

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica doktorske disertacije.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is an original PDF file of doctoral thesis.

When citing, please refer as follows:

Marsetič, A. 2015. Samodejna ortorektifikacija visokoločljivih optičnih satelitskih posnetkov. = Automatic orthorectification of high-resolution optical satellite images. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentorica Kosmatin Fras, M., somentor Oštir, K.)

<http://drugg.fgg.uni-lj.si>

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
GRAJENO OKOLJE

Kandidat:

ALEŠ MARSETIČ

**SAMODEJNA ORTOREKTIFIKACIJA VISOKOLOČLJIVIH
OPTIČNIH SATELITSKIH POSNETKOV**

Doktorska disertacija štev.: 28/GO

**AUTOMATIC ORTHORECTIFICATION OF
HIGH-RESOLUTION OPTICAL SATELLITE IMAGES**

Doctoral thesis No.: 28/GO

Komisija za doktorski študij je na 20. seji, 21. septembra 2011, po pooblastilu 30. seje Senata Univerze v Ljubljani z dne 20. januarja 2009, dala soglasje k temi doktorske disertacije.

Za mentorico je bila imenovana doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, za somentorja pa izr. prof. dr. Krištof Oštir.

Ljubljana, 26. oktober 2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Mojca Kosmatin Fras,
- doc. dr. Dušan Petrovič,
- izr. prof. dr. Krištof Oštir, UL FGG in ZRC SAZU,
- znan. sodel. dr. Tatjana Veljanovski, ZRC SAZU,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 20. seji 20. aprila 2011.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Dušan Petrovič,
- znan. sodel. dr. Žiga Kokalj, ZRC SAZU,
- doc. dr. David Hladnik, UL BF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 21. seji 1. julija 2015.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, mentorica,
- izr. prof. dr. Krištof Oštir, UL FGG in ZRC SAZU,
- doc. dr. Dušan Petrovič,
- znan. sodel. dr. Žiga Kokalj, ZRC SAZU,
- doc. dr. David Hladnik, UL BF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 22. seji, 23. septembra 2015.

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Aleš Marsetič izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom "Samodejna ortorektifikacija visokoločljivih optičnih satelitskih posnetkov".

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 26. oktober 2015

Aleš Marsetič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7(043)
Avtor:	Aleš Marsetič, univ. dipl. inž. geod.
Mentorica:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	izr. prof. dr. Krištof Oštir
Naslov:	Samodejna ortorektifikacija visokoločljivih optičnih satelitskih posnetkov
Tip dokumenta:	Doktorska disertacija
Obseg in oprema:	136 str., 19 pregl., 30 sl., 75 en., 3 pril.
Ključne besede:	samodejna ortorektifikacija, optični satelitski posnetki, geometrični model, RANSAC, robustna ocena

Izvleček

V doktorski disertaciji smo razvili popolnoma samodejen postopek za ortorektifikacijo optičnih satelitskih posnetkov, brez posredovanja operaterja med obdelavo. Ortorektificiran posnetek je v državnem koordinatnem sistemu in predstavlja primerno podlago za prostorske analize. Izdelan izviren postopek povezuje več različnih metod v enoten in robusten sistem za samodejno izdelavo ortoposnetkov. Doktorska disertacija opisuje celoten postopek samodejne ortorektifikacije, ki ga sestavljajo štirje osnovni moduli: modul za branje in pripravo metapodatkov, modul za samodejno določanje oslonilnih točk, modul za izračun parametrov geometričnega modela in modul za izvedbo ortorektifikacije. Poleg modulov so predstavljeni tudi poskusi s posnetki RapidEye in WorldView-2. Opravljeni poskusi so omogočili ovrednotenje delovanja samodejnega postopka določanja točk, geometričnega modela, izločanja grobih napak in oceno položajne točnosti ortoposnetkov. Rezultati testov kažejo, da lahko samodejni postopek izdelava ortoposnetke s položajno točnostjo okrog dveh pikslov ali manj, tudi če je med samodejno določenimi oslonilnimi točkami prisotnih več grobih napak.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTAL INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.7(043)
Author:	Aleš Marsetič, univ. grad. in geod. eng.
Supervisor:	assist. prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Co-supervisor:	assoc. prof. Krištof Oštir, Ph.D.
Title:	Automatic orthorectification of high-resolution optical satellite images
Document type:	Doctoral Dissertation
Notes:	136 p., 19 tab., 30 fig., 75 eq., 3 app.
Keywords:	automatic orthorectification, optical satellite images, geometric model, RANSAC, robust estimation

Abstract

In the doctoral dissertation we have developed a fully automated procedure for orthorectification of optical satellite images, without any manual intervention during the processing. The resulting orthorectified image is in the national coordinate system and constitutes a suitable source for spatial analyses. The original procedure connects several different methods into a single, robust system for automatic generation of orthoimages. The doctoral dissertation describes the whole automatic orthorectification process, which comprises four basic modules: a module for extracting and preparing the metadata, a module for automatic extraction of ground control points, a module for calculation of parameters of the geometric model, and a module for orthorectification. Experiments and results with RapidEye and WorldView-2 images are also presented. The experiments evaluate the procedure for automatic extraction of points, the geometric model, the elimination of gross errors, and the positional accuracy of the orthoimages. The results indicate that the automated procedure produces orthoimages with a positional accuracy of about two pixels or better, even if several gross errors are present among the automatically extracted ground control points.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici, doc. dr. Mojci Kosmatin Fras, za vse napotke, pomoč, usmerjanje in navdušenje pri nastajanju in izdelavi doktorske disertacije. Posebna zahvala gre somentorju, izr. prof. dr. Krištofu Oštirju, ki je glavni krivec, da sem se z daljinskim zaznavanjem podrobneje seznanil, ga vzljubil in se ga lotil v disertaciji.

Hvala ZRC-ju SAZU-ju in Centru odličnosti Vesolje-SI za vso podporo brez katere pričujoče delo ne bi ugledalo luči sveta.

Iskrena hvala vsem sodelavcem na Inštitutu za antropološke in prostorske študije za pomoč, nasvete, spodbudno delovno okolje in neprecenljiva družjenja. Posebna hvala cimrom, Perotu, Tatjani in Urški, zaradi katerih je vsako pot v službo pospremil nasmešek.

Hvala svoji družini za vzpodbudo, vsestransko podporo in svobodo.

Darija, hvala, ker si mi stala ob strani ter za ljubezen in potrpežljivost.

Zahvaljujem se še vsem prijateljem in znancem, ki so zavedno ali nezavedno prispevali k nastanku disertacije.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	VI
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	VII
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTAL INFORMATION AND ABSTRACT	VIII
ZAHVALA	IX
1 UVOD	1
1.1 Pregled obstoječih raziskav na področju samodejne ortorektifikacije	3
1.1.1 Geometrični model	3
1.1.2 Slikovna korelacija	4
1.1.3 Samodejno georeferenciranje.....	5
1.2 Cilji in raziskovalne hipoteze.....	6
1.2.1 Cilji	6
1.2.2 Raziskovalne hipoteze	7
1.3 Struktura doktorske disertacije.....	8
I TEORETIČNI DEL.....	10
2 IZHODIŠČA IN TEMELJNI POJMI	10
2.1 Geometrija zajema posnetkov glede na vrsto senzorja	10
2.2 Ravni obdelave posnetkov	11
2.3 Ortorektifikacija	12
2.4 Samodejna procesna veriga.....	13
2.5 Povzetek in zaključki poglavja 2.....	14
3 SAMODEJNO DOLOČANJE OSLONILNIH TOČK	16
3.1 Postopek samodejnega določanja oslonilnih točk	16
3.2 Povzetek in zaključki poglavja 3.....	21
4 GEOMETRIČNI MODELI SENZORJEV	22
4.1 Senzorji na satelitih za opazovanje Zemlje	23
4.1.1 Točkovni senzorji	23
4.1.2 Vrstični senzorji.....	23
4.1.3 Polnoslikovni senzorji.....	25
4.2 Popravki koordinat oslonilnih točk	26
4.2.1 Atmosferska refrakcija.....	27
4.2.2 Ukrivljenost Zemlje	29
4.3 Geometrični model vrstičnega senzorja	29
4.3.1 Izravnava po metodi najmanjših kvadratov	29
4.3.2 Funkcionalni model	31
4.3.2.1 Modeliranje zunanje orientacije	33
4.3.2.2 Linearizacija	35
4.3.2.3 Matrična oblika enačb popravkov	37
4.3.3 Stohastični model.....	38
4.3.4 Reševanje sistema linearnih enačb.....	39
4.3.5 Izločanje grobih napak.....	40
4.3.5.1 Algoritem RANSAC	40
4.3.5.2 Robustna ocena.....	42
4.4 Geometrični model polnoslikovnega senzorja	44

4.4.1 Funkcionalni model	44
4.4.1.1 Linearizacija	45
4.4.1.2 Matrična oblika enačb popravkov	46
4.4.2 Stohastični model	47
4.4.3 Reševanje sistema linearnih enačb in izločanje grobih napak	47
4.5 Povzetek in zaključki poglavja 4	47
5 ORTOREKTIFIKACIJA	49
5.1 Metode izdelave ortoposnetkov	49
5.1.1 Direktna metoda	49
5.1.1.1 Iterativna fotogrametrična metoda	50
5.1.1.2 Iterativna metoda sledenja žarku	51
5.1.2 Indirektna metoda	54
5.2 Postopek izdelave ortoposnetkov	55
5.3 Povzetek in zaključki poglavja 5	57
II PRAKTIČNI DEL	59
6 METODE DELA IN UPORABLJENI PODATKI	59
6.1 Metode dela	59
6.2 Podatki	61
6.2.1 RapidEye	62
6.2.2 WorldView-2	64
6.3 Povzetek in zaključki poglavja 6	67
7 SAMODEJEN POSTOPEK ORTOREKTIFIKACIJE	68
7.1 Modul za branje in pripravo metapodatkov	69
7.1.1 Branje metapodatkov	69
7.1.2 Priprava metapodatkov za vstop v geometrični model	70
7.2 Modul za samodejno določanje oslonilnih točk	74
7.3 Modul za izračun parametrov geometričnega modela	75
7.4 Modul za izvedbo ortorektifikacije	78
7.5 Povzetek in zaključki poglavja 7	79
8 REZULTATI EMPIRIČNIH POSKUSOV NA IZBRANIH POSNETKIH	81
8.1 Poskusi s posnetki RapidEye	81
8.1.1 Ocena točnosti samodejno določenih oslonilnih točk	81
8.1.2 Vpliv števila oslonilnih točk na izračun parametrov geometričnega modela	82
8.1.3 Metode za robustno oceno	84
8.1.4 Detekcija in izločanje grobih napak	86
8.1.5 Ocena položajne točnosti ortoposnetkov	89
8.1.6 Povzetek in zaključki poglavja 8.1	91
8.2 Poskusi s posnetki WorldView-2	91
8.2.1 Ocena točnosti samodejno določenih oslonilnih točk	91
8.2.2 Vpliv števila oslonilnih točk na izračun parametrov geometričnega modela	93
8.2.3 Metode za robustno oceno	95
8.2.4 Detekcija in izločanje grobih napak	96
8.2.5 Ocena položajne točnosti ortoposnetkov	100
8.2.6 Povzetek in zaključki poglavja 8.2	102
9 ZAKLJUČKI	103
10 POVZETEK	107

11 SUMMARY	109
VIRI	111
PRILOGE.....	118

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti atmosferske refrakcije na morski gladini (Noerdlinger, 1999).....	29
Preglednica 2: Lastnosti satelitov RapidEye (eoPortal, 2015a).	62
Preglednica 3: Lastnosti uporabljenih posnetkov RapidEye.....	64
Preglednica 4: Lastnosti satelita WorldView-2 (eoPortal, 2015b).....	64
Preglednica 5: Lastnosti uporabljenih posnetkov WorldView-2.	65
Preglednica 6: Točnost ročno določenih oslonilnih točk glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke RapidEye.	81
Preglednica 7: Točnost samodejno določenih oslonilnih točk glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke RapidEye.	82
Preglednica 8: Točnost rezultatov izravnave, ki so bile dobljene z različnim številom oslonilnih točk za posnetke RapidEye.....	83
Preglednica 9: Primerjava metod za robustno oceno na posnetkih RapidEye.	85
Preglednica 10: Rezultati izravnave s številom prisotnih in izločenih oslonilnih točk z dodanimi napakami, številom vseh in uporabljenih oslonilnih točk ter RMSE po izravnavi z algoritmom RANSAC in na koncu postopka (robustna ocena) za posnetke RapidEye.....	86
Preglednica 11: Velikost odstopanj oslonilnih točk z dodanimi napakami, ki so ostale po izravnavi z algoritmom RANSAC za večji in manjši niz točk posnetkov RapidEye.....	87
Preglednica 12: Točnost izdelanih ortoposnetkov RapidEye glede na državni ortofoto, ki je bil uporabljen kot referenca.	90
Preglednica 13: Točnost ročno določenih OT glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke WorldView-2.	92
Preglednica 14: Točnost samodejno določenih OT glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke WorldView-2.....	92
Preglednica 15: Točnost rezultatov izravnave, ki so bile dobljene z različnim številom OT za posnetke WorldView-2.....	94
Preglednica 16: Primerjava metod za robustno oceno na posnetkih WorldView-2.....	95
Preglednica 17: Rezultati izravnave s številom prisotnih in izločenih oslonilnih točk z dodanimi napakami, številom vseh in uporabljenih oslonilnih točk ter RMSE po izravnavi z algoritmom RANSAC in na koncu postopka (robustna ocena) za posnetke WorldView-2.	97
Preglednica 18: Velikost odstopanj oslonilnih točk z dodanimi napakami, ki so ostale po izravnavi z algoritmom RANSAC za večji in manjši niz točk posnetkov WorldView-2.	97
Preglednica 19: Točnost izdelanih ortoposnetkov WorldView-2 glede na državni ortofoto, ki je bil uporabljen kot referenca.	101

KAZALO SLIK

Slika 1: Samodejni postopek ortorektifikacije.....	2
Slika 2: Potek modula za samodejno določanje oslonilnih točk.....	18
Slika 3: Položaj samodejno določene oslonilne točke.....	20
Slika 4: Zajem posnetka z vrstičnim sistemom.	24
Slika 5: Zajem posnetka s polnoslikovnim sistemom.....	26
Slika 6: Geometrični prikaz atmosferske refrakcije.	28
Slika 7: Modeliranje tirnice z dvema segmentoma.....	34
Slika 8: Iterativna fotogrametrična metoda (IP).....	51
Slika 9: Iterativna metoda sledenja žarku (IRT).....	52
Slika 10: Ponazoritev preslikave pikslov pri izdelavi ortoposnetka z direktnimi metodami.....	53
Slika 11: Direktna metoda ortorektifikacije za vrstične skenerje.....	53
Slika 12: Ortorektifikacija polnoslikovnega posnetka z indirektno metodo.....	55
Slika 13: Indirektna metoda ortorektifikacije za vrstični skener.	57
Slika 14: Uporabljeni surovi posnetki RapidEye in njihov položaj.....	63
Slika 15: Uporabljeni surovi posnetki WorldView-2 in njihov položaj.	66
Slika 16: Samodejni postopek za ortorektifikacijo je sestavljen iz štirih osnovnih modulov.	68
Slika 17: Shematizacija poteka izračunov parametrov geometričnega modela.....	77
Slika 18: Določanje velikosti ortoposnetka (matrike) glede na surovi posnetek.....	78
Slika 19: RMSE KT za vsak točkovni niz za posnetke RapidEye.....	84
Slika 20: Obnašanje preizkušenih metod robustne ocene za posnetke RapidEye.	85
Slika 21: Rezultati izravnave (RMSE KT) po izravnavi z algoritmom RANSAC (črtkana črta) in na koncu postopka (polna črta) za večji in manjši niz točk posnetkov RapidEye.	87
Slika 22: Porazdelitev in odstopanja oslonilnih in kontrolnih točk – RapidEye.	88
Slika 23: Ortorektificiran posnetek Koper (RapidEye).	89
Slika 24: RMSE na 30 ročno določenih kontrolnih točkah za posnetke RapidEye.....	90
Slika 25: RMSE KT za vsak točkovni niz posnetkov WorldView-2.	94
Slika 26: Lastnosti preizkušenih metod robustne ocene za posnetke WorldView-2.	96
Slika 27: Rezultati izravnave (RMSE KT) po izravnavi z algoritmom RANSAC (črtkana črta) in na koncu postopka (polna črta) za večji in manjši niz točk posnetkov WorldView-2.	98
Slika 28: Porazdelitev in odstopanja oslonilnih in kontrolnih točk – WorldView-2.....	99
Slika 29: Ortorektificiran posnetek Bled – WorldView-2.....	100
Slika 30: RMSE na 30 ročno določenih kontrolnih točkah za posnetke WorldView-2.	101

LIST OF TABLES

Table 1: Atmospheric refraction values at sea level (Noerdlinger, 1999).....	29
Table 2: Properties of RapidEye satellites (eoPortal, 2015a).....	62
Table 3: Properties of the used RapidEye images.....	64
Table 4: Properties of the WorldView-2 satellite (eoPortal, 2015b).....	64
Table 5: Properties of the used WorldView-2 images.	65
Table 6: Accuracy of the manual GCPs compared to coordinates computed from RPCs for RapidEye images.....	81
Table 7: Accuracy of the automatically extracted GCPs compared to coordinates computed from RPCs for RapidEye images.	82
Table 8: Accuracy of the adjustment results obtained with different numbers of GCPs for RapidEye images.....	83
Table 9: Comparison between the robust estimation methods for RapidEye images.	85
Table 10: Adjustment results with the number of present and removed erroneous GCPs, number of all and used GCPs and RMS errors after the RANSAC adjustment and at the end (Robust estimation) for RapidEye images.	86
Table 11: Residuals of the erroneous GCPs that remained after the RANSAC adjustment for the large and small point sets of RapidEye images.	87
Table 12: Accuracy of the generated RapidEye orthoimages compared to national orthophoto used as reference.....	90
Table 13: Accuracy of the manual GCPs compared to coordinates computed from RPCs for WorldView-2 images.....	92
Table 14: Accuracy of the automatically extracted GCPs compared to coordinates computed from RPCs for WorldView-2 images.....	92
Table 15: Accuracy of the adjustment results obtained with different numbers of GCPs for WorldView-2 images.....	94
Table 16: Comparison between the robust estimation methods for WorldView-2 images.....	95
Table 17: Adjustment results with the number of present and removed erroneous GCPs, number of all and used GCPs and RMS errors after the RANSAC adjustment and at the end (Robust estimation) for WorldView-2 images.	97
Table 18: Residuals of the erroneous GCPs that remained after the RANSAC adjustment for the large and small point sets of WorldView-2 images.....	97
Table 19: Accuracy of the generated WorldView-2 orthoimages compared to the national orthophoto used as reference.	101

