

# IZDELAVA DIGITALNEGA MODELA POVRŠJA IN ORTOPODOB IZ STEREO POSNETKOV IKONOS, ZAJETIH V ISTEM PRELETU

DIGITAL SURFACE MODEL AND ORTHO-IMAGES GENERATION FROM IKONOS IN-TRACK STEREO IMAGES

*Aleš Marsetič, Krištof Oštir*

UDK: 528.7:528.9

## IZVLEČEK

V članku je opisana izdelava digitalnega model površja (DMP) in ortopodob iz pankromatskega in multispektralnega stereopara posnetkov Ikonos. Pri tem se ugotavlja primernost posnetkov za kartiranje višine vegetacije večjega območja in uporabnost rezultatov za namene različnih prostorskih analiz. Koraki obdelave so vključevali izravnavo posnetkov s snopi z različnimi razporeditvami in številom oslonilnih točk, izdelavo digitalnega modela površja in ortopodob ter vrednotenje rezultatov. DMP je bil zaradi boljše ločljivosti posnetkov izdelan samo iz pankromatskega stereopara. Rezultati so bili vrednoteni s primerjavo z zelo natančnim modelom površja, izdelanim iz lidarskih podatkov. Analize so pokazale, da je povprečna višinska razlika med modeloma 8,2 metra, pri čemer je samo tretjina razlik manjših od 3 metrov. Rezultati so bili slabši na strmih pobočjih z visoko vegetacijo in območjih s sencami, ki so jih povzročili hribovi in oblaki. Po drugi strani so bili rezultati vrednotenja ortopodob z ortofoto posnetki veliko boljši, saj so RMSE (koren povprečne kvadratne napake) položaja znašali pod 1,5 piksela za oba uporabljena stereopara.

## KLJUČNE BESEDE

**stereo satelitski posnetki Ikonos, digitalni model površja, stereoskopija, ortopodobe, vrednotenje**

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

## ABSTRACT

The paper describes the generation of a digital surface model (DSM) and orthoimages from panchromatic and multispectral Ikonos stereopairs. It assesses the suitability of the images for vegetation height mapping of a large area and the applicability of the results for various spatial analyses. The processing steps involved stereo bundle adjustment with various sets of ground control points, digital surface model extraction, orthoimage generation and evaluation of the results. Although both multispectral and panchromatic stereoimages were processed, the DSM was generated only for the panchromatic stereopair due to its higher resolution. For evaluation purposes it was compared to very accurate lidar elevation data. The analysis revealed an overall vertical difference between the models of 8.2 m, where only one third of the differences are below 3 m. The results were worse in steep areas with high vegetation and regions with shadows caused by hills or clouds. Better results can be obtained with previous manual or automatic editing of the automatically extracted model. On the other side, orthoimages that were also produced are very accurate - the evaluation showed results with horizontal RMSE errors below 1.5 pixels for both stereopairs when compared to aerial orthophotos.

## KEY WORDS

**Ikonos stereo satellite images, digital surface model, stereoscopy, ortho-images, evaluation**

## 1 UVOD

Visokoločljive satelitske podobe postajajo zaradi visoke spektralne in prostorske ločljivosti, velikosti posnetkov in možnosti za hitro ponovno snemanje istega območja vse bolj uporabljen vir podatkov za topografsko in tematsko kartiranje. V zadnjih letih je bilo v orbito izstreljenih veliko visokoločljivih satelitov, ki poskušajo naslediti zelo uspešna in kljub že prekoračeni načrtovani življenjski dobi še vedno operativna satelita QuickBird in Ikonos, za katera je mogoče dobiti osnovne podatke na spletnih straneh podjetij DigitalGlobe in GeoEye (<http://www.digitalglobe.com>; <http://www.geoeye.com>). Satelita imata možnost snemanja stereoparov, iz katerih je mogoče izdelati digitalne modele površja (DMP).

V zadnjem desetletju je bilo veliko raziskav namenjenih izdelavi digitalnih modelov površja iz visokoločljivih letalskih in satelitskih senzorjev. Pred in po tem, ko so bile podobe Ikonos dostopne, je bilo preizkušenih že veliko metod za pridobitev višinskih podatkov in izdelavo modelov površja. Prvi pridobljeni rezultati so kazali na višinsko natančnost 2 m, vendar le z uporabo fotogrametričnih procedur (Li, 1998). Obsežne poskuse za izdelavo DMP iz stereoparov je zadnja leta izvajal Toutin (2004a), ki je za celoten DMP, izdelan iz zimskih posnetkov Ikonos, pridobil pogrešek LE68<sup>1</sup> (ang. linear error 68) 6,4 m z 68-odstotno stopnjo zaupanja. Rezultati niso bili povsem zadovoljivi, saj je bila natančnost stereoizravnave od 2 do 3 m, poleg tega je imel stereopar razmerje B/H enako 1 in velikost piksla 1 m.

V članku bomo predstavili postopek za izdelavo ortopodob in digitalnih modelov površja iz stereopara Ikonos posnetkov s komercialno dostopnimi orodji v programu ERDAS Imagine in njegovem modulu Leica Photogrammetry Suite. Osnovni cilj obdelave je bil pridobiti informacijo o višini vegetacije za gozdnogospodarski enoti Menišija in Slivnica, ki obsegata območje, veliko približno 87 km<sup>2</sup>. Pokazali bomo, da je mogoče enostavno izdelati DMP in ortopodobe velikega območja z uporabo visokoločljivih satelitskih posnetkov z majhnim številom oslonilnih točk. Pri tem smo testirali uporabnost posnetkov in metod za izdelavo končnih rezultatov, ki so bili vrednoteni z zelo natančnimi referenčnimi podatki o površju. Poleg vrednotenja postopkov obdelave in rezultatov bomo v članku poskušali oceniti zanesljivost geometričnega modela in metode slikovne korelacije, ki ju vsebuje uporabljen program. V ta namen pridobljen DMP pred vrednotenjem ne bo dodatno popravljen.

## 2 STEREOPOSNETKI IKONOS

Satelit Ikonos je bil izstreljen 24. septembra 1999 in je znan kot prvi komercialni satelit s prostorsko ločljivostjo, boljše od metra. Prostorska ločljivost njegovega pankromatskega senzorja je 1 m (0,82 m v nadirju), večspektralnega pa 4 m. V nadirnem položaju ima Ikonos pas snemanja širine 11,3 km, deluje z 11-bitno radiometrično ločljivostjo in lahko snema pod koti do 60 stopinj v vse smeri. Zmožnost snemanja pod kotom je zelo pomembna pri zmanjševanju časa ponovnega snemanja istega območja in izdelavi stereoparov iz sosednjih tirnic (ang. across-track) ali iz iste tirnice (ang. in-track). Stereopari, pridobljeni iz iste tirnice, imajo razmerje med bazo in višino

<sup>1</sup> LE68 se uporablja za opis vertikalnega pogreška, povezanega z 68 % DMR-ja glede na uporabljene 3D-referenčne točke. Če je LE68 na primer 6,4 m, potem ima 68 % DMR-ja pogrešek manjši od 6,4 m.

leta (B/H) 1, kar je idealno za stereoskopsko fotogrametrično procesiranje. Poleg omenjene značilnosti imajo »in-track« stereopari prednost časovne konsistence, kar pomeni, da so razlike v pokrivnosti površja med zaporednima posnetkoma stereopara zanemarljivo majhne. Predstavljene značilnosti so bistvene za izdelavo digitalnega modela površja (DMP) iz satelitskih stereopodob.

