka, posnetek geometrično ali radiometrično razpačujemo itd. Pri izdelavi ortofoto posnetka to pomeni, da le-tega ne le pretvorimo v ortogonalno projekcijo, temveč lahko tudi izboljšujemo njegovo kakovost, izločimo ali poudarimo nekatere elemente ipd. Posnetek, ki smo ga zapisali v digitalni obliki, lahko uporabimo za različne namene. Obdelujemo lahko mono ali stereo posnetke (za analogno izdelavo ortofota potrebujemo stereopar). S tem smo predstavili le glavne pozitivne lastnosti digitalnih posnetkov. Slaba stran pa je ta, da imamo opravka z zelo velikimi količinami podatkov, vendar je to predvsem slabost računalniške opreme, ki je na voljo. Če bi imeli računalnike zelo velikih sposobnosti (velike

hitrosti operacij, hiter dostop do podatkov...), ta predpostavka ne bi bila več bistvena.

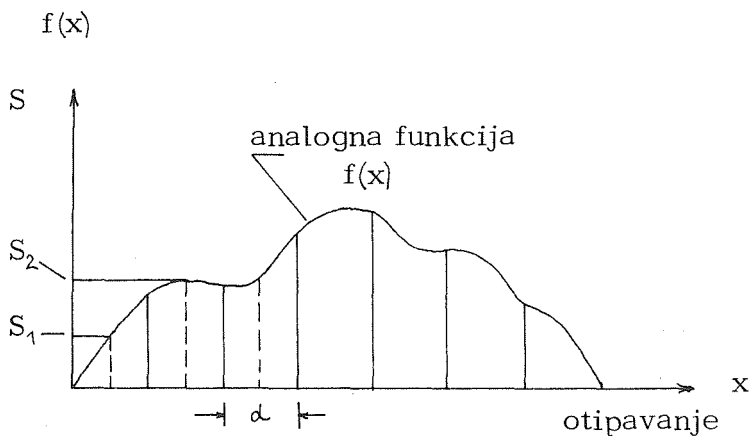
Njena nadgradnja je izdelava računalniške zasnove in konkretnih računalniških programov, da bo teorija zaživela v praksi. To pa je naša nadaljnja naloga.

Na Inštitutu Geodetskega zavoda SRS smo se v okviru raziskovalne naloge z naslovom "Metode digitalne korekcije rastriranih slik" spoprijeli s tehnologijo izdelave digitalnega ortofota. Naloga, da izdelamo osnovno tehnologijo digitalnega postopka izdelave ortofoto posnetkov je za nas velik izziv. Ne le, da smo se spoprijeli s popolnoma sodobno tehnologijo temveč smo se iz analitične fotogrametrije preselili v novo obdobje digitalne fotogrametrije, ki je v bistvu še fotogrametrija prihodnosti. Tako skušamo, čeprav morda z navidez prav majhnim delčkom, dohiteti razvoj v fotogrametriji v razvitem svetu. V tem prispevku smo opisali le matematične osnove izdelave digitalnega ortofota.

#### Literatura:

- Bähr, H.P.: "Digitale Bild-verarbeitung". Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1985
- Bähr, H.P.: "Das digitale Orthophoto-basis fuhr neue Möglichkeiten rechnergestützter Kartographie". Kartographische Nachrichten, 4/87
- Kraus, K.: "Photogrammetrie", Band 1. Dummler Verlag, Bonn 1982
- Rosenfeld, A.: "Picture Processing by Computer". Academic Press, London 1969
- Wrobel, B.: "Einige überlegungen über die teoretischen Grundlagen, der Digitalen Photogrammetrie". Bildmessung un Luftbildwesen, 4/87

### kvantifikacija



Slika 1