LIST OF FIGURES

Figure 1: Proposed automatic orthorectification procedure.	2
Figure 2: Schematic procedure of the automatic GCP extraction module.	18
Figure 3: Automatically selected GCP on the detected road patch (grey intersection) registered on the road distance image in the background.	20
Figure 4: Linear sensor image acquisition.	24
Figure 5: Fullframe sensor image acquisition.	26
Figure 6: Geometric presentation of atmospheric refraction.	28
Figure 7: Orbit modelling with two segments.	34
Figure 8: Iterative photogrammetric method (IP).	51
Figure 9: Iterative ray tracing method (IRT).	52
Figure 10: Example of pixel mapping at the generation of orthoimages with direct methods.	53
Figure 11: Direct orthorectification method for linear sensors.	53
Figure 12: Indirect orthorectification method for a fullframe image.	55
Figure 13: Indirect orthorectification method for linear sensors.	57
Figure 14: Used raw RapidEye images and their locations.	63
Figure 15: Used raw WorldView-2 images and their locations.	66
Figure 16: The automatic orthorectification procedure is divided into four main modules.	68
Figure 17: Schematic procedure of the computation of geometric model parameters.	77
Figure 18: Orthoimage (matrix) extent determination in relation to the raw image.	78
Figure 19: RMS error at ICPs for every point set for RapidEye images.	84
Figure 20: Behaviour of the tested robust estimation methods for RapidEye images.	85
Figure 21: Adjustment results (RMS error at ICPs) after RANSAC adjustment (dashed line) and at the end (solid line) for the large and small point sets of RapidEye images.	87
Figure 22: GCP and ICP distribution and residuals – RapidEye.	88
Figure 23: Orthorectified Koper image (RapidEye).	89
Figure 24: RMS errors at 30 manually selected check points for RapidEye images.	90
Figure 25: RMS error at ICPs for every point set of WorldView-2 images.	94
Figure 26: Characteristics of the tested robust estimation methods for WorldView-2 images.	96
Figure 27: Adjustment results (RMS error at ICPs) after RANSAC adjustment (dashed line) and at the end (solid line) for the large and small point sets of WorldView-2 images.	98
Figure 28: GCP and ICP distribution and residuals – WorldView-2.	99
Figure 29: Orthorectified Bled image – WorldView-2.	100
Figure 30: RMS errors at 30 manually selected check points for WorldView-2 images.	101

SEZNAM PRILOG

Priloga A: ZAKLJUČNI DEL IZPISA IZ MODULA ZA IZRAČUN PARAMETROV
GEOMETRIČNEGA MODELA

Priloga B: PORAZDELITEV IN ODSTOPANJA OSLONILNIH IN KONTROLNIH TOČK

Priloga C: ORTOPOSNETKI

SLOVAR

asinhrono snemanje (angl. asynchronous imaging) – Satelitsko snemanje z vzdolžnim senzorjem pri čemer je hitrost satelita večja od hitrosti snemanja posnetka.

atmosferska višina homogene gostote (angl. homogeneous atmospheric density scale height) – Višina plasti ozračja s homogeno gostoto.

bralnik podatkov (angl. parser) – Program za branje in izločanje podatkov iz datotek v standardnih zapisih (npr. XML).

čas zaznave (angl. integration time) – Čas, v katerem slikovni elementi detektorja zbirajo naboj med prenosi do transportnih registrov.

divergenca (angl. divergence) – Razhajanje vrednosti neznanke v sosledju iteracij.

geometrična popačenja (angl. geometric distortions) – Popačenja posnetka, ki so posledica razgibanosti zemeljskega površja, ukrivljenosti Zemlje, napak senzorja in kota gledanja senzorja.

iterativna bikonjugirana gradientna metoda (angl. iterative biconjugate gradient method, IBGM) – Iterativna metoda za reševanje sistemov linearnih enačb, ki temelji na uporabi gradienta.

iterativna fotogrametrična metoda (angl. iterative photogrammetric method) – Iterativna direktna metoda za izračun prostorskih koordinat iz slikovnih koordinat, ki temelji na izračunu preseka slikovnega žarka z digitalnim modelom reliefa.

iterativna metoda sledenja žarku (angl. iterative ray tracing method) – Iterativna direktna metoda za izračun prostorskih koordinat iz slikovnih koordinat, ki temelji na izračunu točke preseka z iterativnim podaljševanjem žarka gledanja, dokler ne doseže površja.

kalibracija v tirnici (angl. in-flight calibration) – Kalibracija elementov detektorja z analizo posnetkov, ki so bili zajeti na kalibracijskih območjih.

kalibriran surov posnetek (angl. sensor-corrected image) – Posnetek, ki je bil obdelan do ravni, kjer so upoštevani le radiometrični popravki zaradi variacije elementov znotraj detektorja (ponavadi je to raven 1A).

koren srednje kvadratne napake (angl. root mean square error, RMSE) – Kvadratni koren aritmetične sredine kvadratov odstopanj. Mera za odstopanje opazovanih vrednosti od pričakovanih vrednosti.

kvaternion (angl. quaternion) – Matematičen zapis usmeritev in rotacij objekta v trirazsežnem prostoru v obliki kompleksnega števila.

model afine transformacije (angl. affine transformation model) – Model afine transformacije je poseben primer modela racionalnih funkcij z osmimi parametri.

model direktne linearne transformacije (angl. direct linear transformation, DLT) – Model DLT je poseben primer modela racionalnih funkcij z enajstim parametri.

model racionalnih funkcij (angl. rational function model, RFM) – Empirični model, ki nadomešča rigorozne modele in je v obliki racionalne funkcije z 80-imi parametri.

način upočasnjevanja (angl. slow-down mode) – Zmanjšanje hitrosti vzdolžnega snemanja glede na hitrost leta satelita, s katerim lahko povečamo čas zaznave.

nagib, naklon, zasuk (angl. roll, pitch, yaw) – Rotacije platforme glede na orbitalni koordinatni sistem (tirnico letenja).

na Zemljo pritrjen geocentrični koordinatni sistem (angl. Earth Centered Earth Fixed, ECEF) – Ortogonalni koordinatni sistem z izhodiščem v centru Zemlje.

objektni prostor (angl. object space) – Trirazsežni prostor, v katerem so podane prostorske koordinate oslonilnih točk.

obrnjeno projiciranje posamičnega žarka (angl. single-ray backprojection) – Iterativne direktne metode za izračun prostorskih koordinat iz slikovnih koordinat in z uporabo digitalnega modela reliefa.

odsekovne polinomske funkcije (angl. piecewise polynomial functions) – Polinomske funkcije, sestavljene iz več medsebojno povezanih odsekov.

podatkovna struktura (angl. data structure) – V jeziku IDL je to spremenljivka, ki lahko vsebuje različne podatkovne tipe.

polnoslikovni snemalni sistem (angl. full-frame camera) – Snemalni sistem, ki naenkrat zajame celoten posnetek.

popolni ortofoto (angl. true orthophoto) – Ortofoto, ki je popravljen tako za vplive geometričnih popačenj kot za vpliv visokih objektov (stavb).

prečni snemalni sistem (angl. whiskbroom scanner) – Snemalni sistem, ki površje opazuje s premikanjem vidnega polja senzorja pravokotno (prečno) na smer gibanja platforme.

prečno na orbito (angl. across track) – Pravokotno na smer gibanja platforme.

prostorski presek (angl. space intersection) – Postopek določevanja prostorskih koordinat točk, ki se pojavljajo na prekrivajočih se delih dveh ali več posnetkov z znano notranjo in zunanjo

orientacijo. V matematičnem smislu je to izračun preseka dveh ali več prostorskih premic z izravnavo.

racionalni polinomski koeficienti (angl. rational polynomial coefficients, RPC) – Koeficienti, ki se uporabijo v modelu racionalnih funkcij za pretvorbo slikovnih koordinat v prostorske koordinate ali obratno.

ravni obdelave posnetkov (angl. image processing levels) – Ravni obdelave posnetkov, ki jih nudijo ponudniki posnetkov. Ravni si sledijo od surovih posnetkov do ortorektificiranih in mozaičenih posnetkov.

razmerje signal-šum (angl. signal-to-noise ratio, SNR) – Vrednost, ki podaja stopnjo signala (jakost) glede na neželene pojave (šum).

redka matrika (angl. sparse matrix) – Matrika, v kateri ima večina celic vrednost 0.

reflektorji (angl. reflecting telescopes) – Teleskopi, ki za objektivne uporabljajo zrcala.

refraktorji (angl. refracting telescopes) – Teleskopi, ki za objektivne uporabljajo leče.

robustna ocena (angl. robust estimation) – Metoda izravnave, ki temelji na zmanjševanju vpliva opazovanj z napakami z uporabo utežne funkcije.

skoraj realni čas (angl. near-real-time) – Krajši časovni zamik, ki nastane pri samodejni obdelavi podatkov med zajemom izvirnega podatka in dostavo izdelanega produkta.

sledilec zvezd (angl. star tracker) – Naprava, ki določa rotacije platforme na podlagi sledenja položajev zvezd.

slikovna korelacija z metodo najmanjših kvadratov (angl. least squares matching, LSM) – Metoda slikovne korelacije za iskanje homolognih točk, ki temelji na minimiziranju razlik med radiometričnimi vrednostmi dveh slik z metodo najmanjših kvadratov.

tehnologija TDI (angl. Time Delay and Integration) – Metoda vzdolžnega skeniranja, ki z večkratnim zajemom istih objektov zagotavlja dobro kakovost posnetka s hitrejšim zajemom vrstic.

vzdolžni snemalni sistem (angl. pushbroom scanner) – Snemalni sistem, ki naenkrat zajame celotno vrstico posnetka v smeri gibanja platforme.

vzdolž orbite (angl. along track) – V smeri gibanja platforme.

zakrivanje (angl. occlusion) – Prikriti objekti ali deli objektov, ki na posnetku niso vidni zaradi kota snemanja in/ali geometričnih popačenj.

značka (angl. tag) – Sestavina označevalnih jezikov, npr. HTML, SGML, XML.

žarek gledanja (angl. view ray) – Žarek (linija), ki povezuje projekcijski center posnetka ter isto točko na posnetku in v prostoru.

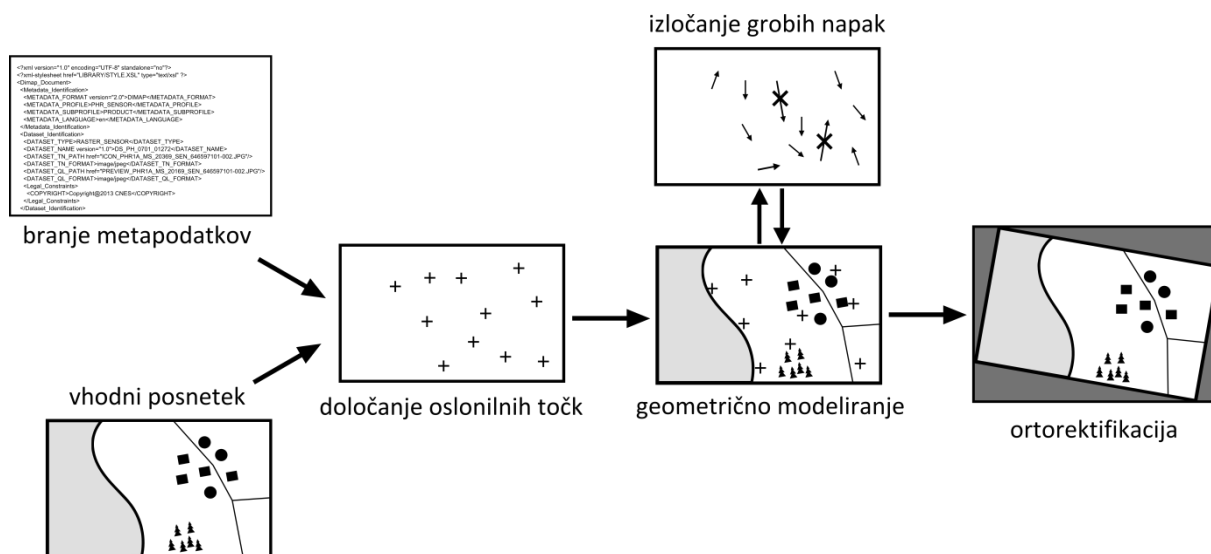
Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

V zadnjih desetletjih je bilo izstreljenih več satelitov za opazovanje Zemlje za potrebe različnih aplikacij (NSDDC, 2015; CEOS, 2015). Količina satelitskih posnetkov hitro narašča, njihova uporaba je prisotna na vedno več področjih, dostopni pa so tako znanstvenikom kot podjetnikom. V večini primerov uporabniki zahtevajo že predobdelane podatke oz. posnetke brez geometričnih popačenj (angl. *geometric distortions*), ki so posledica razgibanosti zemeljskega površja, ukrivljenosti Zemlje, napak sensorja in kota gledanja sensorja, in ki so v izbranem koordinatnem sistemu. Poleg tega v nekaterih aplikacijah potrebujemo geometrično popravljene posnetke v skoraj realnem času (angl. *near-real-time*). Na primer, pri opazovanju naravnih nesreč sta hiter zajem podatkov in njihova takojšnja analiza ključnega pomena (Veljanovski et al., 2012; Joyce et al., 2009). Tako rekoč vse aplikacije, ki temeljijo na opazovanju Zemlje, bi pridobile na uporabnosti, če bi bil postopek od zajema podatkov do dostave rezultatov končnemu uporabniku opravljen hitro in samodejno.

Dosedanje metode obdelave satelitskih posnetkov temeljijo na postopkih, ki so dokaj samostojni, vendar nepovezani v celotni verigi od satelitskega snemanja do končnega produkta (tj. rektificiran posnetek oz. karta). Želja tako raziskovalcev kot končnih uporabnikov satelitskih posnetkov je avtomatizirati in s tem pospešiti celoten proces in se čim bolj približati izdelavi kart (predvsem rastrskih tematskih kart velikih meril) v realnem času (angl. *real-time-processing*). Določene faze v procesu obdelave posnetkov so se do nedavnega izvajale večinoma ročno in so zahtevale veliko časa, zato je bilo pomembno vse te faze med sabo čim bolj povezati in avtomatizirati. Predvsem je med člani v verigi avtomatizacije pomemben prav postopek ortorektifikacije posnetkov.

Z razvojem digitalnih snemalnih sistemov, enot za določanje položaja (globalni navigacijski satelitski sistemi, GNSS) in orientacije (inercialni navigacijski sistemi, INS), tehnologij prepoznavanja vzorcev, digitalnih baz podatkov in digitalnih modelov reliefa, lahko celoten proces ortorektifikacije avtomatiziramo, kar zmanjša stroške in čas obdelave posnetkov (Slonecker et al., 2009). V okviru doktorske disertacije smo razvili izviren postopek za samodejno ortorektifikacijo visokoločljivih optičnih satelitskih posnetkov, ki je del procesne verige STORM za samodejno obdelavo posnetkov v skoraj realnem času (Oštir et al., 2014). Postopek (slika 1) brez posegov operaterja voden (t.i. kalibriran surov) satelitski posnetek, ki ga pripravi sprejemna postaja iz niza podatkov, prejetih s satelita, geometrično popravi tako, da dobimo ortoposnetek primerne kakovosti za zajem podatkov oz. za analize v geografskih informacijskih sistemih (GIS). Postopek je sestavljen iz več korakov: branje in priprava metapodatkov, samodejno določanje oslonilnih točk, geometrično modeliranje (izračun parametrov geometričnega modela) in ortorektifikacija. V sklopu disertacije je bil poudarek na korakih geometričnega modeliranja zajema posnetka in ortorektifikacije.



Slika 1: Samodejni postopek ortorektifikacije. Za izdelavo ortoposnetka je potrebnih več korakov.

Figure 1: Proposed automatic orthorectification procedure. Different steps are needed to generate the orthoimage.

Čeprav je bilo v zadnjih letih več poskusov direktnega načina georeferenciranja posnetkov, ki za umestitev posnetka v prostor uporablja le podatke iz enot za določanje položaja in orientacije, ta še vedno ne daje dovolj natančnih rezultatov (Poli, 2005). Zato smo v našem razvitem postopku ortorektifikacije uporabili še modul za samodejno določanje oslonilnih točk, ki je bil sicer izdelan za uporabo v postopku, ni pa bil v celoti predmet raziskav doktorske disertacije. Oslonilne točke so pomemben vhodni podatek pri uporabi fizičnega oz. rigoroznega geometričnega modela, ki smo ga prilagodili za različne tipe visokoločljivih optičnih snemalnih sistemov. Geometrični model smo prilagodili tako za delo z vrstičnimi senzorji, ki so uporabljeni v večini večjih komercialnih satelitov, kot tudi polnoslikovnimi senzorji, ki so večinoma uporabljeni pri majhnih satelitih. Rezultat geometričnega modeliranja posnetka je določitev parametrov njegove notranje in zunanje orientacije. Ti se, skupaj z digitalnim modelom reliefa (DMR), uporabijo za samodejno ortorektifikacijo posnetkov.