Uporabljeni stereopar Ikonos je bil pridobljen v okviru projekta CRP »Metodologija izdelave podrobne digitalne karte višine in gostote vegetacijskega pokrova« (Janža et al., 2008), posvečenega izdelavi karte višine in gostote gozdnih površin z uporabo različnih podatkov daljinskega zaznavanja. Posneto območje, prikazano na sliki 1, se nahaja v južni osrednji Sloveniji blizu Cerknice in vključuje tako gričevnato, večinoma gozdno območje kot mesto, vasi in reke. Izbrali smo ga zaradi velike raznolikosti drevesnih vrst in gozdnih struktur. Po najvišjem hribu v regiji smo ga poimenovali Slivnica.



Slika 1: Območje snemanja stereoparov Ikonos (vir: PK 250, avgust 2006, © Geodetska uprava Republike Slovenije).

Stereopar je bil naročen pozimi leta 2006 in snemanje je bilo načrtovano za april 2007, v sredini ravnega obdobja vegetacije (namen študije je bilo kartiranje vegetacije). Območje je bilo posneto 7. aprila v stereo načinu, s čimer smo dobili dve podobi istega območja, posneti iz različnih kotov. Velikost podob je bila 10 km krat 10 km s koti snemanja  $\pm 27^\circ$ , kar omogoča razmerje

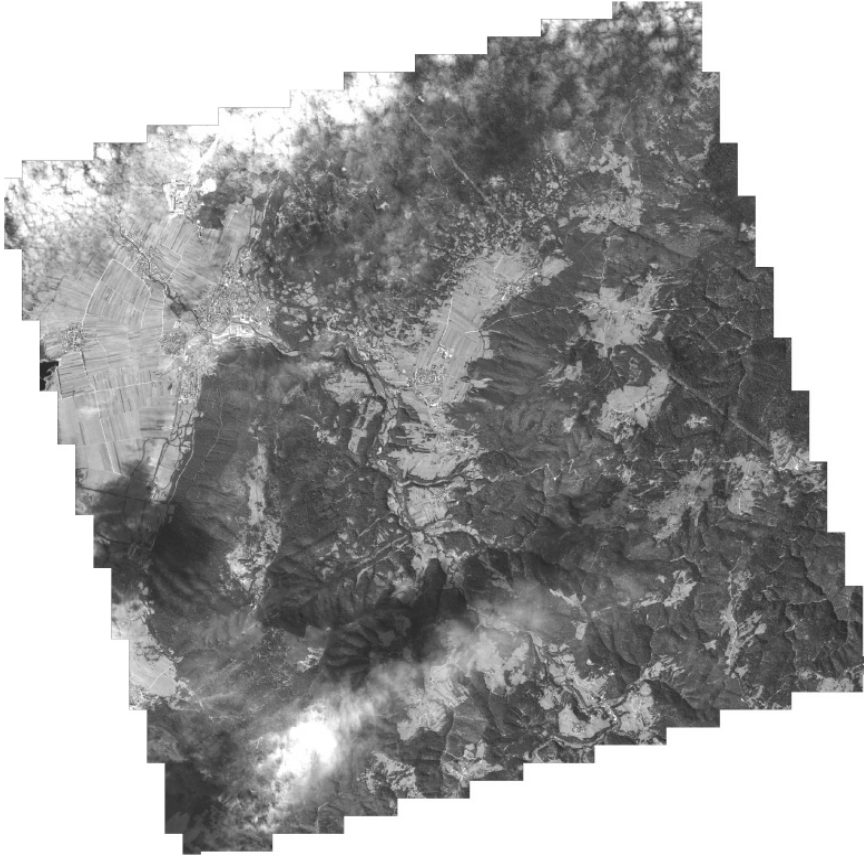
B/H=1. Podobi sta imeli tako pankromatskega kot večspektralne kanale. Lastnosti podob so povzete v spodnji preglednici 1.

	Večspektralne podobe	Pankromatske podobe
<i>Izdelal</i>		Space Imaging
<i>Ime projekta</i>		Slivnica
<i>Vrsta datoteke</i>		TIFF
<i>Kanali</i>	zelen, moder, rdeč, infrardeč	pankromatski
<i>Bit/piksel</i>		11
<i>Število kanalov</i>	4 x 1	1
<i>Stereo položaj</i>		leva, desna
<i>Datum</i>		WGS84
<i>Velikost piksla X</i>	4 m	1 m
<i>Velikost piksla Y</i>	4 m	1 m
<i>Uporabljena merska enota</i>		meter
<i>Stolpci</i>	3083 pikslov	12332 pikslov
<i>Vrstice</i>	3083 pikslov	12332 pikslov

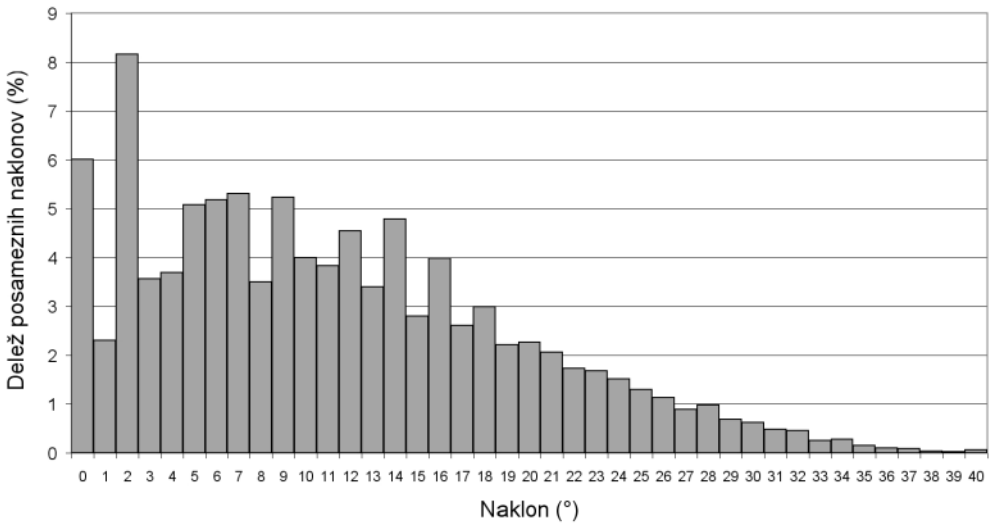
Preglednica 1: Lastnosti posnetih podob Ikonos za območje Slivnice.