V doktorski disertaciji smo delovanje razvitega postopka prikazali s podatki satelitov serije RapidEye in WorldView-2, ki snemajo v vrstičnem načinu. V predlogu naloge je bila načrtovana uporaba še več vrst senzorjev, tudi polnoslikovnih, vendar jih do zaključka doktorske disertacije nismo uspeli pridobiti. V nalogi smo želeli pri ortorektifikaciji preizkusiti tudi nov državni lidarski DMR, ki pa je bil v času izvajanja naloge še v obdelavi in za izbrana testna območja nedostopen. Kljub temu sta bila preizkušena senzorja, ki snemata v različnih prostorskih ločljivostih, primerna za vrednotenje delovanja vseh korakov v doktorski disertaciji razvitega postopka ortorektifikacije, kar je bil tudi glavni cilj disertacije.

1.1 Pregled obstoječih raziskav na področju samodejne ortorektifikacije

V daljinskem zaznavanju in fotogrametriji se raziskovalci za potrebe ortorektifikacije posnetkov že vrsto let ukvarjajo z razvojem metod, ki bi bile čim bolj avtomatizirane oziroma samodejne. V zadnjih letih se je z uveljavitvijo zmogljivejših instrumentov, procesnih postaj in orodij povečalo število raziskav na tem področju. Čeprav narašča tudi število novih metod, je veliko poudarka tudi na popolnejši avtomatizaciji že preverjenih tehnik.

V nadaljevanju poglavja so predstavljene dosedanje raziskave na področju samodejne ortorektifikacije optičnih satelitskih posnetkov. Postopek lahko v grobem delimo na tri dele, ki bodo tudi osnova za kratek pregled raziskav: geometrični model, slikovno korelacijo in samodejno georeferenciranje.

1.1.1 Geometrični model

V zadnjih desetletjih je bilo izdelanih že veliko geometričnih modelov, ki so se razlikovali po zapletenosti in doseganju natančnosti. Splošno lahko vse geometrične modele delimo na dve vrsti (Toutin, 2004):

- fizični oz. rigorozni modeli in
- empirični modeli.

Rigorozni modeli poskušajo opisati fizične lastnosti zajema posnetkov. Za modeliranje zajema uporabljajo modificirane kolinearne enačbe, ki vključujejo še dodatne parametre. Empirični modeli so enostavnejši in teoretično tudi manj natančni. Odnos med slikovnimi in objektnimi koordinatami je tu vzpostavljen s polinomi, oziroma njihovimi kvocientii. Ob pomanjkanju podatkov o kalibraciji senzorja ali tirnici satelita lahko včasih empirični modeli nadomestijo rigorozni model.

Enega prvih rigoroznih modelov sta predlagala Gagan in Dowman (1988) iz Londonske univerze UCL. Predlagata uvedbo dinamičnega modela orbitalnih parametrov (angl. dynamic orbital parameter model). V tem primeru se kolinearne enačbe razširi z dvema orbitalnima parametroma (prava anomalija in rektascenzija dvižnega vozla), s katerima se modelira premikanje satelita in rotacijo Zemlje. Geometrični model za orientacijo posnetkov SPOT je razvil in v programu SPOTCHECK+ implementiral Kratky (1989). Model izračuna položaj satelita iz podatkov o tirnici, medtem ko se dogajanje med letom modelira s polinomskimi funkcijami (linearnimi ali kvadratnimi). Naslednji model uporablja princip orientiranja posnetkov, ki so ga razvili na Tehniški univerzi v Münchenu in implementirali v programu CLIC (Ebner et al., 1992). Model temelji na razširjenih kolinearnih enačbah, parametri zunanje orientacije pa se določijo z blokovno izravnavo stereoposnetkov. Model so uporabljali za posnetke vrstičnega skenerja MOMS-2P. Na Inštitutu za fotogrametrijo in geoinformacije IPI v Hannoveru so razvili program BLASPO za rektifikacijo satelitskih posnetkov

(Konecny et al., 1987). Za delovanje potrebuje le informacijo o satelitovi tirnici ter podatke o zasukih senzorja. Zelo fleksibilen rigorozen model za vrstične skenerje je izdelal tudi Toutin (2003). Model pri iz vrednotenju upošteva distorzije platforme, senzorja, oblike Zemlje in kartografske projekcije. Westin (1990) je razvil geometrični model za rektifikacijo posnetkov SPOT. Uporabljen model tirnice satelita je še dodatno poenostavil iz elipse v krožnico, ki sicer med gibanjem spreminja polmer.

Nekateri splošni geometrični modeli uporabljajo za modeliranje trajektorije in obnašanje senzorja kar polinomske funkcije. Poli (2005) je razvila model, ki uporablja polinomske funkcije druge stopnje, kar naredi model zelo splošen, vendar za določitev parametrov potrebuje opazovanje položaja in orientacije platforme. Splošen model senzorja za visokoločljive satelitske posnetke, kjer se tirnica in orientacija satelita modelirata s kubičnimi zlepkami, so razvili tudi Weser et al. (2008). Model lahko direktno vključi metapodatke v splošni model, kar omogoča neposredno georeferenciranje. Nekatere opisane geometrične modele so v zadnjih letih dopolnili in priredili za potrebe novih visokoločljivih satelitov (npr. Michalis in Dowman (2008) sta priredila dinamični model orbitalnih parametrov).

Poleg rigoroznih modelov so za rektifikacijo satelitskih posnetkov v uporabi tudi empirični modeli, ki so pridobili na veljavi z uvedbo visokoločljivih satelitskih posnetkov, ki imajo v splošnem kompleksnejši način snemanja. Najbolj uporabljen je model racionalnih funkcij (angl. rational function model, RFM) z 80 parametri. Med prvimi, ki sta predstavila izčrpno študijo o modelu RFM, sta bila Tao in Hu (2001). Opisala sta metodi (odvisno od reliefa ter neodvisno od njega) za izračun polinomskih koeficientov z iterativno neposredno izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Model sta preizkusila na aeroposnetkih in posnetkih SPOT ter dosegla primerljivo natančnost kot z rigoroznim modelom, vendar le z dodatnimi oslonilnimi točkami. Poseben primer empiričnih modelov so afine transformacije. Okamoto et al. (1998) so afino transformacijo predlagali za probleme, ki nastanejo zaradi zelo ozkega kota gledanja snemalnega sistema satelita SPOT. Model uporablja lokalne koordinatne sisteme in elipsoidne višine, zato je pri izračunu potrebno upoštevati tudi ukrivljenost Zemlje. El-Manadili in Novak (1996) sta za geometrično modeliranje posnetkov SPOT predlagala model direktne linearne transformacije (angl. direct linear transformation, DLT). Metoda DLT uporablja 11 parametrov ter ne potrebuje parametrov notranje orientacije in podatkov o efemeridah satelita, saj rezultat dobi samo z oslonilnimi točkami.

1.1.2 Slikovna korelacija

Pri procesu ortorektifikacije je zelo pomembno pridobiti kakovostne oslonilne točke, ki zanesljivo povežejo surov posnetek (preko geometričnega modela) s fizičnim Zemljinim površjem. Za avtomatizacijo postopka je samodejno iskanje oslonilnih točk s slikovno korelacijo ključnega pomena, zato je zelo pomembna izbira primerne metode slikovne korelacije, ki upošteva tip deformacij surovega posnetka v primerjavi z referenčnim. Metode slikovne korelacije za registracijo posnetkov

daljinskega zaznavanja, kart, medicinskih posnetkov in drugih računalniško ustvarjenih slik obširno opišejo Brown (1992) ter Zitová in Flusser (2003). Metode, uporabne predvsem v daljinskem zaznavanju, opišeta in ovrednotita Fonseca in Manjunath (1996).

V zadnjih letih so nekatere metode izboljšali in prilagodili različnim senzorjem. Izboljšan algoritem za določanje točk na visokoločljivih satelitskih posnetkih (IKONOS) sta predstavila npr. Xiong in Zhang (2009). Algoritem uspešno odkriva najbolj izrazite značilke (izrazite, bistvene lastnosti objektov na posnetku), vendar je omejen na posnetke z ozkim kotom gledanja in upošteva samo premike in rotacije.

Več študij je bilo izvedenih tudi na področju samodejne registracije posnetkov, ki uporabljajo razne tehnike slikovne korelacije za različne senzorje. Na srednje in nizkoločljivih posnetkih so delali Le Moigne et al. (2002), ki so uspešno registrirali posnetke Landsat in AVHRR s križno korelacijo in valjčnimi transformacijami. Netanyahu et al. (2004) so značilke na posnetkih Landsat pridobili z valjčnimi metodami, za registracijo pa so uporabili Hausdorffovo razdaljo. Algoritem za samodejno registracijo visokoločljivih posnetkov sta med drugimi razvila Zhang in Fraser (2007). V tem primeru sta značilke pridobila s Förstnerjevim operatorjem, korelacijo pa izvedla s hierarhičnimi piramidami. Posnetke IKONOS in QuickBird sta registrirala z afino transformacijo. Multimodalno metodo za samodejno registracijo optičnih (SPOT 4) in radarskih (ERS-2) posnetkov sta predstavila Inglada in Giros (2004). Za določanje homolognih točk sta uporabila razširjeno križno korelacijo.

1.1.3 Samodejno georeferenciranje

Študij samodejnega georeferenciranja in ortorektifikacije različnih senzorjev ni zelo veliko. Gianinetta in Scaioni (2008) sta izdelala algoritem AGE za samodejno določitev oslonilnih točk. Adaptivna korelacija najmanjših kvadratov (angl. adaptive least squares matching) se izvede med surovim posnetkom in geokodiranim posnetkom, iz katerega se dobi referenčne položajne koordinate točk. Višinske koordinate se samodejno dobi iz modela reliefa. Algoritem je bil, kljub malo slabšim doseženim točnostim ortoposnetkov, uspešno preizkušen na posnetkih QuickBird, SPOT5 in IKONOS.

Uspešen postopek samodejnega ortorektificiranja so razvili za radarske satelitske posnetke (Sheng in Alsdorf, 2005). Najprej sta avtorja s filtriranjem dobila značilke, katerim sta določila homologne točke z normaliziranim korelacijskim koeficientom. V naslednjem koraku je sledila rektifikacija posnetka. Ta je potekala po posameznih kosih (angl. piecewise) posnetka, saj je vsak kos uporabljal svojo transformacijo. Rektifikacija po kosih je zelo uspešna pri posnetkih z zelo kompleksnimi deformacijami. Končne ortorektificirane posnetke sta dobila z modelom reliefa SRTM (angl. Shuttle Radar Topography Mission). Skoraj sočasno ortorektifikacijo posnetkov iz letalske videokamere

daljinsko vodenega letala je razvil Zhou (2009). Metoda deluje samodejno, vendar pri tem uporablja z GPS-om izmerjene oslonilne točke na območju, ki je določeno za snemanje. Značilke se izračunajo samo na prvem posnetku, na vseh naslednjih pa se jim skuša slediti (so vezne točke). Orientacijski parametri se izračunajo z blokovno izravnavo. Ortorektificirani posnetki se na koncu še samodejno mozaičijo. Na srednje in nizkoločljivih posnetkih sta delala tudi Eugenio in Marques (2003). Njuna metoda registracije temelji na določitvi robov, ki služijo kot značilke, ter nadaljnji afini transformaciji. Skoraj povsem samodejen postopek za ortorektifikacijo optičnih satelitskih posnetkov so izdelali Leprince et al. (2007) za uporabo v raziskavah premikov (deformacij) zemeljskega površja. Za korelacijo med posnetki so izbrali metodo fazne korelacije, ki se zanaša na Fourierjev teorem premikov. To pomeni, da se relativne premike površja med podobnimi posnetki lahko dobi iz faznih razlik njihovih Fourierjevih transformacij. Pred ortorektifikacijo je treba ročno določiti oslonilne točke na vseh posnetkih. Celoten postopek je bil prilagojen le za obdelavo posnetkov SPOT 5. Model je bil kasneje implementiran v modul, ki deluje v okolju programa ENVI. Uspešen postopek za samodejno ortorektifikacijo visokoločljivih posnetkov Formosat-2 sta razvila Liu in Chen (2009). Njuna metoda deluje na korelaciji ploskovnih elementov iz letalskega ortofota in satelitskega posnetka. Ortorektifikacija poteka z rigoroznim transformacijskim modelom, dosežena natančnost pa je pod 1,5 piksla. Samodejno geometrično korekcijo sta razvila tudi Devaraj in Shah (2014). Ortorektifikacija srednje ločljivih posnetkov CBERS-2 in CBERS-2B poteka z referenčnimi posnetki Landsat. Pred korelacijo se ortorektificirane posnetke Landsat transformira v surovo obliko (posnetek ima znova geometrična popačenja). Nato se registracija izvede z afino transformacijo.

1.2 Cilji in raziskovalne hipoteze

1.2.1 Cilji

Podatke o zemeljskem površju najhitreje pridobimo z metodami daljinskega zaznavanja. Čeprav lahko posnetke pridobimo hitro, je ponavadi njihova predobdelava in sama obdelava precej zamudna. Pri predobdelavi to najbolj velja za geometrične korekcije, natančnost katerih odločilno vpliva na vse nadaljnje procese. Počasnost obdelave je najbolj omejujoč faktor v situacijah, ko je potrebna hitra odzivnost (naravne nesreče ipd.). V tovrstnih primerih je čim hitrejše posredovanje podatkov do končnih uporabnikov nujno, saj tako lahko omejimo nastalo škodo. Satelitski posnetki lahko služijo kot vir podatkov za krizne dogodke in čimprejšnje ocenjevanje stanja na zemeljskem površju, vendar le pospešitev postopka obdelave lahko vodi do rezultatov, ki bodo zadoščali hitremu ukrepanju po naravnih in drugih nesrečah ter ocenjevanju škode. V takem primeru moramo postopek geometrične obdelave posnetkov popolnoma avtomatizirati in uporabiti v skoraj realnem času. V raziskavi smo si zadali več ciljev, s katerimi želimo:

- izdelati samodejen postopek ortorektifikacije, ki bo surovi posnetek ortorektificiral brez posredovanja operaterja najkasneje v dveh urah po prejetju, s čimer bo dostopen za uporabo v različnih aplikacijah, ki zahtevajo hitro odzivnost;
- zagotoviti položajno točnost izdelkov (ortoposnetkov) v rangu dveh pikslov glede na referenčne podatke, s čimer bodo uporabni tudi za namene kartiranja v velikih merilih in združevanja podatkov (angl. data fusion);
- prilagoditi izdelan postopek za samodejno obdelavo različnim vrstam senzorjev in satelitov, s čimer bomo lahko povečali tudi časovno ločljivost pridobivanja ortoposnetkov za želeno območje, kar je zelo pomembno prav v primeru naravnih nesreč.

1.2.2 Raziskovalne hipoteze

Na zmožnost hitre in samodejne ortorektifikacije se nanašajo tudi postavljene raziskovalne hipoteze.

Raziskovalne hipoteze doktorske disertacije so:

- 1) Možno je definirati in realizirati lasten procesni postopek od surovih optičnih satelitskih (le radiometrično predobdelanih) posnetkov, pridobljenih z vzdolžnim (angl. pushbroom) skenerjem ali snemalnim sistemom polnoslikovnega (angl. full frame) formata, do ortorektificiranih posnetkov, ki je z dostopnimi referenčnimi podatki primerne kakovosti popolnoma samodejen (ne zahteva posredovanja operaterja).
- 2) Določen obstoječi geometrični model je možno prilagoditi tako, da bo omogočal samodejno obdelavo različnih vrst senzorjev.
- 3) Dostopni vektorski podatki o cestah in državni ortofoto so z vidika spektralne in prostorske ločljivosti primerni za samodejno slikovno korelacijo s posnetki različnih senzorjev.
- 4) Ortoposnetki, pridobljeni s samodejno ortorektifikacijo, lahko dosežejo položajno točnost velikosti okrog dveh pikslov, ocenjeno glede na referenčne podatke.

Prva osnovna hipoteza je najpomembnejša, saj predpostavlja, da je sploh mogoče vzpostaviti hiter ter delujoč postopek za ortorektifikacijo surovih oz. le radiometrično obdelanih (korekcije detektorjev) posnetkov z dostopnimi referenčnimi podatki primerne kakovosti. Mišljeni so predvsem državni podatki, saj je obstoječi postopek namenjen obdelavi posnetkov za območje Slovenije. Poleg tega predpostavlja, da lahko postopek obdeluje več vrst posnetkov, ki so bili zajeti z vzdolžnim oz. vrstičnim skenerjem (senzorjem) ali polnoslikovnim senzorjem. V tem primeru je potrebno prav vse korake, ki sestavljajo postopek, predelati in prilagoditi za delovanje v popolnoma samodejnem postopku.

Druga hipoteza se ukvarja z geometričnim modelom, ki je eden od ključnih delov postopka, razvitega v okviru disertacije. Predvideva, da je mogoče prilagoditi določen geometrični model tako, da je splošen, oz. lahko deluje z različnimi snemalnimi sistemi. Posamezen geometrični model sicer lahko deluje le z eno vrsto senzorjev (npr. vrstični), mora pa zagotavljati enako obdelavo za vse sisteme znotraj te vrste. Tak model ima torej vedno enak tip vhodnih in izhodnih podatkov za izbrano vrsto senzorjev.

Tretja hipoteza se nanaša na slikovno korelacijo za samodejno določitev oslonilnih točk. Kakovost samodejno pridobljenih oslonilnih točk je odvisna od uporabljenih metod korelacije kot tudi vhodnih referenčnih podatkov. V izdelanem postopku so bili glavni referenčni viri vektorski podatki o cestah, državni ortofoto je bil uporabljen le deloma. Primernost referenčnih podatkov je bila preverjena na podlagi končne položajne točnosti oslonilnih točk. Določitev oslonilnih točk ni bila glavni predmet doktorske disertacije, je pa podrobneje obravnavana, ker je v veliki meri vplivala na točnost končnih rezultatov.

Zadnja hipoteza se navezuje na končni izdelek ortorektifikacijskega postopka oz. ortoposnetke. Če želimo, da so ortoposnetki uporabni za večino aplikacij, morajo dosegati visoko položajno točnost. Zaradi tega mora postopek izdelovati ortoposnetke, ki imajo položajno točnost približno velikosti dveh pikselov vhodnega posnetka glede na referenčne podatke (ortofoto). Končna točnost izdelka torej vključuje napake določanja točk, napake modela oziroma georeferenciranja posnetkov in ortorektifikacijskega postopka.