Posnetka sta vsebovala približno 20 % oblakov, kar je močno poslabšalo končne rezultate, tako na območju oblakov kot tudi v njihovih sencah. Leva surova podoba pankromatskega stereopara je predstavljena na sliki 2. Jasno so vidni oblaki na zgornjem in spodnjem delu posnetka.

Za potrebe triangulacije, ortorektifikacije in ocene natančnosti so bili med projektom pridobljeni še dodatni prostorski podatki. Ker ni bilo na voljo natančnih podatkov (npr. meritev GPS), smo za določanje koordinat oslonilnih in kontrolnih točk uporabili digitalni model višin (DMV12,5) in ortofoto DOF5. Zaradi nominalne natančnosti ortofota (približno  $\pm 1$  m) in slučajnih pogreškov merjenja je bila ocenjena horizontalna natančnost določenih točk boljša od 1,5 m. Za določanje višinske koordinate točk in ortorektifikacijo je bil uporabljen digitalni model višin z velikostjo piksla 12,5 m (DMV12,5) in povprečno višinsko natančnostjo 3,2 m. Za lažje razumevanje razgibanosti terena in poznejše vrednotenje izdelanega modela površja je bil DMV12,5 uporabljen tudi pri študiji razgibanosti površja, to je izračunu usmerjenosti površja in naklonov za uporabno (brez oblakov) testno območje. Slika 3 prikazuje histogram naklonov digitalnega modela višin. Nakloni obsegajo vrednosti med  $0^\circ$  do  $40^\circ$ , kjer najvišje vrednosti predstavlja skoraj izključno hrib Slivnica. Povprečni naklon  $11,3^\circ$  nakazuje precej razgiban relief. Polovica območja ima naklon pod  $10^\circ$ , razredi od  $0^\circ$  do  $31^\circ$  pa predstavljajo 99 % vseh naklonov.

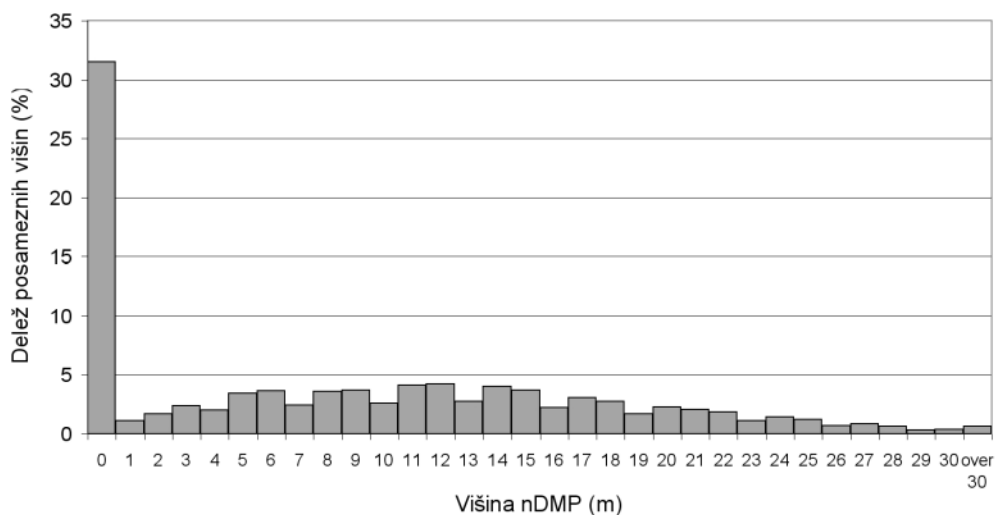


Slika 2: Leva pankromatska podoba posnetka Ikonos.



Slika 3: Histogram naklonov z razredi širine 1°, dobljen iz digitalnega modela višin.

Za oceno natančnosti je bil uporabljen zelo natančen digitalni model višin, izdelan iz lidarskih podatkov. Tudi lidarski podatki so bili pridobljeni v okviru prej omenjenega projekta. Testno območje je bilo skenirano v začetku maja 2007, rezultat pa je bil oblak točk z gostoto, višje od 5 točk na kvadratni meter. Absolutna horizontalna in vertikalna natančnost podatkov je bila boljša od 0,1 m. Iz surovih podatkov sta bila izdelana dva produkta: digitalni model reliefa (model gola površja oziroma »bare Earth model«) in normaliziran digitalni model površja (nDMP). nDMP si lahko predstavljamo kot razliko med digitalnim modelom površja in modelom gola površja. Višine v modelu so enake višinam objektov (stavbe, drevesa, itd.) nad Zemljinim površjem. Iz modela nDMP lahko določimo višino vegetacije in umetno narejenih objektov, recimo z uporabo histograma (slika 4). Pridobljen nDMP ima povprečno višino 9 m in predstavlja večinoma gozdno vegetacijo.



Slika 4: Histogram nDMP modela reliefa, izdelanega iz podatkov laserskega skeniranja z razredi širine 1 m.

Ker sta bila lidarski DMV in nDMP izdelana na relativno pozni stopnji projekta, nista bila uporabljena pri izdelavi DMP in ortopodob iz posnetkov Ikonos.

### 3 IZDELAVA MODELA POVRŠJA IN ORTOPODOB

Izdelava ortopodob in DMP je bila opravljena v programu Leica Photogrammetry Suite, ki je del programa za daljinsko zaznavanje Erdas Imagine. Teorija procesiranja satelitskih podob je obširno predstavljena v Marsetič (2005) in Marsetič et al. (2007) in ne bo podrobno opisana v tem članku. Koraki izdelave DMP in ortopodob iz pankromatskih in večspektralnih podob z rezultati in ocenami pa so podrobneje opisani v naslednjih razdelkih.

#### 3.1 Določanje oslonilnih točk in rezultati blokovne izravnave

Na vsakem od obeh stereoparov je bilo izbranih 25 oslonilnih točk (OT) in vsaki točki so bile določene planimetrične koordinate v državnem koordinatnem sistemu iz DOF5, nadmorska višina

iz DMV 12,5 in slikovne koordinate. Točke so bile enakomerno razporejene po celotnih podobah (večinoma na križiščih cest), tako da so bile na najnižjih in najvišjih višinah. Tako se lahko izognemo ekstrapolaciji v horizontalni in vertikalni smeri (Toutin, 2004a). Ocenjena natančnost določitve točk je bila med enim in dvema piksloma (pogrešek vira in ročnega merjenja točk).