1.3 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija je razdeljena na devet poglavij. V prvem so predstavljeni: motivacija za raziskavo, cilji, raziskovalne hipoteze in pretekle raziskave na področju samodejne ortorektifikacije. Naslednja štiri poglavja sestavljajo teoretični del disertacije. Najprej so v drugem poglavju opisane vrste senzorjev in ravni obdelave satelitskih posnetkov. V grobem sta predstavljena ortorektifikacija in postopek razvitega ortorektifikacijskega postopka. V tretjem poglavju sledi opis algoritma za samodejno določanje oslonilnih točk. Četrto poglavje je namenjeno obširni predstavitvi geometričnih modelov vrstičnega in polnoslikovnega senzorja, ki sta uporabljena v postopku. Predstavljena je sestava modelov in njihovo delovanje od priprave koordinat oslonilnih točk do izravnave in končnih orientacijskih parametrov. Peto oz. zadnje poglavje teoretičnega dela je namenjeno obravnavi metod ortorektifikacije in predstavitvi indirektnega modela, ki je bil uporabljen v disertaciji. Tudi praktični del je sestavljen iz štirih poglavij. Prvo med njimi oz. šesto poglavje opiše metode dela in uporabljene podatke ter satelite, s katerimi so bili podatki zajeti. Sedmo poglavje predstavi celoten ortorektifikacijski postopek oz. delovanje vseh štirih razvitih modulov. Osmo poglavje je namenjeno testiranju razvitega postopka z visokoločljivimi posnetki RapidEye in zelo visokoločljivimi posnetki

WorldView-2. Poglavje vsebuje pregled rezultatov in analizo dosežene točnosti določevanja točk, geometričnega modela in ortorektifikacije. Zadnje, deveto poglavje je namenjeno končnim ugotovitvam raziskave ter razpravi o možnostih za nadaljnje delo in nadgradnjo razvitega postopka.

I TEORETIČNI DEL

2 IZHODIŠČA IN TEMELJNI POJMI

V poglavju so predstavljena osnovna izhodišča naloge in temeljni pojmi, ki so potrebni za razumevanje samega postopka. Najprej so predstavljene vrste senzorjev in geometrije zajema posnetkov ter ravni obdelave podatkov. Nato je razložen osnovni postopek ortorektifikacije in opisana samodejna procesna veriga za satelitske posnetke, katere del je tudi postopek, opisan v doktorski disertaciji.

2.1 Geometrija zajema posnetkov glede na vrsto senzorja

Optični satelitski posnetek nastane v snemalnem sistemu satelita, ki sprejema svetlobo (radiacije različnih valovnih dolžin), ki prihaja od Sonca in se odbije od opazovanega predmeta (površja Zemlje). Sam snemalni sistem je sestavljen iz več delov, med njimi pa je za zapis slike ključen slikovni detektor, ki zajame odbito svetlobo in jo pretvori v električni naboj. Magnituda električnega naboja je sorazmerna z intenziteto prejete svetlobe. Za satelitsko snemanje poznamo več različnih izvedb detektorjev: najbolj sta v uporabi tehnologiji CCD (Charge-Coupled Device) in CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Detektor CCD je sestavljen iz več slikovnih elementov, ki zbirajo, shranjujejo in prenašajo električni naboj iz enega elementa na drugega. Dobljeni naboji se prenesejo v element za odčitavanje in se jih pred vhomom v analogno-digitalni pretvornik še dodatno ojača. Vsak slikovni element bo predstavljal en piksel na posnetku. Tudi detektor CMOS je sestavljen iz več slikovnih elementov, vendar ima vsak element svoj ojačevalec in se ga lahko obravnava in bere ločeno od ostalih.

Vsaka od tehnologij ima svoje prednosti in slabosti, vendar se je v preteklosti zaradi zgodnje iznajdbe, nižje cene in boljše izdelave slik večinoma uporabljalo detektorje CCD (Schenk, 1999). Konkurenčni detektorji CMOS (Bigas et al., 2006) so se pojavili kasneje in se do pred kratkim v vesoljske namene niso uporabljali. Ker detektorji CMOS porabijo manj energije in so bolj naklonjeni miniaturizaciji, so trenutno zelo priljubljeni za vgradnjo v majhne satelite, kjer sta količina energije in prostor zelo omejena. Izbira tehnologije izdelave detektorja je odvisna tudi od oblike oziroma izvedbe detektorja, ki je lahko vzdolžen (vrstičen) ali polnoslikovni (matričen). Zaradi boljše preizkušnosti in zanesljivega delovanja se v večje satelite (vsi delujejo v vrstičnem načinu snemanja) za opazovanje Zemlje vgrajuje le detektorje CCD. Kako bo v prihodnje, pa bo odvisno od možnosti prilagoditve obeh tehnologij za prihajajoče potrebe daljinskega zaznavanja.

Pri modeliranju geometrije zajema posnetka sta zelo pomembni dve lastnosti sistema za zajem posnetkov: velikost piksla in goriščna razdalja. Prva se navezuje na sam detektor oziroma na velikost slikovnega elementa (piksla) iz katerih je sestavljen detektor. Manjši kot je element, večjo prostorsko ločljivost ima posnetek pri enakih ostalih parametrih. Pri tem je potrebno paziti na količino sprejete svetlobe, saj so lahko ob neprimerni optiki in premajhnih elementih detektorja vrednosti na posnetku polne šuma in zato neuporabne. Z detektorjem, ki ima slikovne elemente velikosti nekaj μm in z optiko oz. teleskopom, ki ima primerno goriščno razdaljo in premer vstopne odprtine, lahko sateliti dosežejo prostorske ločljivosti tudi pod 0,5 metra. Druga lastnost je povezana s teleskopom sistema za zajem posnetkov. Od zgradbe teleskopa je odvisna velikost goriščne razdalje, ki tudi določa prostorsko ločljivost posnetka. Večja kot je goriščna razdalja, boljša je ločljivost. Teleskopi večjih satelitov imajo goriščno razdaljo velikosti več metrov, kar dosežejo predvsem z zrcali (t.i. reflektorji; angl. reflecting telescopes) in lečami. Večji sateliti, s težo nekje od 300 kg do 3000 kg, ponavadi uporabljajo teleskope tipa Cassegrain (npr. Landsat), Korsch (npr. Pleiades) ali TMA (Three-Mirror Anastigmat; npr. RapidEye), manjši, s težo pod 300 kg, pa večinoma refraktorje, t.j. teleskope, sestavljene samo iz leč (angl. refracting telescopes).

Geometrija snemanja je odvisna predvsem od načina zajemanja posnetka. Zaradi potrebe po visoki prostorski ločljivosti in večji velikosti snemanega območja večina sodobnih satelitov uporablja tehniko vzdolžnega snemanja, kjer senzor zajema vrstico za vrstico v določenih časovnih intervalih. Skupek vseh zajetih vrstic nato tvori posnetek. V tem primeru je lahko slikovna ravnina sestavljena iz več detektorjev, ki tvorijo vrstico slikovnih elementov. Geometrija je zelo kompleksna, saj ima vsaka vrstica med snemanjem svoj unikatni čas in perspektivni center. Drugi, manj pogosti način snemanja, je polnoslikovni. V tem primeru posnetek nastane v centralni projekciji, saj ima detektor obliko matrike. Ker celoten posnetek nastane v zelo kratkem času, je geometrijo zajema lažje modelirati. Zaradi večje deformiranosti posnetka (kot gledanja) in občutljivosti na šum se ta način ni uveljavil za snemanje iz vesolja. Več o obeh načinih zajemanja posnetka je zapisanega v poglavju 4.

2.2 Ravni obdelave posnetkov

Satelit posneto sliko pošlje preko oddajnika v sprejemno postajo, kjer se posnetek dodatno obdela. Komercialna podjetja, ki imajo v lasti satelite ali razpolagajo s posnetki, obdelajo posnetke do različnih stopenj (angl. processing levels) glede na potrebe uporabnikov. Vsak ponudnik posnetkov uporablja svojo notacijo in definicije obdelave (npr. Gutman in Ignatov, 1997), vendar so si definicije različnih proizvajalcev podobne in se ponavadi razlikujejo le v detajlih. Če povzamemo skupne značilnosti obstoječih definicij, lahko ravni razdelimo v naslednje razrede:

- Raven 0: surov, neobdelan posnetek.

- Raven 1A: upoštevani radiometrični popravki zaradi variacije elementov znotraj detektorja. Popravke se računa glede na kalibracijo elementov v laboratoriju in po izstrelitvi.
- Raven 1B: radiometrično (kot raven 1A) in geometrično popravljen posnetek. Popravljeni so sistematične napake, ki nastanejo zaradi hitrega premikanja satelita in rotacije Zemlje. Projekcija na referenčni elipsoid ali horizontalno ploskev.
- Raven 2A: prevzorčen posnetek v standardno kartografsko projekcijo glede na položaj satelita v času zajema.
- Raven 2B: georeferenciran oz. ortorektificiran posnetek. Za rektifikacijo so uporabljene oslonilne točke in DMR.
- Raven 3: mozaik posnetkov in specifični produkti, za katere je bil določen instrument namenjen.

Nekateri ponudniki satelitskih posnetkov označijo ortorektificiran posnetek kot raven 3A. Tudi cene posnetkov so odvisne od ravni obdelave. Na primer, arhivski pankromatski posnetek WorldView-2 ločljivosti 0,5 m pri podjetju e-GEOS (e-GEOS, 2015) stane 14,5 \$/km² za ravni 1B ali 2A in 27,5 \$/km² za ortorektificiran posnetek (raven 2B).

V doktorski nalogi bomo kot vhodne posnetke v postopku uporabljali le posnetke ravni 1A oziroma le radiometrično popravljene posnetke. Le geometrično nepopravljeni posnetki se lahko uporabijo v izdelanem rigoroznem geometričnem modelu, ki opiše geometrijo zajema posnetka. Za ortorektifikacijo naslednjih stopenj so potrebni drugi modeli, kot je recimo RFM, ki uporabljajo racionalne polinomske koeficiente (angl. rational polynomial coefficients, RPC).

2.3 Ortorektifikacija

V doktorski disertaciji se bomo ukvarjali z ortorektifikacijo optičnih satelitskih posnetkov. Izdelava ortorektificiranih posnetkov je nujna, če želimo posnetke uporabljati za prostorske analize z uporabo različnih podatkov (npr. v geografskih informacijskih sistemih). Potreba po ortorektifikaciji satelitskih posnetkov je nastala takoj po zmožnosti snemanja satelitov v višji prostorski ločljivosti v sedemdesetih letih.

Ortorektifikacija je pretvorba posnetka v ortogonalno projekcijo na izbrano ravnino (običajno je to ravnina izbrane kartografske projekcije), kar dosežemo s procesom zmanjšanja različnih geometričnih popačenj, ki jih vsebuje izvorni (surovi) posnetek. Najpogostejši dejavniki za nastanek geometričnih popačenj so:

- orientacija senzorja,
- napake senzorja,

- kot gledanja senzorja,
- relief posnetega območja in
- ukrivljenost Zemlje.

S procesom ortorektifikacije se iz surovega posnetka izdelata ortorektificiran posnetek oz. ortoposnetek. Pri tem se uporabijo parametri notranje in zunanje orientacije, ki jih dobimo z izravnavo, in digitalni model reliefa za obravnavano območje. Po ortorektifikaciji je vsaka meritev, ki se jo opravi na ortorektificiranem posnetku, enaka meritvi, ki bi se jo opravilo na zemeljski površini (ob upoštevanju lokalnega merila, ki je odvisen od lokalnega popačenja kartografske projekcije) (Marsetič in Oštir, 2006).

Pri ortorektifikaciji se posnetek z geometrično transformacijo (georeferenciranjem ali ortorektifikacijo) umesti v izbran koordinatni sistem. Radiometrične vrednosti v ortoposnetku dobimo s prevzorčenjem vrednosti pikselov surovega posnetka. Najpogostejše tehnike prevzorčenja so metoda najbližjega sosedu, bilinearna interpolacija in kubična konvolucija. Ponavadi se za izhodni posnetek uporabi enaka velikost pikselov glede na vhodni posnetek (tolerira se 10 %–20 % razlika). S posebnimi tehnikami pa se lahko doseže tudi manjšo velikost celic brez znatnih izgub informacij in napak (BlackBridge, 2015).

2.4 Samodejna procesna veriga

Postopek samodejne ortorektifikacije optičnih satelitskih posnetkov je sestavni del samodejne procesne verige (Oštir et al., 2014), ki je bila razvita v okviru Centra odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije (Vesolje-SI). Veriga, imenovana STORM, obsega vse korake obdelave posnetkov od t.i. kalibriranega surovega posnetka (angl. sensor-corrected image), ki ga ponavadi označujemo z ravniyo 1A, do obdelanih posnetkov in izdelkov, dostopnih preko spleta. Veriga obsega:

- modul za samodejno ortorektifikacijo, ki je predmet doktorske naloge,
- modul za samodejne radiometrične popravke, ki je sestavljen iz atmosferskih (uporablja se programsko opremo ATCOR švicarskega podjetja ReSe Applications Schlöpfer) in topografskih popravkov (delujejo na osnovi modela anizotropne osvetlitve), ter
- module za samodejni izračun enostavnih izdelkov (vegetacijskega indeksa NDVI, njegovih sprememb in karto sprememb).

Iz vhodnega posnetka torej nastane več končnih tematskih izdelkov, ki se skupaj s parametri obdelave shranijo v podatkovno bazo. Na koncu procesne verige več povezanih servisov dostavlja podatke do končnih uporabnikov v obliki rastrske spletne karte.

Razvoj samodejne procesne verige se je začel leta 2011 s posnetki satelitov RapidEye, trenutno pa lahko veriga obdeluje več različnih posnetkov (RapidEye, WorldView-2, Pleiades in SPOT 6). Veriga torej podpira tako visokoločljive posnetke (prostorska ločljivost med 2 m in 20 m) kot zelo visokoločljive posnetke (prostorska ločljivost 2 m in manj). Njeno delovanje je sicer omejeno na območje Slovenije z okolico, kjer imamo na voljo vse zahtevane podatke s primerno točnostjo. Kljub temu, da je bila prvotno veriga namenjena uporabi v Sloveniji, bodo nadgradnje podpirale tudi podatke drugih držav in različne koordinatne sisteme.

Samodejni postopek ortorektifikacije je zelo pomemben člen procesne verige STORM. Namenjen je odpravljanju geometričnih popačenj in skrbi za točno pozicioniranje posnetka v izbran koordinatni sistem. Postopek je razdeljen v več korakov (slika 1). Nekateri so medsebojno zelo povezani in delujejo v iteracijah (geometrični model in izločanje grobih napak), drugi pa so samostojni in lahko tvorijo tudi samostojen modul (npr. določanje točk). Cel postopek je popolnoma samodejen in se začne izvajati, ko procesni strežnik prejme vhodni posnetek. Najprej postopek prebere metapodatke posnetka in izloči ter shrani tiste, ki se bodo uporabili v nadaljnjem poteku postopka. Sledi samodejno določanje (detekcija in merjenje koordinat) oslonilnih točk, geometrično modeliranje ter na koncu ortorektifikacija. Rezultati postopka so ortorektificiran posnetek ter podatki o obdelavi, vrednosti parametrov zunanje in notranje orientacije in dosežene točnosti teh parametrov, ki se zapišejo v tekstovno datoteko.

2.5 Povzetek in zaključki poglavja 2

Optični sateliti zajemajo podatke na različne načine in z različnimi detektorji. Trenutno se najbolj uporabljajo vrstični detektorji tipa CCD, ki zagotavljajo visoko kakovost posnetkov, vendar imajo zapleteno geometrijo snemanja in potrebujejo veliko predobdelave. Sodobni komercialni sateliti poleg detektorjev CCD večinoma uporabljajo teleskope, sestavljene iz zrcal. Majhni sateliti uporabljajo tudi polnoslikovne detektorje in teleskope, ki so večinoma sestavljeni iz leč. Čeprav so posnetki takih sistemov nekoliko slabši, se z novimi tehnološkimi rešitvami in tehnikami obdelave njihova kakovost izboljšuje.

Ponudniki posnetkov komercialnih satelitov obdelajo posnetke do različnih stopenj obdelave, od surovih neobdelanih do že georeferenciranih in celo mozaičenih posnetkov. Raven, ki jo uporabnik želi, je odvisna od namena obdelave in aplikacije. V okviru naloge je bila zahtevana raven obdelave za vhodni posnetek raven 1A oz. le radiometrično obdelan posnetek. V postopek torej vstopajo le geometrično popolnoma neobdelani posnetki.

V doktorski disertaciji se ukvarjamo s samodejno ortorektifikacijo optičnih satelitskih posnetkov, ki posnetke z ortogonalno projekcijo in upoštevanjem digitalnega modela reliefa preslika na izbrano

ravnino. Razvit postopek je zelo pomemben del samodejne procesne verige STORM, ki obsega vse korake obdelave posnetkov od posnetka ravni 1A, do obdelanih posnetkov (2B) in produktov (3), dostopnih preko spleta.

3 SAMODEJNO DOLOČANJE OSLONILNIH TOČK

Oslonilne točke (OT) so v večini metod ortorektifikacije nujne za doseganje visoke položajne točnosti ortoposnetkov. V tem poglavju je predstavljena metoda za samodejno določevanje oslonilnih točk, ki sicer večinoma ni bila razvita v okviru naloge, je pa nujna za samodejen potek celega postopka. Zato je v nalogi njen potek in osnovno delovanje predstavljeno bolj na kratko.

Vsi sodobni sateliti za opazovanje Zemlje so opremljeni s sistemi, ki jim določajo položaj (npr. GPS) in orientacijo (npr. sledilec zvezd oz. angl. star tracker) satelita. Omenjeni sistemi so že zelo zmogljivi in se lahko uporabijo za prostorsko pozicioniranje posnetkov. Čeprav je ta direktni način zelo preprost in hiter, pa ne daje visoko natančnih rezultatov (Poli, 2005), ki jih v določenih aplikacijah potrebujemo. Na primer, položajna točnost (CE90¹) posnetkov RapidEye ravni 1B je okoli 50 m (BlackBridge, 2015), posnetkov WorldView-2 ravni obdelave Basic (enakovredno ravni 1A) pa 5 m (DigitalGlobe, 2015a). Pri tem je treba poudariti, da so omenjeni posnetki že delno obdelani (uporabljene so tudi oslonilne točke, ki pa niso določene z visoko natančnostjo) in da navedene natančnosti veljajo le za majhne kote gledanja ter ne upoštevajo vpliva reliefa.