Blokovna izravnava oziroma triangulacija je sestavljena iz določanja notranje in zunanje orientacije. Notranja orientacija poda notranjo geometrijo senzorja, medtem ko parametri zunanje orientacije opredelijo položaj in orientacijo senzorja v času zajema posnetkov. Notranja geometrija Ikonosovega senzorja je zelo stabilna in jo lahko privzamemo kot konstantno skozi celoten zajem posnetka. Nasprotno pa je zunanja orientacija posnete podobe precej zapletena. Za pospešitev in olajšanje procesiranja imajo surove podobe priložene datoteke z racionalnimi polinomskimi koeficienti (RPC), v katerih je shranjena informacija o približnem položaju in orientaciji podobe. Koeficienti se pridobijo z modelom racionalnih funkcij (ang. rational function model), ki je nadomestek oziroma numerična aproksimacija fizičnega modela (ang. physical model) in je obširno predstavljen v Tao et al. (2001). Študije so pokazale, da lahko model racionalnih funkcij doseže enako natančnost kot popoln fizični model kamere (Grodecki et al., 2003), ki rigorozno matematično opiše odnos med koordinatnim sistemom kamere in fizičnega okolja (po navadi z modificiranimi kolinearnimi enačbami), ki se skupaj z vsemi vhodnimi in izhodnimi parametri uporabi za izvrednotenje. Fizični model je lahko splošen ali vezan na določen snemalni sistem. Program uporabi RPC-koeficiente ter dodatne oslonilne in vezne točke za izračun zunanje orientacije posnetkov. Oslonilne in vezne točke še dodatno povežejo stereopar in tako izboljšajo orientacijo.

Po mnenju Erdasa (2008a) je za natančno določitev parametrov zunanje orientacije dovolj samo nekaj točk. Ob upoštevanju tega je bil uporabljen model testiran z več blokovnimi izravnavami, ki so se razlikovale glede na različne konfiguracije oslonilnih in kontrolnih točk (KT). Nekateri najbolj značilni testi so prikazani v spodnjih tabelah. Za vsakega je bilo najprej izbrano število oslonilnih točk, ostanek pa se je uporabil kot kontrolne točke za oceno natančnosti. Znotraj vsakega testa se je konfiguracija oslonilnih in kontrolnih točk večkrat menjala (npr. oslonilna točka je postala kontrolna in nasprotno), rezultat testa pa je bil dobljen z izračunom povprečja rezultatov vseh konfiguracij

Test:	OT RMSE [m]			KT RMSE [m]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
#1: 25 OT	1,51	1,84	1,63	/	/	/
#2: 20 OT, 5 KT	1,62	1,93	1,67	1,09	1,41	1,40
#3: 15 OT, 10 KT	1,62	1,72	1,59	1,51	2,19	1,79
#4: 10 OT, 15 KT	0,60	1,40	1,20	2,02	2,50	2,07
#5: 3 OT, 22 KT	0,17	0,17	0,10	3,36	3,98	3,79

Preglednica 2: Rezultati blokovne izravnave za pankromatski stereopar.

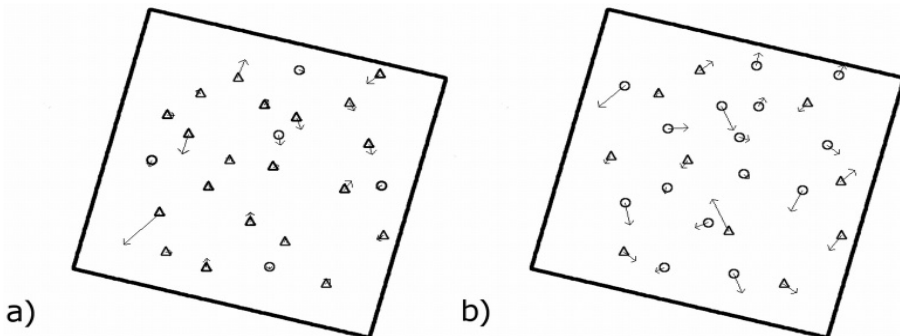
Preglednica 2 prikazuje koren povprečne kvadratne napake (ang. root mean square error, RMSE) oslonilnih in kontrolnih točk za pankromatski stereopar. Če ne upoštevamo testa #1 zaradi manjkajoče kontrole, je bil najboljši rezultat dosežen z uporabo 20 enakomerno razporejenih oslonilnih točk, kar je bilo pričakovano, saj več OT načeloma pripomore k boljšim rezultatom. RMSE kontrolnih točk je za vse koordinate najmanjši, z manjšanjem števila oslonilnih točk pa počasi narašča. Najboljši rezultati so bili dobljeni v smeri X.

Preglednica 3 prikazuje rezultate za večspektralni stereopar. Tu smo dobili nekoliko nepričakovane rezultate, saj so bili najboljši tisti, dobljeni z 10 oslonilnimi točkami. Razlika v primerjavi z rešitvami, ki uporabljajo 15 in 20 OT, je sicer zelo majhna in so rezultati v smeri X celo boljši. Razmerja bi se verjetno spremenila z uporabo več konfiguracij ali kontrolnih točk. Kljub temu boljše rešitve z manjšim številom OT niso povsem nemogoče, kar dokazujejo tudi nekateri avtorji (Toutin, 2004a; Dowman, 2003).

Test:	OT RMSE [m]			KT RMSE [m]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
#1: 25 OT	1,89	2,32	3,15	/	/	/
#2: 20 OT, 5 KT	1,92	2,19	2,94	1,93	2,79	4,30
#3: 15 OT, 10 KT	1,73	2,18	3,09	2,43	2,65	3,95
#4: 10 OT, 15 KT	1,51	2,72	3,14	2,67	2,19	3,79
#5: 3 OT, 22 KT	0,09	0,20	0,15	3,93	6,95	6,42

Preglednica 3: Rezultati blokovne izravnave za večspektralni stereopar.

Na obeh stereoparih je bil model zelo uspešen, saj je dobljeni RMSE pankromatskega para (približno 1,4 m) in večspektralnega para (približno 3 m) predvsem posledica vhodnih pogreškov določanja koordinat oslonilnih točk. Nekateri avtorji so z uporabo drugačnih algoritmov dobili RMSE za pankromatske posnetke pod 1 m, vendar so delali z večjim blokom posnetkov in uporabljali zelo natančne oslonilne točke (Fraser et al., 2006; Grodecki et al., 2003). Slučajni vektorji pogreškov točk na sliki 5 kažejo na obstoj le slučajnih pogreškov brez sistematičnega vpliva.



Slika 5: Dobljeni horizontalni vektorji pogreškov za pankromatski a) in večspektralni b) stereopar, kjer so OT predstavljene s trikotniki in KT s krogi.