Ker podatki o položaju in orientaciji satelita ne dosegajo želene natančnosti, ki je uveljavljena za tradicionalne geodetske topografske izdelke, jih je treba popraviti z natančnimi referenčnimi podatki. Za najbolj primerne so se izkazale 3R točke v izbranem koordinatnem sistemu, ki ležijo na Zemljinem površju. Takim točkam pravimo oslonilne točke in so v fotogrametriji v uporabi že vrsto let, tudi za izdelavo državnega ortofota. Njihova naloga je, da povežejo vhodni surovi posnetek z referenčnimi podatki, ki so lahko v obliki rastrskih (npr. ortofoto), vektorskih (npr. podatki o cestah) ali tekstovnih podatkov (npr. niz točk z GPS-om izmerjenih koordinat). Oslonilne točke se ponavadi dobijo ročno iz referenčnih virov ali s terenskimi meritvami, kar je lahko zelo zamudno. V zadnjem obdobju so se razvile tehnike, ki točke pridobivajo polsamodejno ali celo povsem samodejno. Zaradi spremenljivosti tako vhodnih posnetkov kot referenčnih podatkov, samodejne tehnike niso povsem zanesljive za določanje oslonilnih točk. Njihova uporabnost je odvisna tudi od nadaljnjega postopka obdelave oz. geometričnega modela.

3.1 Postopek samodejnega določanja oslonilnih točk

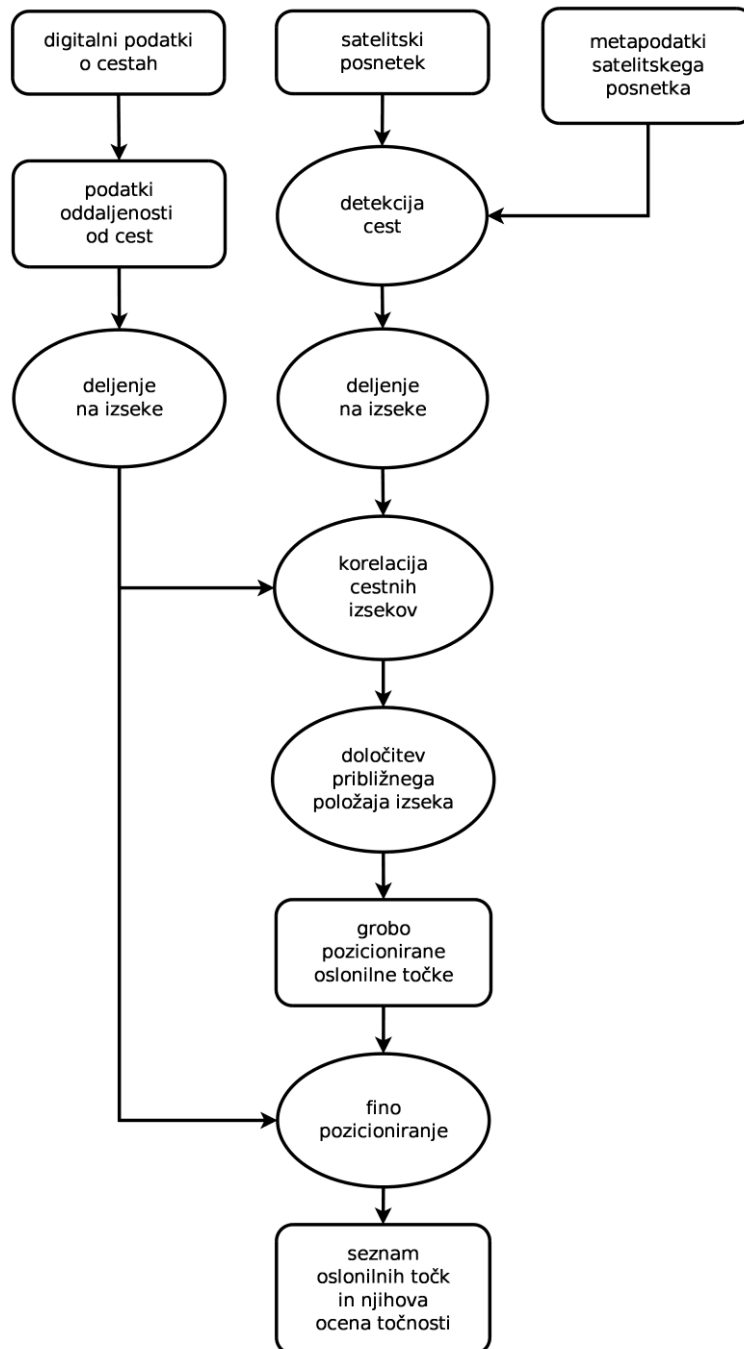
V doktorski disertaciji uporabljen postopek za samodejno določanje točk je razdeljen v dve fazi: določanje z vektorskimi podatki o cestah in določanje z državnim ortofotom (GURS, 2015a) s slikovno korelacijo po metodi najmanjših kvadratov. Visokoločljivi posnetki potrebujejo le prvo fazo, posnetki zelo visoke prostorske ločljivosti pa obe. Omenjeni postopek se je v obsežnih preizkušanjih

¹ Circular Error 90 (CE90) se uporablja za opis položajne napake, povezane z 90 % vsebine posnetka glede na uporabljene referenčne točke. Če je CE90 na primer 50 m, potem ima 90 % vsebine posnetka napako manjšo od 50 m.

izkazal kot najbolj robusten in zanesljiv. Prvotna ideja o uporabi državnega ortofota za referenco in korelacijo s satelitskimi posnetki z algoritmoma SIFT (Scale-Invariant Feature Transform; Lowe, 1999) ali SURF (Speeded Up Robust Features; Bay et al., 2008) se je zaradi prevelike časovne variabilnosti med viri in različnih prostorskih ločljivosti izkazala za neuspešno.

V okviru Centra odličnosti Vesolje-SI smo za potrebe procesne verige razvili nov postopek samodejnega določanja oslonilnih točk (Zaletelj et al., 2013), ki ga prikazuje slika 2. Postopek je plod sodelovanja med znanstveniki s Fakultete za elektrotehniko, kjer je bil algoritem tudi narejen, in znanstveniki (večinoma iz ZRC SAZU), ki smo delali na drugih delih procesne verige. Veliko rešitev je bilo posledica zelo tesne interakcije med sodelujočimi skupinami. Razvita metoda temelji na digitalnih podatkih o cestah, ki so stabilne strukture na zemeljskem površju, se redko spreminjajo, njihov položaj pa je dobro določen. Poleg tega so dobro vidne na satelitskih posnetkih in jih je možno zaznati z razmeroma preprostimi algoritmi za obdelavo slik. Metoda določanja oslonilnih točk uporablja za referenco vektorske podatke o cestah, do katerih smo lahko dostopali v okviru projekta. Za Slovenijo smo uporabili dva državna vira za digitalne podatke o cestah: podatke o cestah iz DTK5 (topografski podatki merila 1:5000; GURS, 2015b) in podatke o cestah iz ZKGJI (Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture; GURS, 2015c). Osnovni vir so bili podatki o cestah iz DTK5, ki so bili večinoma zajeti med letoma 2002 in 2008 iz stereoparov cikličnega aerosnemanja. Kljub temu, da podatki že nekaj let niso bili posodobljeni in pokrivajo le približno 60 % ozemlja Slovenije, imajo večjo gostoto in položajno točnost cest (ocenjeno na 1 m) kot drugi uporabljeni viri. Podatke smo rastrirali na podlagi atributa širine cest. Vektorske podatke o cestah iz ZKGJI smo uporabili le na območjih, kjer ni bilo podatka iz DTK5. ZKGJI je redno vzdrževan, podatki za avtoceste in pomembnejše ceste pa so pridobljeni z meritvami GPS, ki imajo deklarirano točnost pod 1 m, večinoma pa so iz državnega ortofota in imajo deklarirano točnost od 1 m do 5 m (GURS, 2015c). V ZKGJI ceste nimajo podatka o širini, zato smo jo ocenili na podlagi podatka o kategoriji cest in šele nato rastrirali. Za okoliške države smo uporabili prosto dostopne podatke organizacije OpenStreetMap (OSM; OpenStreetMap, 2015). OSM izdelujejo in dopolnjujejo prostovoljci, zato ima neznano in spremenljivo točnost (razlikuje se glede na območje). Tudi v tem primeru smo podatek o širini ocenili iz podatka o kategoriji cest.

Referenčne vektorske podatke o cestah smo torej rastrirali glede na njihovo širino in jih pripravili za uporabo v postopku. Pred začetkom iskanja korelacije med podatki o cestah in posnetkom je treba vhodne podatke dodatno obdelati. Najprej se iz posnetka odstrani oblake. Masko oblakov se lahko dobi iz histograma, v nekaterih primerih pa je dosegljiva tudi v metapodatkih. Nato se iz baze prebere le ceste, ki se prekrivajo s posnetkom in se jih razdeli na več manjših pravokotnih območij (izsekov), katerih število je odvisno od velikosti posnetka. Rastrirane podatke o cestah se za potrebe korelacije transformira v rastrske podatke oddaljenosti od cest, kjer vsaka vrednost piksla pomeni razdaljo do najbližjega cestnega piksla. Tako pripravljene cestni podatki so vhodni podatek za korelacijo.



Slika 2: Potek modula za samodejno določanje oslonilnih točk.

Figure 2: Schematic procedure of the automatic GCP extraction module.

Na vhodnem posnetku se najprej z morfološkim operatorjem top-hat, ki zaznava svetle linije, izloči ceste. Čeprav je ta operator pri izločanju cest zelo uspešen, je med rezultati običajno tudi nekaj napačnih detekcij in manjkajočih cestnih odsekov, ki otežujejo natančno korelacijo z referenčnimi cestami. Kljub temu je količina napačnih detekcij oz. nezaznanih cest majhna in v večini primerov ne vpliva na nadaljnji postopek. Nato se detektirane ceste zasuka za kot, ki je izračunan iz metapodatkov

posnetka in predstavlja azimut tirnice satelita. Po zasuku so referenčne in detektirane ceste približno poravnane.

Pripravi cest sledi poravnava po izsekih v več korakih. V prvem koraku se izvede groba poravnava izsekov, s katero dobimo niz perspektivnih transformacijskih parametrov, ki povežejo koordinate pikslov na izsekih z zaznanimi cestami in izsekih s podatki oddaljenosti od cest. Devet parametrov transformacije izračunamo z uporabo parov točk. Enakomerno razporejene točke na podatkih zaznanih cest imajo koordinate $t_k = [x_k^{(t)}, y_k^{(t)}]$. Njihov predviden položaj na podatkih oddaljenosti od cest označimo z $r_k = [x_k^{(r)}, y_k^{(r)}]$. Položaj točk dobimo z izračunom korelacije med podatki zaznanih cest in podatki oddaljenosti od cest na izbranem območju ter izbiro najboljših korelacij, s katerimi dobimo kandidate točk. Korelacijo med izsekom podatkov zaznanih cest in podatkov oddaljenosti od cest se izračuna za vsak možen položaj znotraj iskalnega okna s središčem v r_k . Ta kriterij korelacije cest predstavlja povprečno razdaljo piksla zaznanih cest do najbližjega piksla oddaljenosti od cest na položaju, ki je za vrednost Δ oddaljen od r_k . Kriterij korelacije računamo z enačbo (Zaletelj et al., 2013):

$$C(r_k + \Delta) = \frac{1}{N_R} \sum_{x=0}^{s_x} \sum_{y=0}^{s_y} P(x_k^{(t)} + x, y_k^{(t)} + y) \cdot D(x_k^{(r)} + \Delta_x + x, y_k^{(r)} + \Delta_y + y), \quad (1)$$

kjer je N_R število pikslov cest na izseku in sta s_x, s_y velikosti izseka v smereh x in y .

V iskalnem oknu se pojavi več lokalnih minimumov kriterijske funkcije. Za vsako točko se izbere le nekaj položajev Δ z najboljšimi korelacijami, ki predstavljajo kandidate za končne položaje oslonilnih točk. Te dobimo z minimiziranjem razdalje, katero se izračuna s korelacijo.

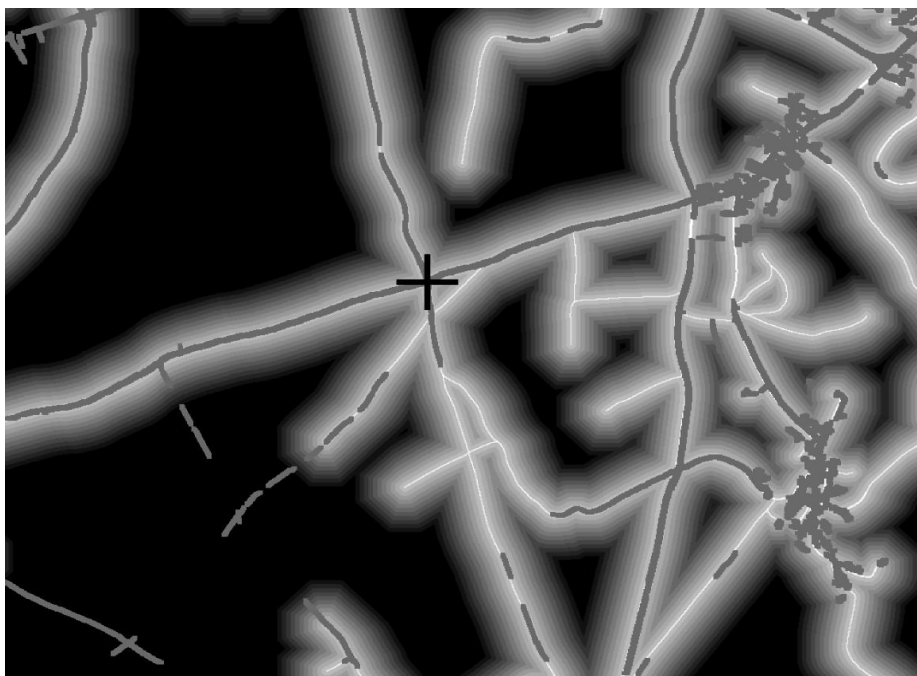
Korak se konča s preverjanjem rezultatov z vnaprej znanimi podatki o položaju, rotacijah in merilu. Drugi korak je namenjen le izsekom, ki se v prvem koraku (zaradi oblakov, majhnega števila cestnih izsekov, slabši detekciji ipd.) niso pravilno umestili. Te izseke se popravlja z rezultati sosednjih izsekov, ki imajo podobne transformacijske parametre. Parametre nepravilnih izsekov se nato ponovno preračuna in preveri njihovo natančnost. Če tudi novi parametri ne zadoščajo določeni natančnosti, se jih opusti in se jih za določanje točk ne uporablja.

Naslednji in zadnji korak je namenjen le izsekom, ki izpolnjujejo izbrano mejo natančnosti. Najprej se glede na transformacijske parametre na vsakem izseku določi izbrano število kandidatov za oslonilne točke. Točke se izbere le na križiščih cest, katerih položaj se lahko zanesljivo in nedvoumno določi in katere se ponavadi uporablja tudi pri ročnem merjenju točk. Nato se končno lokacijo oslonilnih točk določi z minimizacijo oddaljenosti zaznanih cestnih pikslov od dejanske mreže cest na manjšem iskalnem območju. Slika 3 prikazuje primer končnega položaja oslonilne točke na križišču zaznanih cest. Končni izbor primernih oslonilnih točk se izvede s preverjanjem natančnosti s kriterijem povprečne oddaljenosti cest (oddaljenost do najbližje ceste glede na povprečje vseh zaznanih cestnih

pikslov). Z določitvijo primerne praga se običajno izloči večina slabih točk z grobimi napakami; ostanejo le zelo kakovostne točke ali točke z majhnimi napakami.

Večja kot je prostorska ločljivost posnetkov, več detajlov je prisotnih na cestah, ki so pogosto široke tudi več pikslov (širina cest je lahko tudi več deset pikslov). Zato je samo uporaba metode z digitalnimi podatki o cestah premalo za natančno določanje oslonilnih točk in smo ji dodali še drugo metodo korelacije, ki uporablja državni ortofoto (DOF) in še izboljša rezultate. Ta dodatna metoda se izvaja le pri zelo visokoločljivih posnetkih in deluje na osnovi korelacije med satelitskim posnetkom in državnim ortofotom. Uporabljen državni ortofoto ima ločljivost 0,5 m in ocenjeno položajno točnost 1 m (GURS, 2015a). Na nerazgibanem terenu je točnost boljša, medtem ko je na drugih območjih lahko odstopanje tudi več metrov.

Poznamo več metod slikovne korelacije. Uporabili smo metodo slikovne korelacije najmanjših kvadratov (angl. least squares matching, LSM), ki modelira ujemanje med dvema izsekoma posnetkov s šest parametrično (afino) transformacijo. Radiometrične vrednosti izseka prvega posnetka privzamemo kot opazovanja, medtem ko radiometrične vrednosti izseka drugega posnetka kot konstante. Metoda temelji na izravnavi po metodi najmanjših kvadratov, ki je prikazana v poglavju 4.3.1.



Slika 3: Položaj samodejno določene oslonilne točke. Točka se nahaja na križišču izseka zaznanih cest (siva), v ozadju pa je prikazan izsek podatkov oddaljenosti od cest.

Figure 3: Automatically selected GCP on the detected road patch (grey intersection) registered on the road distance image in the background.

Raziskave so pokazale, da korelacija najmanjših kvadratov konvergira le, če je že začetno ujemanje med izsekoma slik znotraj nekaj pikslov (Schenk, 1999). Zaradi tega se metodo LSM uporablja le za izboljšanje rezultatov, ne pa za korelacijo med surovimi podatki. Če uporabljamo surove podatke, je korelacija uspešna le v primeru uporabe slikovnih piramid. V našem primeru imamo približno ujemanje zagotovljeno že s korelacijo z digitalnimi podatki o cestah, zaradi česar je metoda LSM zelo primerna za naše potrebe.