### 3.2 Izdelava DMP in vrednotenje rezultatov

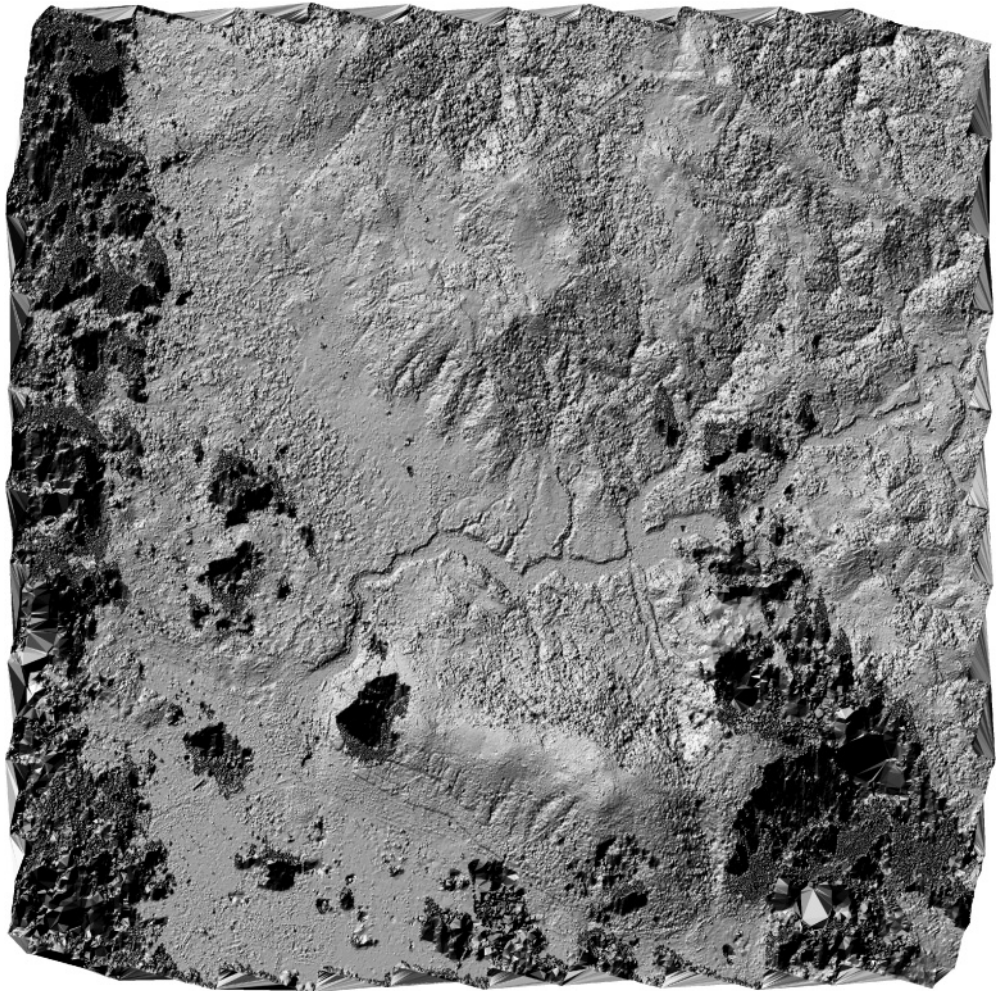
S pridobljenimi parametri zunanje orientacije za vse posnetke se lahko začne izdelava digitalnega modela površja in ortopodob. Postopek izdelave digitalnega modela površja, ki predstavlja zunanjo ovojnico površja oziroma vrhove vegetacije, stavb ali terena, je skoraj popolnoma samodejen z uporabo slikovne korelacije. Slikovna korelacija poskuša identificirati karakteristične točke, ki predstavljajo isto površinsko značilnost na vsaj dveh prekrivajočih se podobah. Uravnava se s strateškimi parametri, ki močno vplivajo na rezultate procesa in skupaj s parametri zunanje orientacije določajo kakovost in natančnost rezultatov. Obstajajo trije strateški parametri: velikost iskalnega okna, velikost korelacijskega okna (obe izraženi v pikslih) in prag koeficienta križne korelacije. Iskalno okno je večje pravokotno območje pikslav na prvi podobi, kjer se izračunava korelacija s korelacijskim oknom iz druge podobe. Manjše korelacijsko okno pregleda iskalno okno v vseh mogočih kombinacijah korelacije in za vsak primer izračuna križni korelacijski koeficient. Po navadi izračun z največjim koeficientom pomeni, da območji v korelacijskem in iskalnem oknu predstavljata isto površinsko značilnost. Nato se koeficient primerja s predoločenim pragom, ki ga predstavlja parameter praga korelacijskega koeficienta. Če je izračunan koeficient večji od praga, je korelacija sprejeta. Strateški parametri pankromatskega stereopara, s katerimi smo dosegli najboljše rezultate in so bili uporabljeni v procesu samodejne ekstrakcije digitalnega modela površja, so navedeni v preglednici 4. Izbrani so bili na podlagi oblike površja in empiričnega preizkušanja. Velikost oken in prag predlaga že sam program glede na izbran tip terena, najboljše rezultate pa smo dobili z dodatnim testiranjem različnih vrednosti, ki običajno niso preveč odstopale od predlaganih.

<b>Iskalno okno [piksli]</b>	23 × 5
<b>Korelacijsko okno [piksli]</b>	5 × 5
<b>Prag korelacijskega koeficienta</b>	0,7

Preglednica 4: Strateški parametri slikovne korelacije.

Proces korelacije je najbolj pomemben del izdelave modela površja in precej vpliva na rezultate. Po določitvi istih značilnosti na obeh podobah program izračuna paralakse višin in točkam določi prostorske koordinate. Pridobljene koordinate točk se nato interpolirajo v pravilen raster.

Zaradi omejitev uporabljenega programa je ločljivost končnih modelov trikrat manjša od vhodne ločljivosti podob. Tako imajo v našem primeru dobljeni modeli površja iz pankromatskih posnetkov ločljivost 3 m, večspektralni pa 12 m. Zaradi slabše ločljivosti večspektralnih podob smo se v nadaljevanju študije ukvarjali samo z modeli površja, narejenimi iz pankromatskih posnetkov. Senčen model površja, narejen iz pankromatskih posnetkov, je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Senčen DMP z ločljivostjo 3 m, izdelan iz pankromatskih posnetkov.

Na senčenem reliefu so na zahodnem in jugovzhodnem delu dobro vidna neuspešno korelirana območja, kar je posledica oblakov in njihovih senc. Nekaj artefaktov je prisotnih tudi na strmem terenu, zlasti na pobočjih Slivnice. Dobri rezultati so bili dobljeni na ravninskih območjih in na območju rečne struge.

Pred primerjavo DMP z modelom površja, ki je bil rezultat obdelave laserskega skeniranja, je bila kakovost slikovne korelacije ocenjena glede na izračunane koeficiente. Glede na kakovost so bili koeficienti razvrščeni v pet kategorij. Preglednica 5 prikazuje odstotke posameznih kategorij za pankromatski stereopar. Odstotek sumljivih korelacij ustreza odstotku območja, prekritega z oblaki in sencami, kjer je slikovna korelacija po navadi neuspešna. Večina korelacij je dobrih, le 21,2 % pa je odličnih.

Kategorija	Odstotek [%]
<b>Odlično (1-0,85)</b>	21,2
<b>Dobro (0,85-0,70)</b>	56,8
<b>Zadovoljivo (0,70-0,50)</b>	0,0
<b>Izolirano</b>	0,0
<b>Sumljivo</b>	22,0

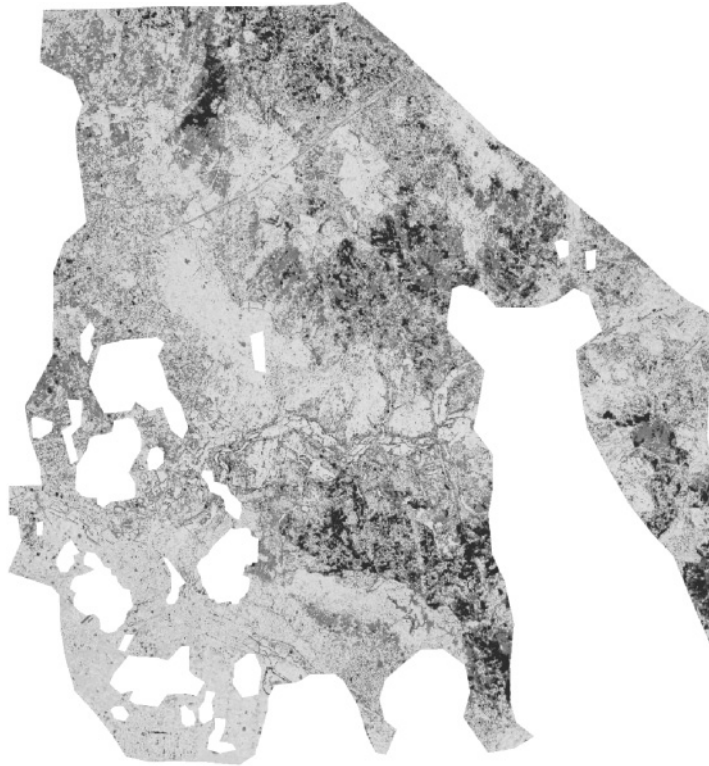
Preglednica 5: Odstotki kakovostnih kategorij za pankromatski stereopar.

Zaradi razmeroma visokega odstotka oblakov in senc v podobah smo le del testnega območja primerjali z natančnim lidarskim digitalnim modelom površja. Za oceno natančnosti je bilo tako uporabljeno območje brez oblakov, ki se prekriva z lidarskim modelom, kar znaša le 55 % celotne posnete površine. Lidarski model površja je bil izdelan v ločljivosti 0,5 m iz filtriranih točk in je bil naknadno prevzorčen na ločljivost 3 m za lažjo primerjavo z izdelanim Ikonos DMP. Za pristnejšo oceno natančnosti bi bila bolj smotna neposredna primerjava z lidarskimi točkami, vendar med procesiranjem niso bile na voljo.

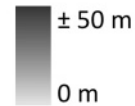
Slika 7 prikazuje izračunane višinske pogreške. Prvi rezultati kažejo, da povprečna višinska razlika med Ikonosovim in lidarskim modelom znaša približno 8,2 m, pri čemer je tretjina razlik manjših od 3 m. Skoraj vse vrednosti so na intervalu  $\pm 50$  m, mejne vrednosti pa predstavljajo zelo grobe pogreške oziroma neuspele korelacije. Rezultati niso povsem zadovoljivi, če jih primerjamo z rezultati blokovne izravnave in ob upoštevanju velikosti pikslov (1 m), dobre geometrije gledanja senzorja in časa snemanja. Podobne rezultate je za neugodne zimske posnetke dobil tudi Toutin (2004a) z uporabo fizičnega geometrijskega modela 3D CCRS (Canada Centre for Remote Sensing). Zaradi različnih ločljivosti primerjanih modelov in različnih trenutkov snemanja (lidarski podatki so bili posneti skoraj en mesec po snemanju podatkov Ikonosa) so dobljeni višinski pogreški večji, kot bi bili pri snemanju v enakem obdobju ali pri neposredni primerjavi Ikonos DMP s filtriranimi lidarskimi točkami.

Za analizo vzrokov večjih pogreškov smo dobljeni DMP primerjali z ortopodobami ter sloji naklonov in usmerjenosti terena, ki so bili predhodno narejeni iz modela višin DMV12,5. Ortopodobe se lahko uporabijo za identifikacijo senc in drugih predmetov, ki otežujejo slikovno korelacijo. Zaradi relativno nizke višine ( $50^\circ$ ) in južne lege Sonca ( $160^\circ$  azimut) so bile sence reliefa dolge ter usmerjene proti severu in severozahodu. Največji pogreški so bili prisotni na severnih in vzhodnih pobočjih. Po natančnem pregledu se je pokazalo, da so pobočja z večjimi pogreški prekrita s sencami in imajo zelo strme naklone. Nekaj grobih pogreškov je nastalo tudi zaradi stavb in območij z naglimi višinskimi preskoki (meje med različnimi razredi pokrovnosti, visoka drevesa itd.).

Kvantitativno oceno smo opravili glede na relief površja (naklon) in višino vegetacije. Sliki 8 in 9 prikazujeta statistične rezultate z linearno regresijo, ki je bila izračunana iz primerjave višin med izdelanim in lidarskim modelom površja. Prvi graf predstavlja primerjavo obeh modelov površja za vsak razred  $5^\circ$ . Pogrešek se povečuje skoraj povsem linearno skozi razrede, kar nakazuje na