Po končanem zadnjem koraku se izbrane oslonilne točke zapišejo v tekstovno datoteko. Vsaka točka v seznamu je sestavljena iz oznake, pikseljskih koordinat, projekcijskih (prostorskih) koordinat in ocene točnosti, ki temelji na kriteriju povprečne oddaljenosti cest. Približno število zelenih oslonilnih točk se sicer poda že pred začetkom obdelave, vendar je končno število odvisno predvsem od količine oblakov in prisotnosti ter razporeditve cestnega omrežja.

3.2 Povzetek in zaključki poglavja 3

Modul za samodejno določitev oslonilnih točk izdelava datoteko s koordinatami izbranih točk, ki so vhodni podatek za geometrični model. Deluje v dveh korakih: prvi detektira točke na podlagi rastriranih vektorskih podatkih o cestah, drugi pa dodatno izboljša položaj dobljenih točk z državnim ortofotom. V prvem koraku dobimo točke s korelacijo med izseki z zaznanimi cestami iz satelitskega posnetka in izseki z referenčnimi rastrskimi podatki oddaljenosti od cest. Drugi korak popravi položaj točk s korelacijo izsekov satelitskega posnetka in ortofota. Zaradi različne prostorske ločljivosti posnetkov se v primeru visokoločljivih posnetkov izvede le prvi korak, medtem ko se pri zelo visokoločljivih posnetkih izvedeta oba.

Modul je bil namensko izdelan za delovanje v postopku ortorektifikacije, ki je opisan v doktorski disertaciji. Rezultati delovanja modula so prikazani v osmem poglavju, ki je namenjeno preizkušanju celotnega postopka.

4 GEOMETRIČNI MODELI SENZORJEV

Za izdelavo ortoposnetkov z visoko položajno točnostjo je potrebno uporabiti geometrični model, ki čimbolj natančno opiše geometrijo zajema posnetka. Geometrija zajema je odvisna od izvedbe snemalnega sistema; različne izvedbe so opisane v prvem podpoglavju. Sledi opis sistematičnih napak oslonilnih točk, ki so posledica atmosferske refrakcije in ukrivljenosti Zemlje. V tretjem in četrtem podpoglavju sta podrobno opisani izvedbi geometričnega modela za vrstične in polnoslikovne snemalne sisteme, ki sta bili izdelani v doktorski disertaciji. Prikazani so sestavni deli geometričnega modela, ki vključuje tudi samodejno izločanje grobih napak v dveh korakih.

Razvitih je bilo že več različnih geometričnih modelov za različne satelite (podrobnejši opis v poglavju 1.1.1). Nekateri geometrični modeli so bili narejeni in prilagojeni le za posamične satelite, veliko pa je bilo poskusov izdelave splošnega geometričnega modela za vse primere, ki uporabljajo določen tip senzorja (npr. vrstični, polnoslikovni, točkovni). Geometrični modeli se delijo glede na uporabljen tip senzorja in glede na vrsto uporabljenih podatkov. T.i. direktni (neposredni) modeli izračunajo parametre zunanje orientacije samo iz podatkov predvidene tirnice satelita in vrednosti meritev položaja in orientacije satelita z enotami GPS in sledilci zvezd. Vrednosti meritev se pred izračunom parametrov interpolirajo na čas snemanja vrstic pri vrstičnem senzorju ali celotnega posnetka pri polnoslikovnem senzorju. Sam izračun je hiter, vendar zaradi netočnih meritev rezultati še ne dosegajo želenih natančnosti. Drugi tip geometričnih modelov so t.i. indirektni (posredni) modeli, ki delujejo z oslonilnimi točkami in so še vedno najbolj uporabljen način izračuna parametrov zunanje orientacije posnetkov. Čeprav je iskanje oslonilnih točk lahko dolgotrajen proces in izračun modela zahtevnejši, so rezultati zelo natančni in primerni tudi za najzahtevnejše namene uporabe. Z indirektnimi modeli je mogoče tudi zelo natančno določanje in popravljanje parametrov notranje orientacije (npr. goriščna razdalja, položaj in oblika detektorja ipd.), ki pa so ponavadi že zelo natančno kalibrirani (v laboratoriju in tudi že v tirnici – angl. in-flight) in jih običajno dobimo v metapodatkih posnetka.

Doktorska disertacija se osredotoča na dve izvedbi geometričnega modela, ki sta bili izdelani za delo z vrstičnimi ali polnoslikovnimi senzorji. Samo jedro delovanja modela je bilo izbrano iz množice že razvitih modelov. Končna izbira je bila narejena na podlagi stopnje splošnosti, enostavnosti in doseženih točnosti modela. Izbrano jedro modela smo nato dopolnili in mu dodali funkcionalnosti za obdelavo podatkov v samodejnem postopku ortorektifikacije. Obe izvedbi modela sta indirektni in splošni, kar pomeni, da delujeta le z oslonilnimi točkami in sta prilagojeni za modeliranje geometrije vseh snemalnih sistemov, ki snemajo v vrstičnem ali polnoslikovnem načinu.

4.1 Senzorji na satelitih za opazovanje Zemlje

Večina satelitov za opazovanje Zemlje uporablja eno od treh vrst snemalnih sistemov: prečni (angl. whiskbroom), vzdolžni (angl. pushbroom) in polnoslikovni (angl. fullframe). Vsaka vrsta snemalnega sistema pa za svoje delovanje potrebuje določeno obliko detektorja (CCD ali CMOS).

4.1.1 Točkovni senzorji

Prečni snemalni sistemi oz. t.i. prečni skenerji Zemljo snemajo z zaporedji vrstic, ki so pravokotne na smer gibanja platforme. Vsako vrstico zabeležijo s premikanjem senzorja z ene strani na drugo, pri čemer uporabljajo nihajoče ali vrteče se zrcalo. Ker se nosilna platforma (satelit) premika naprej, lahko z zaporednimi vrsticami sestavimo dvorazsežni posnetek površine Zemlje (Oštir, 2006). Prečni snemalni sistemi uporabljajo točkovni (angl. point-based) detektor, ki ima malo elementov in jih je zaradi tega tudi lažje kalibrirati in vzdrževati. Glavna omejitev prečnih sistemov je omejeni čas za branje detektorja, saj se ogledalo zelo hitro premika. Za doseg zadostnega razmerja signal-šum (angl. signal-to-noise ratio) imajo taki sistemi precej široke spektralne kanale, zaradi kompleksnosti sistema in veliko premikajočih se delov pa so sateliti, opremljeni s prečnimi skenerji, večji in težji. Znani snemalni sistemi, ki uporabljajo (ali so uporabljali) točkovne senzorje, so MSS, TM in ETM+ na satelitih Landsat, AVHRR na satelitih POES in SeaWiFS na satelitu SeaStar. Zaradi omenjenih omejitev se za opazovanje Zemlje v visoki prostorski ločljivosti prečnih snemalnih sistemov ne uporablja.

4.1.2 Vrstični senzorji

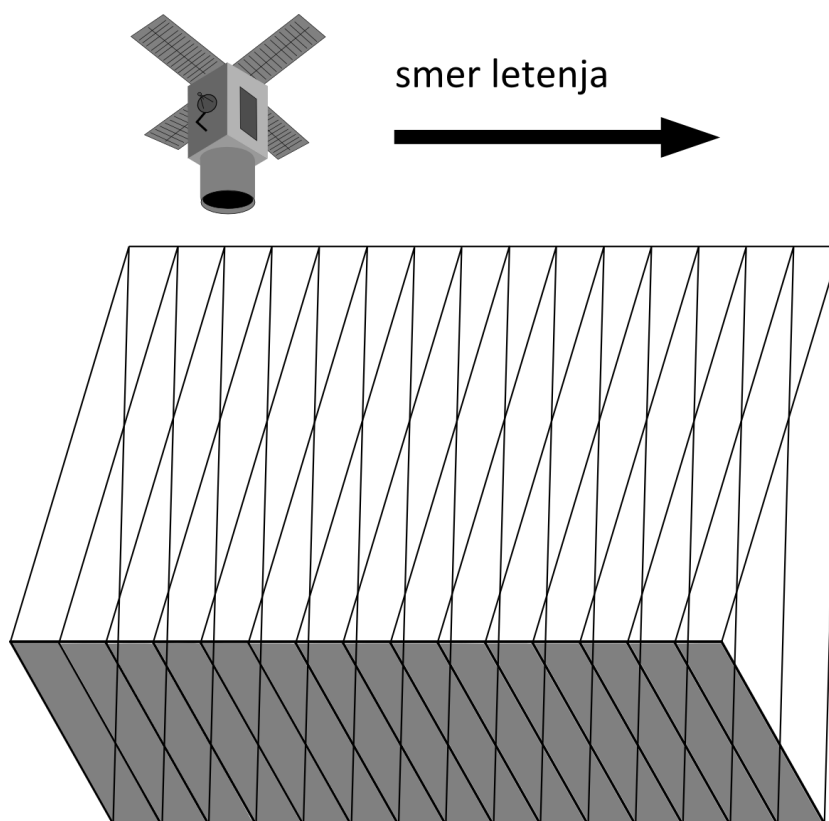
Vzdolžni sistemi oz. skenerji uporabljajo vrstične detektorje, ki so sestavljeni iz vrste elementov, ki se nahajajo v goriščni razdalji snemalnega sistema. Ker je majhne detektorje (nekaj cm) za vesoljske potrebe težko izdelati, je število elementov v vrsti omejeno. Zaradi tega je lahko na goriščni ravnini tudi več detektorjev z več tisoč elementi, ki so lahko razporejeni tudi v več nivojih. Dobljene posnetke posameznih detektorjev se kasneje združi v "umeten posnetek", ki je osnova za posnetek ravni obdelave 1A.

Vzdolžni snemalni sistemi naenkrat zajamejo celotno vrstico na Zemlji in z izkoriščanjem gibanja snemalnega sistema ustvarijo posnetek v smeri gibanja (slika 4). Ker njihovo delovanje spominja na pometanje z metlo, vzdolžne skenerje včasih imenujemo tudi pometajoči. Vsak kanal potrebuje poseben sistem detektorjev. Ti zaznavajo svetlobo (energijo) po vrsticah, jo nato spremenijo v električne impulze in pretvorijo v digitalno obliko (Oštir, 2006). Registriranje količine naboja in "praznjenje" detektorja mora biti dovolj hitro, da dovoli neodvisno sprejemanje svetlobe za naslednjo

vrstico. Čas, ki ga porabi sistem za snemanje ene vrstice, imenujemo čas integracije (angl. integration time). Ker je velikost elementov na novejših detektorjih že zelo majhna, čas integracije pa kratek, detektorji zaznajo zelo malo svetlobe. Če občutljivost detektorjev ni dovolj velika za doseganje potrebnega razmerja signal-šum, obstajata dve možnosti za premostitve te ovire (Sandau, 2004):

- uporaba tehnologije TDI (angl. Time Delay and Integration),
- ali uporaba t.i. načina upočasnjevanja (angl. slow-down mode), ki zmanjša hitrost premikanja projekcije vrstice na površju glede na hitrost satelita.

Zaradi enostavnosti in zanesljivosti se v sodobnih satelitih večinoma uporablja tehnologija TDI, ki temelji na večkratnem zajemu iste vrstice oz. z zajemom v več stopnjah (angl. TDI stages). Vsaka stopnja podaljša čas zaznavanja svetlobe na detektorju. Od števila stopenj je odvisna tudi izboljšava razmerja signal-šum.



Slika 4: Zajem posnetka z vrstičnim sistemom.

Figure 4: Linear sensor image acquisition.

Vzdolžni sistemi imajo več prednosti v primerjavi s prečnimi sistemi. Množica elementov detektorja omogoča vsakemu od njih, da dlje časa opazuje površino pod seboj. Tako lahko detektor zazna več

svetlobe, kar omogoča manjše vidno polje (angl. field of view) in ožje spektralne pasove, zato lahko s takimi detektorji dosežemo boljšo prostorsko in spektralno ločljivost. Detektorji so preproste mikroelektronske naprave, ki so majhne, lahke in zahtevajo malo energije. Poleg tega nimajo gibljivih delov, zaradi česar so bolj zanesljivi, manj občutljivi na mehanske okvare in imajo daljšo življenjsko dobo. Po drugi strani pa moramo umeriti več tisoč elementov detektorja, da lahko dosežemo enakomerno občutljivost po celotnem posnetku (Oštir, 2006).

Trenutno vzdolžne snemalne sisteme uporabljajo skoraj vsi boljši sateliti za opazovanje Zemlje, kot so na primer WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, GeoEye, Pleiades, QuickBird ipd.

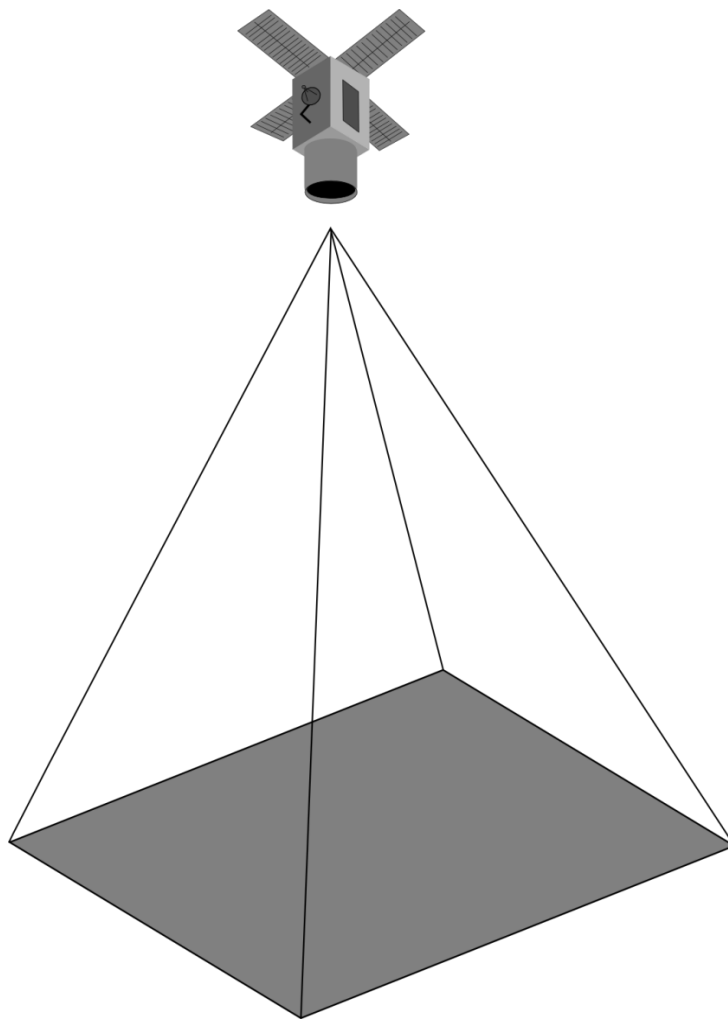
4.1.3 Polnoslikovni senzorji

Polnoslikovni detektorji imajo obliko pravokotne matrike, kjer je vsak element matrike tudi element detektorja. Pri snemanju vsi elementi detektorja sprejmejo svetlobo v istem trenutku. Na ta način celoten posnetek nastane v enem času integracije, ki je zelo kratek (običajno pa daljši kot pri vrstičnih senzorjih). Posnetki se zajamejo v centralni projekciji z enim samim perspektivnim centrom (slika 5). Zaradi tega je posnetek nepopačen le v nadirju, v vseh smereh od te točke pa se popačenja povečujejo z naraščanjem oddaljenosti. Popačenja so manjša, če je posnetek pridobljen iz visoke višine leta in ima ozko vidno polje. Prav te lastnosti lahko izkoriščajo sateliti.

Polnoslikovni senzorji so se do pred kratkim pretežno uporabljali le pri letalskih snemanjih. Z uveljavitvijo novih in izpopolnjenih tehnologij ter miniaturizacijo komponent pa so se začeli uporabljati tudi na majhnih satelitih. Najprej se je na majhnih satelitih uporabljalo kar detektorje in optiko sodobnih digitalnih fotoaparatorov, s katerimi pa se je dobilo slabšo prostorsko ločljivost. V zadnjih letih se specializirane polnoslikovne detektorje uporablja tudi v visokoločljivih snemalnih sistemih (Grocott et al., 2013), ki dokazujejo, da se bo njihova uporaba v bodočih misijah še povečala.

Glavna prednost pred drugimi vrstami snemalnih sistemov je njihova enostavnost in zmožnost vgradnje tudi v majhne satelite. Z njimi je iz vesolja možno tudi zajemanje videa. Kljub temu je za izdelavo profesionalnega sistema z (zelo) visoko prostorsko ločljivostjo in dobrim razmerjem signal-šum potreben kakovosten teleskop in natančno umerjanje detektorja.

Primer satelita s polnoslikovnim sistemom je tudi prvi slovenski satelit, ki bo predvidoma izstreljen leta 2016. Ta majhen satelit bo letel na višini 600 km, imel bo maso okoli 70 kg in bo nosil dva snemalna sistema: visokoločljiv sistem z ločljivostjo 2,8 m in štirimi kanali ter srednjeločljiv sistem z ločljivostjo 40 m. Oba sistema bosta lahko snemala tudi video z ločljivostjo 1920×1080 pikslov (Grocott et al., 2013).



Slika 5: Zajem posnetka s polnoslikovnim sistemom.

Figure 5: Fullframe sensor image acquisition.