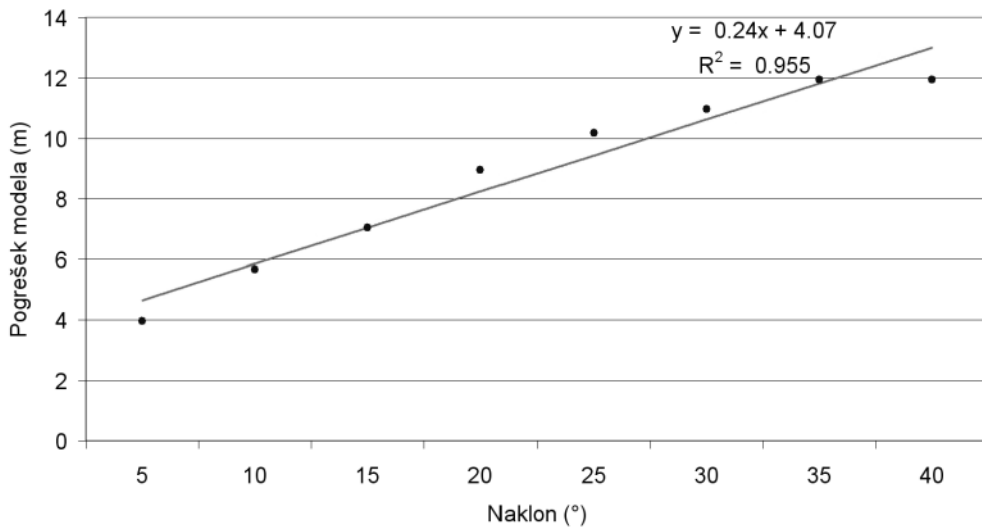


**Pogrešek**

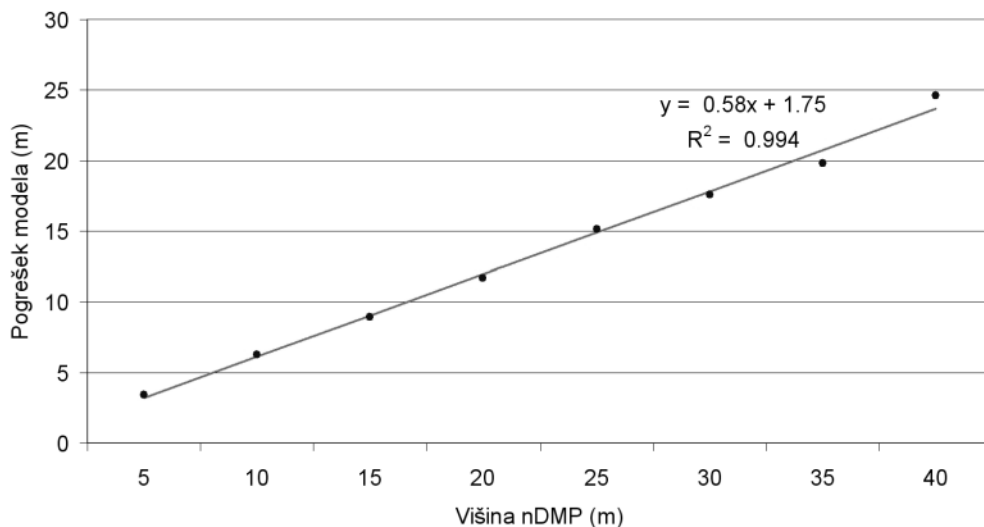


Slika 7: Razlika med Ikonosovim in lidarskim modelom površja.

zelo močno linearno korelacijo med pogreški višin in nakloni z  $R^2 = 0,955$ . Enako ugotovitev smo dobili pri primerjavi pogreškov višin z višinami nDMP (normaliziran DMP), ki smo jih dobili iz lidarskih podatkov. Pogreški višin in višine nDMP imajo še večjo linearno korelacijo kot prva primerjava z  $R^2 = 0,994$ . Rezultati kažejo, da imajo nakloni in višina vrhov vegetacije, stavb in drugih objektov velik vpliv na natančnost stereoskopsko izdelanega modela površja.



Slika 8: Graf statističnih rezultatov z linearno regresijo za razrede naklona 5°.

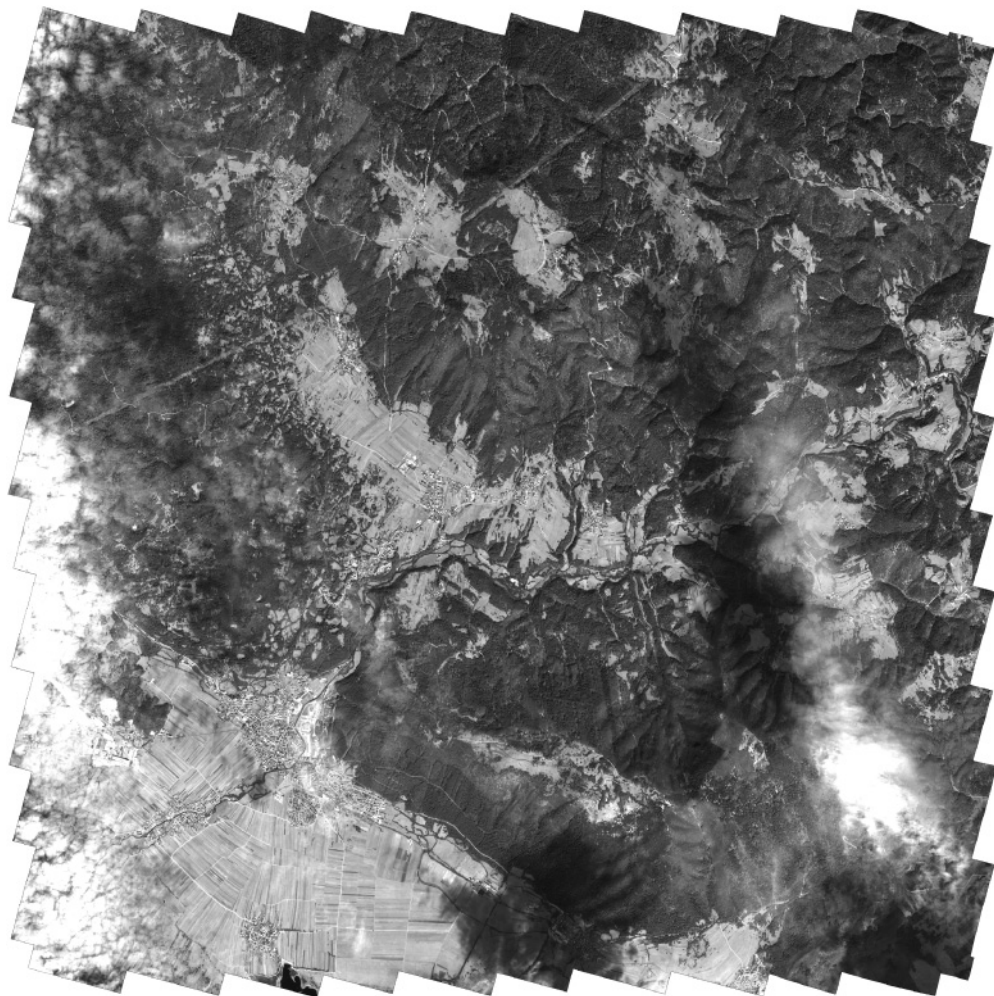


Slika 9: Graf statističnih rezultatov z linearno regresijo za razrede nDMP višin 5 m.