4.2 Popravki koordinat oslonilnih točk

V doktorski disertaciji izdelana geometrična modela sta indirektna, kar pomeni, da za izračun parametrov zunanje orientacije uporabljata oslonilne točke. Oslonilne točke se določijo samodejno in v model vstopijo v obliki slikovnih (pikselskih) koordinat surovega posnetka (slikovni prostor) in objektnih (prostorskih) koordinat referenčnih podatkov (objektni prostor). Za vsako točko sta torej podana dva para položajnih koordinat. Pri modeliranju geometrični model poveže položaj točke v slikovnem prostoru s homologno točko v objektnem prostoru z linearnimi povezavami kolinearnih enačb. Ker sateliti snemajo veliko območje visoko nad tlemi, zaradi ukrivljenosti Zemlje in atmosfere refrakcije uporaba linearnih povezav med točkami ni možna. Omenjena dejavnika povzročata odstopanja od matematičnega modela, ki niso naključna. Taka odstopanja spadajo med sistematične napake in se jih lahko popravi s premikom položaja točk za vrednosti obeh omenjenih vplivov. Ponavadi se popravlja le slikovni koordinati, objektni se pusti nespremenjeni. Popravki so

običajno majhni, naraščajo pa z večanjem kota gledanja. Posebno pomembni so pri visokoločljivih posnetkih, kjer lahko majhno odstopanje pomeni veliko izgubo točnosti. Sistematične popravke se odpravlja v obratni smeri nastanka (Mikhail et al., 2001).

4.2.1 Atmosferska refrakcija

Žarek, ki prehaja skozi atmosfero, se giblje po Snellovem zakonu. Zaradi prehoda med plastmi zraka z različno gostoto se žarek lomi do vstopa v snemalni sistem. Zaradi tega sistematičnega vpliva je opazovana točka premaknjena glede na njen pravi položaj. Popravek zaradi atmosferske refrakcije dobimo po postopku, ki ga je opisal Noerdlinger (1999).

Če točko P na površju Zemlje opazujemo iz točke D na satelitu, v resnici vidimo točko P' , ki je za razdaljo d premaknjena od njenega pravega položaja (slika 6). Razdalja d pomeni tudi popravek koordinat, ki jih dobimo iz surovega posnetka. Pri izračunu popravkov so pomembni trije zenitni koti:

- zenitni kot Z_0 , ki je kot med navpičnico na točki P in idealnim žarkom, na katerega ne vpliva refrakcija,
- zenitni kot Z , ki je kot med navpičnico na točki P' in idealnim žarkom, na katerega ne vpliva refrakcija ter
- zenitni kot Z' , ki je kot med normalo na točki P' in žarkom pod vplivom refrakcije.

Kot Z_0 dobimo iz metapodatkov o kotu gledanja satelita, za izračun popravka pa rabimo ostala dva kota. Premik zaradi refrakcije izračunamo z enačbo:

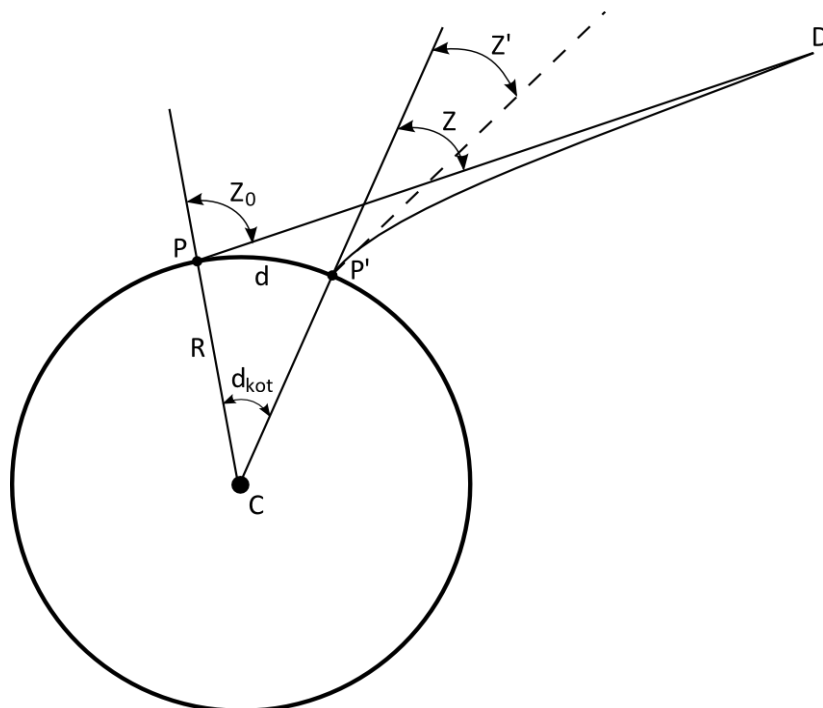
$$d = R \cdot (Z_0 - Z), \quad (2)$$

kjer je R radij Zemlje, razlika med zenitnimi koti pa je podana v radianih.

Če predpostavimo, da je atmosferski model sferično simetričen, lahko kot Z' izračunamo kot funkcijo kota Z_0 :

$$Z' = \arcsin\left(\frac{\sin(Z_0)}{\mu_0}\right), \quad (3)$$

kjer je μ_0 lomni količnik v točki P' .



Slika 6: Geometrični prikaz atmosfarske refrakcije.

Figure 6: Geometric presentation of atmospheric refraction.

Ker sta pri satelitskih posnetkih kota Z in Z_0 zelo majhna, lahko predpostavimo, da je atmosfera v območju posnetka vzporedna z ravnim površjem in z atmosfarsko višino homogene gostote (angl. homogeneous atmospheric density scale height) $W=8592$ m (glede na vrednosti v Allen, 1973).

Kot Z dobimo s kotom Z' in refrakcijo kot jo je predlagal Allen (1973):

$$Z = Z' + \frac{\mu - 1}{1 + \frac{W}{R}} \cdot (\tan Z' - 0,00117 * (\tan Z')^3), \quad (4)$$

kjer je W atmosfarska višina homogene gostote in μ lomni količnik, ki je definiran kot:

$$\mu = 1 + (\mu_0 - 1) \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (5)$$

kjer je ρ/ρ_0 razmerje med gostoto atmosfere in gostoto na morski gladini ter se ga lahko dobi iz atmosfarskega modela.

Vrednosti atmosfarske refrakcije na morski gladini in izhajajoči linearni premiki so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Vrednosti atmosferske refrakcije na morski gladini (Noerdlinger, 1999).

Table 1: Atmospheric refraction values at sea level (Noerdlinger, 1999).

Zenitni kot v vesolju Z_0 [°]	Zenitni kot na površju Z' [°]	Atmosferska refrakcija ($Z_0 - Z'$) [°]	Linearni premik d [m]
10	9,9971	0,0029	0,55
20	19,9939	0,0061	1,22
30	29,9904	0,0096	2,22
40	39,9860	0,0140	3,98
45	44,9834	0,0166	5,46
50	49,9802	0,0198	7,73
55	54,9762	0,0238	11,40
60	59,9712	0,0288	17,85
65	64,9643	0,0357	30,37

4.2.2 Ukrivljenost Zemlje

Zaradi ukrivljenosti Zemlje je opazovana točka prikazana bližje nadirju kot je v resnici. Popravek ukrivljenosti Zemlje računamo po enačbi (Mikhail et al., 2001):

$$d_E = \frac{r^3 \cdot H}{2 \cdot f^2 \cdot R} \quad (6)$$

kjer je d_E popravek koordinate, H je višina orbite satelita, f je goriščna razdalja, R je radij Zemlje in r je razdalja od centra posnetka do točke na detektorju.

4.3 Geometrični model vrstičnega senzorja

V okviru doktorske disertacije smo najprej izdelali geometrični model za vrstične senzorje oz. snemalne sisteme. Implementiran geometrični model je vrsta matematičnega modela, ki poskuša oceniti fizično realnost pri snemanju satelitskih posnetkov. Kot vsak matematični model je razdeljen na funkcionalni in stohastični model. Funkcionalni model v splošnem določa fizične lastnosti, stohastični pa verjetnostne lastnosti. Oba modela povežemo in iz vrednotimo v postopku izravnave.

4.3.1 Izravnava po metodi najmanjših kvadratov

Matematični model povezuje opazovanja s količinami, ki nas zanimajo (neznanke). Za izračun zahtevanih neznank moramo določiti minimalno število spremenljivk, ki jih potrebujemo za enolično določitev modela. V primeru, da rešujemo model z minimalnim številom opazovanj, lahko napaka kateregakoli opazovanja povzroči napačne vrednosti iskanih neznank. Zaradi tega vedno uporabimo več opazovanj (nadštevilna opazovanja), kot jih je za enolično določitev modela nujno potrebnih. V

primeru, ko imamo nadštevilna opazovanja, moramo za pridobitev enolične rešitve uporabiti izravnavo. Med vsemi metodami izravnav se je zaradi splošnosti in sistematičnosti najbolj uveljavila metoda najmanjših kvadratov (MNK). Metoda temelji na iskanju množice popravkov opazovanj, ki ima najmanjšo vsoto kvadratov popravkov. Izravnana opazovanja morajo poleg prileganja modelu zagotavljati tudi pogoj minimalne vsote kvadratov odgovarjajočih popravkov.

Izravnavo po metodi najmanjših kvadratov lahko računamo z različnimi tehnikami. Najbolj pogosti sta tehniki pogojne in posredne izravnave. V splošnem so vse tehnike izravnave po MNK enakovredne in zagotavljajo identične rezultate, kljub temu se v fotogrametriji najbolj pogosto uporablja tehnika posredne izravnave. Pri tej tehniki je število enačb popravkov enako skupnemu številu opazovanj (vsaka enačba vsebuje samo eno opazovanje). Ker je število pogojev enako številu nadštevilnih opazovanj, tehnika posredne izravnave vključuje dodatne spremenljivke oz. t.i. neznanke. Neznanke so količine, ki nimajo vnaprej znane vrednosti in se določijo šele v postopku izravnave. Splošno obliko enačb popravkov v izravnavi posrednih opazovanj po MNK lahko zapišemo v matrični obliki kot:

$$v + B\Delta = f, \quad (7)$$

kjer je v vektor popravkov, B matrika koeficientov, Δ vektor neznank in f vektor opazovanj. Če označimo število opazovanj z n in neznanke z u , ima matrika B dimenzije $n \times u$, vektor Δ dimenzije $u \times 1$, vektorja v in f pa $n \times 1$.

Zaradi različne natančnosti opazovanj je potrebno v izravnavo uvesti pojem uteži. Utež opazovanja se določi glede na njegovo natančnost, ki je ponavadi podana z vrednostjo variance σ^2 ali standardnega odklona σ . Visoka natančnost pomeni majhno varianco in obratno. Ker je vrednost variance nasprotna natančnosti, je utež opazovanja definirana kot količina, ki je obratno sorazmerna varianci:

$$p = \frac{k}{\sigma^2}, \quad (8)$$

kjer je p utež, k pa poljubna konstanta. Za vrednost konstante se večkrat uporabi kar referenčno oz. a-priori varianco σ_0^2 .

Ko imamo opravka z več opazovanji, so lahko le-ta medsebojno odvisna oziroma korelirana. To odvisnost med pari opazovanj označimo s kovariancami. V primeru neodvisnih opazovanj se lahko uteži opazovanj združi v diagonalno matriko uteži opazovanj P , ki se jo nato vključi v izravnavo za končno določitev iskanih količin (neznank).

Z matrično obliko enačb popravkov se vektor neznank določi z minimumom kvadratov popravkov:

$$v^T P v(\min) = (f - B\Delta)^T P (f - B\Delta) \quad (9)$$

z rešitvijo:

$$\Delta = (B^T PB)^{-1} (B^T Pf). \quad (10)$$

Enačbo (10) lahko zapišemo tudi v obliki linearnega sistema:

$$\Delta = N^{-1}t, \quad (11)$$

kjer je N matrika koeficientov normalnih enačb, t pa vektor konstantnih členov z enačbama:

$$N = B^T PB \text{ in} \quad (12)$$

$$t = B^T Pf. \quad (13)$$

Pred izračuni se neznankam določi približne vrednosti, med izravnavo pa se izračuna le njihove popravke. Po prvi izravnavi se dobi le prve ocene neznank. Za pridobitev točnih vrednosti je treba postopek večkrat iterativno ponoviti. Ocenjene neznanke prejšnje iteracije se uporabi kot približke vrednosti neznank za novo iteracijo. Postopek se ponavlja, dokler popravki približnih vrednosti neznank ne izpolnijo vnaprej postavljenih mejnih vrednosti, ki se lahko nanašajo na popravke približnih vrednosti neznank, popravke opazovanj ali varianco a-posteriori.

4.3.2 Funkcionalni model

V večini primerov, ki se uporabljajo v fotogrametriji, je funkcionalni model izražen s kolinearnimi enačbami. S kolinearnimi enačbami lahko povežemo slikovne koordinate točke digitalnega posnetka s homologno točko s prostorskimi koordinatami (Mikhail et al., 2001):

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{m_{11} \cdot (X - X_S) + m_{12} \cdot (Y - Y_S) + m_{13} \cdot (Z - Z_S)}{m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S)} \\ y &= -f \frac{m_{21} \cdot (X - X_S) + m_{22} \cdot (Y - Y_S) + m_{23} \cdot (Z - Z_S)}{m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S)}, \end{aligned} \quad (14)$$

kjer so X , Y in Z koordinate točke v prostorskem (objektnem) koordinatnem sistemu; X_S , Y_S in Z_S so koordinate perspektivnega centra v prostorskem koordinatnem sistemu; x in y sta koordinati točke v slikovnem koordinatnem sistemu; m_{xy} so elementi rotacijske matrike za rotacijo iz slikovnega v prostorski koordinatni sistem in f je goriščna razdalja.

Enačbi (14) lahko zapišemo tudi kot:

$$\begin{aligned}x &= -f \frac{Nx}{D} \\y &= -f \frac{Ny}{D},\end{aligned}\tag{15}$$

kjer so:

$$\begin{aligned}Nx &= m_{11} \cdot (X - X_S) + m_{12} \cdot (Y - Y_S) + m_{13} \cdot (Z - Z_S) \\Ny &= m_{21} \cdot (X - X_S) + m_{22} \cdot (Y - Y_S) + m_{23} \cdot (Z - Z_S) \\D &= m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S).\end{aligned}\tag{16}$$

Rotacijska matrika je oblike:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},\tag{17}$$

kjer imajo elementi vrednosti:

$$\begin{aligned}m_{11} &= \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) \\m_{12} &= \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) \\m_{13} &= -\sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\varphi) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) \\m_{21} &= -\cos(\varphi) \cdot \sin(\kappa) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) \\m_{22} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) \\m_{23} &= \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) + \cos(\varphi) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) \\m_{31} &= \sin(\varphi) \cdot \cos(\omega) \\m_{32} &= -\sin(\omega) \\m_{33} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi).\end{aligned}\tag{18}$$

Ker snemalni sistemi uporabljajo različne vrste senzorjev in načine snemanja, se geometrični modeli, kljub temu, da temeljijo na enakih enačbah, med seboj razlikujejo glede števila parametrov, kompleksnosti izračunov ipd. Zaradi snemanja posnetka po vrsticah, ki lahko traja več sekund, je geometrični model vrstičnega senzorja zelo zapleten.

V okviru doktorske disertacije je bil izdelan splošen in rigorozen geometrični model za vrstične senzorje. S pravilno predpripravo metapodatkov model deluje praktično z vsemi snemalnimi sistemi sodobnih satelitov, ki uporabljajo vrstične senzorje. Poleg tega model rigorozno (fizično) opiše razmerje med posnetkom in objektnim prostorom s kolinearnimi enačbami.

Uporabljen geometrični model vrstičnega senzorja ima 24 parametrov zunanje orientacije, ki v modelu nastopajo kot neznanke. Ker imajo sodobni sateliti z vrstičnim snemanjem zelo stabilno notranjo orientacijo (Grodecki in Dial, 2003), lahko parametre notranje orientacije obravnavamo kot konstante

in se med izravnavo ne spreminjajo. Njihove vrednosti so rezultat natančnih kalibracij in jih dobimo v metapodatkih.

Geometrični model vrstičnega senzorja je podrobno opisan v naslednjih podglavjih.

4.3.2.1 Modeliranje zunanje orientacije

Zunanjo orientacijo senzorja, ki pove položaj in orientacijo senzorja v času snemanja, smo modelirali z odsekovnimi polinomskimi funkcijami (angl. piecewise polynomial functions), ki so odvisne od časa. Pri tem se tirnica, ki jo satelit preleti v času snemanja posnetka, razdeli na več medsebojno povezanih odsekov. V geometričnem modelu smo uporabili dva odseka (slika 7), za katera Poli (2005) navaja, da sta optimalna za doseg natančnih rezultatov za večino satelitskih sistemov z vrstičnimi senzorji. V vsakem odseku oz. segmentu se parametre zunanje orientacije modelira s šestimi enačbami, ki vsebujejo 12 parametrov. Tri enačbe, ki definirajo položaj satelita, so v obliki polinomskih funkcij drugega reda in so odvisne od časa t , ostale so konstantne. Enačbe imajo konstantne $(X_0, Y_0, Z_0, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0)$, linearne (X_1, Y_1, Z_1) in kvadratne (X_2, Y_2, Z_2) člene:

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0 + X_1 t + X_2 t^2 \\ Y(t) &= Y_0 + Y_1 t + Y_2 t^2 \\ Z(t) &= Z_0 + Z_1 t + Z_2 t^2 \\ \omega &= \omega_0 \\ \varphi &= \varphi_0 \\ \kappa &= \kappa_0, \end{aligned} \tag{19}$$

pri čemer se čas t izračuna iz enačbe:

$$t = \frac{t_v - t_{zač}}{t_{kon} - t_{zač}}, \tag{20}$$

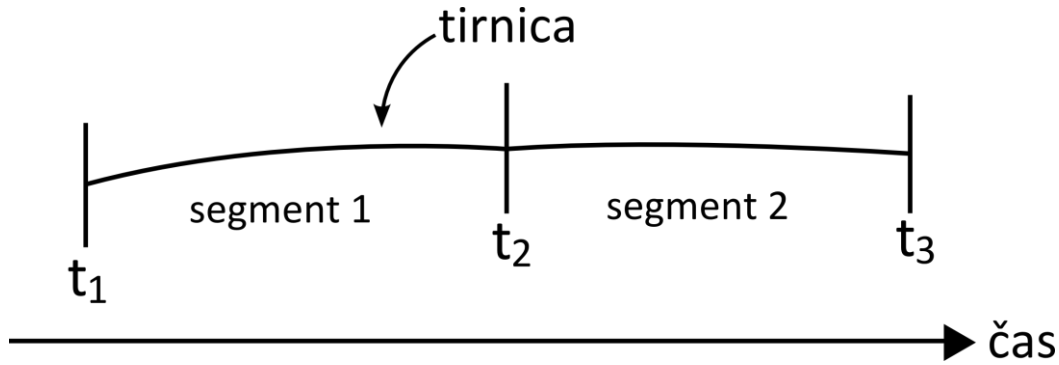
kjer je t_{kon} čas na koncu segmenta, $t_{zač}$ čas na začetku segmenta in t_v čas vrstice.