### 3.3 Izdelava ortopodob in vrednotenje rezultatov

Ortopodobe izdelamo z ortorektifikacijo surovih podob. Ortorektifikacija je proces zmanjšanja različnih geometričnih napak, ki jih vsebuje izvorna podoba, in izdelave geometrično zanesljivih podob v ortogonalni projekciji. Vsaka meritev, ki se opravi na ortorektificirani podobi, je ob upoštevanju merila praktično enaka meritvi, ki bi se opravila na zemeljski površini (Erdas, 2008b). Tako se lahko satelitske ortopodobe uporabljajo kot nadomestek letalskih ortofoto posnetkov za različne namene. Poleg surovih posnetkov potrebuje proces ortorektifikacije za vhodne

podatke tudi parametre orientacij in digitalni model reliefa, ki je zelo pomemben v hribovitih predelih. V našem primeru je bil uporabljen DMV z ločljivostjo 12,5 m. Ločljivost ortopodob (slika 10) je ostala enaka kot pri vhodnih podobah in njihova natančnost je bila ocenjena z uporabo digitalnih letalskih ortofoto posnetkov DOF5. Planimetrična natančnost v smeri X in Y, podana v RMSE, je znašala približno piksel za pankromatske (1,4 m) in tudi večspektralne podobe (4,2 m). Zlasti zaradi geometrije gledanja sensorja je natančnost običajno boljša v smeri X. Ker je bila ocena narejena ročno, rezultati vsebujejo tudi slučajne pogreške merjenja, ki dodatno poslabšajo natančnost.



Slika 10: Ortorektificirana pankromatska podoba.

V preglednici 6 so povzeti rezultati za pankromatske in večspektralne podobe. Prvi stolpec preglednice prikazuje vrsto posnetka, drugi kaže ocenjeno planimetrično natančnost (RMSE), tretji in četrti stolpec pa predstavljata povprečja absolutnih odstopanj v smereh X in Y.

	RMSE	Odstop.	Odstop.
Podoba	(XY)	abs(X)	abs(Y)
	[m]	[m]	[m]
PAN	1,43	0,66	0,96
MS	4,18	1,74	3,01

Preglednica 6: Natančnost izdelanih ortopodob Ikonos.

#### 4 SKLEPNE UGOTOVITVE

Iz dveh stereoparov podob Ikonos hribovitega območja Slivnice severno od Cerkniskega jezera smo izdelali digitalni model površja in ortopodobe. Natančnost rezultatov je bila ocenjena z uporabo ortofoto posnetkov iz leta 2006 in modela površja, narejenega iz lidarskih podatkov, posnetih skoraj mesec po snemanju stereoparov. Ortopodobe kažejo dobro položajno natančnost, ki znaša pod 1,5 piksla. Po drugi strani pa rezultati digitalnega modela površja, narejenega iz pankromatskega stereopara, za večino aplikacij niso uporabni. Povprečna razlika med lidarskim modelom (referenčni podatki) in izdelanim modelom je približno 8 m, pri tem pa je tretjina razlik manjših od 3 m. Geometrični model je bil uspešen na ravninskih in neporaščenih predelih, na zelo strmih in senčnih območjih pa je skoraj neuporaben. Iz tega lahko sklepamo, da so glavni vzroki za slabšo kakovost izdelanega modela predvsem strm relief, poraščenost in sence. Naštete vzroke bi bilo mogoče vsaj delno odpraviti z boljšim algoritmom za slikovno korelacijo.

Če dobljene rezultate primerjamo z natančnostjo modelov površja, ki so bili izdelani iz drugih visokoločljivih senzorjev (recimo Toutin, 2004b), ugotovimo, da so si rezultati skoraj v vseh primerih zelo podobni. Čeprav omenjene študije obravnavajo enako tematiko in so si precej podobne, jih je zaradi različnih načinov snemanja in razmer med snemanjem težko neposredno primerjati. Kljub temu rezultati te študije kažejo na prisotnost velikega števila grobih pogreškov v modelu, ki so posledica slabe slikovne korelacije. Večje napake v višinah in grobi pogreški so tudi posledica različnih ločljivosti primerjanih modelov površja in časovne inkonsistence zajema podatkovnih nizov. Poleg tega je bil Ikonosov model površja ocenjen brez predhodnih izboljšav, ročnih korekcij ali stereo merjenja, s katerimi dobimo veliko boljše rezultate.

S stereoposnetki Ikonos je mogoče preprosto in z majhnim številom OT izdelati visokoločljive ortopodobe in DMP velikega območja. Izdelane ortopodobe se lahko uporabljajo namesto ortofoto posnetkov, ko ne potrebujemo barvnih posnetkov ali zadostuje ločljivost 4 m. Za potrebe kartiranja višine vegetacije pa dobljeni DMP ni dovolj dober, pogojno bi bil uporaben le na ravninskih območjih.

#### ZAHVALA

Članek je rezultat študije, ki je bila financirana v okviru raziskovalnega projekta CRP M1-0137 »Metodologija izdelave podrobne digitalne karte višine in gostote vegetacijskega pokrova«. Sredstva za njegovo izvajanje sta zagotovila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije.

## Literatura in viri:

- Dowman, I. J., Michalis, P. (2003). *Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors*. Hannover, *Proceedings of ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003*. <http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/dowman.pdf> (15. 6. 2010).
- Fraser, C. S., Dial, G., Grodecki, J. (2006). *Sensor orientation via RPCs*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60(3), 182–194.
- Grodecki, J., Dial, G. (2003). *Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1), 59–68.
- ErDas (2008a). *IKONOS Sensor Model Support*. Norcross: ERDAS, Inc.
- ErDas (2008b). *LPS Project Manager User's Guide*. Norcross: ERDAS, Inc.
- Li, R. (1998). *Potential of high-resolution satellite imagery for national mapping products*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64(12), 1165–1170.
- Janža, M., Kobler, A., Stojanova, D., Džeroski, S., Marsetič, A., Oštir, K., Komac, M., Jemec, M., Gosar, A. (2008). *Metodologija izdelave podrobne digitalne karte višine in gostote vegetacijskega pokrova : končno poročilo raziskovalnega projekta M1-0137, v okviru Ciljnega raziskovalnega programa »Znanje in varnost in mir 2006-2010«*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- Marsetič, A. (2005). *Izdelava digitalnega modela višin in ortopodob iz satelitskih posnetkov SPOT*. *Diplomska naloga*. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.
- Marsetič, A., Oštir, K. (2007). *Uporaba satelitskih posnetkov SPOT za izdelavo ortopodob*. *Geodetski vestnik*, 51(1), 69–84.
- Spletne strani podjetja DigitalGlobe. <http://www.digitalglobe.com> (10. 6. 2010).
- Spletne strani podjetja GeoEye. <http://www.geoeye.com> (10. 6. 2010).
- Tao, C. V., Hu, Y. (2001). *A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(12), 1347–1357.
- Toutin, T. (2004a). *DTM generation from Ikonos in-track stereo images using a 3D physical model*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(6), 695–702.
- Toutin, T. (2004b). *Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42 (10), 2121–2129.

**Prispelo v objavo: 29. oktober 2009**

**Sprejeto: 18. junij 2010**

**Aleš Marsetič, univ. dipl. inž. geod.**

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana  
E-pošta: ales.marsetic@zrc-sazu.si

**izr. prof. dr. Krištof Oštir, univ. dipl. fiz.**

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana  
E-pošta: kristof@zrc-sazu.si