Parametri orientacije se v času snemanja praktično ne spremenijo in jih lahko obravnavamo kot konstantne.

V točki, kjer se segmenta spojita, je treba zagotoviti zveznost tirnice. Zvezno nadaljevanje se zagotovi z enačenjem vrednosti funkcij ter njihovih prvih in drugih odvodov.

Da zagotovimo zveznost tirnice, morajo imeti funkcije na koncu prvega in na začetku drugega segmenta enako vrednost. Če enačimo funkciji segmentov 1 in 2 za X , dobimo (Poli, 2005):

$$X_0^1 + X_1^1 t + X_2^1 t^2 = X_0^2 + X_1^2 t + X_2^2 t^2. \tag{21}$$



Slika 7: Modeliranje tirnice z dvema segmentoma. V praksi je prehod med segmentoma veliko bolj gladek, kot je prikazano na sliki, kar zagotovimo z enačenjem vrednosti funkcij segmentov ter njihovih prvih in drugih odvodov.

Figure 7: Orbit modelling with two segments. In practice, the transition between segments is more smooth than shown in the figure, which is ensured by equating the segment functions and their first and second derivatives.

Če pri tem upoštevamo, da je ob koncu segmenta 1 $t=1$ in na začetku segmenta 2 $t=0$, dobimo:

$$X_0^1 + X_1^1 + X_2^1 = X_0^2. \quad (22)$$

Po enakem principu dobimo enačbe za vse parametre zunanje orientacije:

$$\begin{aligned} X_0^1 + X_1^1 + X_2^1 &= X_0^2 \\ Y_0^1 + Y_1^1 + Y_2^1 &= Y_0^2 \\ Z_0^1 + Z_1^1 + Z_2^1 &= Z_0^2 \\ \omega_0^1 &= \omega_0^2 \\ \varphi_0^1 &= \varphi_0^2 \\ \kappa_0^1 &= \kappa_0^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Za gladek in zvezen prehod enega segmenta na drugega je treba zagotoviti tudi enakost prvega in drugega odvoda funkcij zunanjih parametrov. Funkcije odvajamo po času t , zaradi česar odpadejo funkcije rotacij.

Če enačimo prve odvode funkcij segmentov 1 in 2 za X , dobimo:

$$X_1^1 + 2X_2^1 t = X_1^2 + 2X_2^2 t. \quad (24)$$

Če pri tem upoštevamo, da je ob koncu segmenta 1 $t=1$ in na začetku segmenta 2 $t=0$, dobimo:

$$X_1^1 + 2X_2^1 = X_1^2. \quad (25)$$

Po enakem principu dobimo enačbe za vse položajne parametre zunanje orientacije:

$$\begin{aligned} X_1^1 + 2X_2^1 &= X_1^2 \\ Y_1^1 + 2Y_2^1 &= Y_1^2 \\ Z_1^1 + 2Z_2^1 &= Z_1^2. \end{aligned} \quad (26)$$

Enak postopek je tudi za drugi odvod. Če enačimo druge odvode funkcij segmentov 1 in 2 za X, dobimo:

$$2X_2^1 = 2X_2^2 \quad (27)$$

oziroma:

$$X_2^1 = X_2^2. \quad (28)$$

Po enakem principu dobimo enačbe za vse položajne parametre zunanje orientacije:

$$\begin{aligned} X_2^1 &= X_2^2 \\ Y_2^1 &= Y_2^2 \\ Z_2^1 &= Z_2^2. \end{aligned} \quad (29)$$

4.3.2.2 Linearizacija

Kolinearne enačbe niso linearne glede na neznanke, zato jih moramo pred uporabo v modelu linearizirati. Linearizacija enačb poteka z razvojem funkcij v Taylorjevo vrsto, kjer ohranimo le prva dva člena (do prvega odvoda). Če je v funkciji n neznank, je Taylorjeva vrsta oblike (Kraus, 2000):

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n)_0 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)_{x_{10}} \cdot \Delta x_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)_{x_{20}} \cdot \Delta x_2 + \\ &+ \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)_{x_{n0}} \cdot \Delta x_n. \end{aligned} \quad (30)$$

V primeru kolinearnih enačb in funkcij parametrov zunanje orientacije se odvodi računajo za vse neznanke ($X_0, Y_0, Z_0, X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0$). V primeru neznanke X_0 se odvoda po x in y računata z enačbama:

$$\frac{\partial x}{\partial X_0} = \frac{\partial x}{\partial X_s} \cdot \frac{\partial X_s}{\partial X_0} \quad (31)$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_0} = \frac{\partial y}{\partial X_s} \cdot \frac{\partial X_s}{\partial X_0}. \quad (32)$$

Podobne enačbe veljajo za vse ostale neznanke. Parcialne odvode prvega člena glede na neznanke dobimo z (Kraus, 2007):

$$\frac{\partial x}{\partial X_s} = -\frac{f}{D^2}(m_{13}Nx - m_{11}D) = b_{1,1}$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_s} = -\frac{f}{D^2}(m_{23}Nx - m_{21}D) = b_{1,2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z_s} = -\frac{f}{D^2}(m_{33}Nx - m_{31}D) = b_{1,3}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega_s} = -\frac{f}{D} \left(((Y - Y_s)m_{33} - (Z - Z_s)m_{23}) \frac{Nx}{D} - (Y - Y_s)m_{31} + (Z - Z_s)m_{21} \right) = b_{1,4}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi_s} = \frac{f}{D} \left((Nx \cos \kappa - Ny \sin \kappa) \frac{Nx}{D} + D \cos \kappa \right) = b_{1,5}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \kappa_s} = -\frac{f}{D} Ny = b_{1,6} \tag{33}$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_s} = -\frac{f}{D^2}(m_{13}Ny - m_{12}D) = b_{2,1}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y_s} = -\frac{f}{D^2}(m_{23}Ny - m_{22}D) = b_{2,2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z_s} = -\frac{f}{D^2}(m_{33}Ny - m_{32}D) = b_{2,3}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega_s} = -\frac{f}{D} \left(((Y - Y_s)m_{33} - (Z - Z_s)m_{23}) \frac{Ny}{D} - (Y - Y_s)m_{32} + (Z - Z_s)m_{22} \right) = b_{2,4}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi_s} = \frac{f}{D} \left((Nx \cos \kappa - Ny \sin \kappa) \frac{Ny}{D} - D \sin \kappa \right) = b_{2,5}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \kappa_s} = \frac{f}{D} Nx = b_{2,6}.$$

Parcialni odvodi drugega člena pa so (Poli, 2005):

$$\frac{\partial X_s}{\partial X_0} = \frac{\partial Y_s}{\partial Y_0} = \frac{\partial Z_s}{\partial Z_0} = \frac{\partial \omega_s}{\partial \omega_0} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial \varphi_0} = \frac{\partial \kappa_s}{\partial \kappa_0} = 1$$

$$\mathbf{ZT}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & & & 0 & -1 & 0 \\ & & 0 & 1 & 2 & & & 0 & -1 & 0 \\ & & & & 0 & 1 & 2 & & & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{ZT}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & & & 0 & 0 & -1 \\ & & 0 & 0 & 1 & & & 0 & 0 & -1 \\ & & & & 0 & 0 & 1 & & & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Celotna matrika B ima torej dimenzije $[2 \times n + 12, 24]$ in jo zapišemo:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ ZT_0 \\ ZT_1 \\ ZT_2 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Matrika oz. vektor neznank Δ ima velikost $[24, 1]$, vektor popravkov v in vektor opazovanj f pa $[2 \times n + 12]$. V matrični obliki jih zapišemo:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{X10} \\ \Delta_{X11} \\ \dots \\ \Delta_{\varphi 20} \\ \Delta_{\kappa 20} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{OT1x} \\ v_{OT1y} \\ \dots \\ v_{ZT2y} \\ v_{ZT2z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_{OT1x} \\ f_{OT1y} \\ \dots \\ f_{ZT2y} \\ f_{ZT2z} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

4.3.3 Stohastični model

Stohastični model je del matematičnega modela, ki se nanaša na natančnost opazovanj. Vsa opravljena opazovanja se statistično spreminjajo in imajo lahko različne natančnosti. V geometričnem modelu se natančnosti opazovanj upoštevajo v obliki simetrične matrike uteži P , ki jo lahko zapišemo kot:

$$P = \sigma_0^2 \cdot \Sigma^{-1}, \quad (41)$$

kjer je Σ kovariančna matrika.

Matriko uteži, kjer ima vsaka od n točk in parametri zveznosti tirnice različno natančnost, zapišemo z:

Funkcija (44) je najmanjša, ko je njen gradient:

$$\nabla f = N\Delta - t \quad (45)$$

enak 0. Minimizacija poteka z ustvarjanjem zaporedja iskalnih smeri p_k in minimumov x_k . V vsaki iteraciji se izračuna količino α_k , ki minimizira funkcijo $f(x_k + \alpha_k p_k)$, in vrednost izraza $x_k + \alpha_k p_k$ se priredi naslednji spremenljivki x_{k+1} . Po M iteracijah se dobi minimum za celotni vektorski prostor, ki poda tudi končno rešitev sistema.

Osnovna metoda deluje samo, če je matrika N simetrična in pozitivno definitna. V vseh drugih primerih se uporablja bikonjugirano metodo, ki ima še dodatne korake in pogoje. Med drugimi mora zaporedje vektorjev p_k zadovoljiti pogoj bikonjukcije in biortogonalnosti.

Po več iteracijah metoda reševanja sistema linearnih enačb pripelje do rešitve (vrednosti neznank). Prva rešitev je v posredni izravnavi le prvi približek končne rešitve koraka izravnave. Po nadaljnjih iteracijah pa dobimo rešitev prve izravnave. Rezultati so lahko obremenjeni z grobimi napakami, ki so prisotne v opazovanjih, zato je potrebno izravnave ponavljati in napake iterativno izločati.

4.3.5 Izločanje grobih napak

Zaradi metode določanja so v samodejno določenih koordinatah oslonilnih točk večkrat prisotne napake. Če je prišlo do slabe korelacije med referenčnimi podatki o cestah in cestami, ki so bile dobljene iz satelitskih posnetkov, imajo lahko take točke grobe napake. Ker pri samodejni določitvi točk vizualna kontrola ustreznosti le-teh ni možna, moramo slabe točke izločiti samodejno v procesu izravnave. Poleg izločitve točk z grobimi napakami je za visoko natančnost rezultatov potrebna tudi določitev najboljših točk in njihova ustrezna uporaba na tak način, da imajo največji možni vpliv na končni rezultat. Zaradi takega večplastnega preizkušanja točk je geometrični model razdeljen na dva zaporedna dela: algoritem RANSAC in robustna ocena.

4.3.5.1 Algoritem RANSAC

Prvi del je namenjen izločanju oslonilnih točk z grobimi napakami. Za izločanje smo uporabili algoritem RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS), ki je že bil uporabljen za izločanje točk, na primer v programu BINGO (Kruck, 2001), uporabili pa so ga tudi pri določitvi parametrov kamere (Zhou et al., 2013). RANSAC (Fischler in Bolles, 1981) je iterativna metoda za oceno parametrov matematičnega modela iz opazovanj, ki lahko vsebujejo tudi grobe napake. Algoritem določi vrednost parametrov z verjetnostjo, ki se večja z naraščanjem števila ponovitev iteracij. RANSAC je zanesljiv tudi pri velikem številu grobih napak in velikih napakah, kjer nekatere druge metode za izločanje

grobih napak (npr. data snooping) niso uporabne. Čeprav je RANSAC zelo robustna metoda, je lahko neučinkovita, če je grobih napak več kot 50 %. Pri velikem številu grobih napak potrebujemo veliko iteracij, kar lahko vodi v počasno izvajanje. Nasploh pa je postopek težko avtomatizirati zaradi obvezne nastavitve treh začetnih parametrov: število iteracij algoritma, vrednost odstopanja opazovanja od modela in število opazovanj, ki se prilegajo modelu. Začetne vrednosti teh parametrov so odvisne predvsem od kakovosti in razporeditve točk ter uporabljenega senzorja. Zaradi tega so bile te vrednosti večinoma določene empirično in z iterativnimi postopki v modelu.

V geometričnem modelu se RANSAC izvaja v več korakih. Najprej se izvede izravnava z najmanjšim možnim številom oslonilnih točk. Za določitev 24 parametrov zunanje orientacije z uporabljenim modelom vrstičnega senzorja je potrebnih najmanj šest točk. Izmed vseh samodejno določenih točk se te točke določijo naključno. Ker se morajo izračunani parametri prilagajati celotnemu posnetku, je tudi določitev položaja osnovnih šestih točk pomembna. Zaradi tega izbira točk ni povsem naključna, ampak je podvržena posebnim pravilom. V tem koraku se iz vseh točk ustvari 100 šesteric točk, ki se jim izračunajo naslednje lastnosti:

- standardni odklon koordinat točk,
- seštevek razdalj med vsemi točkami,
- odstopanje točk od premice skozi točke in
- število točk v sredini posnetka.

Odstopanje točk od premice smo računali s statistiko hi-kvadrat (Exelis VIS, 2014):

$$\chi^2(a,b) = \sum_{i=1}^N (y_i - a - b \cdot x_i)^2, \quad (46)$$

kjer je N število opazovanj, a in b sta koeficienta premice, x in y pa koordinati točke.

Prve tri lastnosti se normalizirajo s povprečjem in standardnim odklonom rezultatov. Med vsemi skupinami šestih točk se izbere tisto, ki ima največji standardni odklon med točkami, največji seštevek razdalj med točkami, največje odstopanje hi-kvadrat od premice in ima vsaj eno točko v sredini posnetka (kvadratno območje, ki zavzema 16 % posnetka). Poskusi so pokazali, da je povprečje med rezultati prvih treh lastnosti dovolj dober pokazatelj razporeditve in zato ne potrebujemo utežnih funkcij. Zadnja lastnost je pomembna, ker se le s prvimi tremi lastnostmi običajno izberejo točke na robovih posnetka. Če točk v sredini ni, algoritem vzame najboljši rezultat prvih treh lastnosti. Postopek je torej iterativen, vendar vseeno zelo hiter in nujno potreben pri iskanju pravilne rešitve modela, posebno, če je prisotnih več grobih napak.

Prva iteracija algoritma RANSAC vzame najboljše razporejeno šesterico točk in prične z izravnavo. Izravnava poteka po modelu, ki je bil opisan v prejšnjih poglavjih in iz katerega dobimo parametre zunanje orientacije. Izračunani parametri se nato vstavijo v kolinearne enačbe, s katerimi preverimo prileganje vseh samodejno določenih točk modelu. Točke preverimo z vstavljanjem slikovnih koordinat in računanjem prostorskih koordinat, ki se nato primerjajo s koordinatami samodejno pridobljenih točk. Če je razlika koordinat znotraj določenih meja, ki so običajno za vsak senzor različne, si algoritem točko zapomni. Ko se kontrola izvede za vse točke, se preveri odstotek vseh točk, ki so znotraj predhodno določene meje. V kolikor je teh točk enako ali več kot je bilo določeno v začetnih parametrih, se ponovno izvede izravnava samo s temi točkami. Po izravnavi se izračuna natančnost v obliki standardnega odklona, ki si ga algoritem zapomni. Izračunan standardni odklon bo merilo natančnosti izravnave in referenca za vse nadaljnje iteracije, saj bo iteracija z najmanjšim standardnim odklonom oziroma njene točke ohranjene za drugi del računanja modela.

Zaradi specifičnosti senzorjev in spremenljive točnosti samodejno določenih točk je vse omenjene meje težko fiksno določiti. Odstotek dobrih točk smo določili empirično, medtem ko se meja, ki določa ustreznost točk, določa iterativno. Če po prvem izvajanju vseh iteracij število točk ne doseže ustreznega odstotka, se meja poveča in celotna obdelava ponovno izvede. Proces se lahko tudi večkrat ponovi, kar pa da običajno slabše rezultate in kaže na slabo samodejno določitev točk.

4.3.5.2 Robustna ocena

Drugi del modela uporablja samo točke, ki jih ni izločil algoritem RANSAC. Večina preostalih točk nima večjih grobih napak, ampak praviloma le manjše napake, ki jih je zelo težko izslediti. Čeprav so v večini primerov rezultati prvega dela natančni pod velikostjo dveh pikslov, se jih lahko dodatno izboljša z robustno oceno (angl. Robust estimation). Postopek robustne ocene so v fotogrametriji začeli uporabljati že v osemdesetih letih (Kubik et al., 1987), sama ideja pa se je izoblikovala v šestdesetih letih (Huber, 1964). Robustne cenilke so relativno neobčutljive na variacije porazdelitvene funkcije opazovanj in posledično na grobe in slučajne napake. V nasprotju z metodo najmanjših kvadratov robustna ocena ne minimizira kvadratov napak, ampak izbrano funkcijo napak. V fotogrametriji se izbrana funkcija uporablja za izračun uteži opazovanj glede na njihovo točnost, ki jo dobimo po vsaki izravnavi. V praksi to pomeni, da se opazovanjem z večjimi popravki iterativno zmanjšuje utež in posledično vpliv na rezultate izravnave.

V prvem delu (RANSAC) je bila matrika uteži opazovanj enotska, v drugem delu pa se sestavi glede na rezultate kriterijske funkcije (uspešnost korelacije točk) iz modula za samodejno določanje točk. Matrika predstavlja začetno stanje, ki se spreminja z vsako ponovitvijo izravnave. V primeru majhnih popravkov bodo končni parametri znani že po prvi izravnavi. Število iteracij je poleg natančnosti točk odvisno tudi od izbrane funkcije napak in meje, ki določa, kdaj je popravek dovolj velik za zmanjšanje

njegove uteži v izravnavi. Izbira prave funkcije je odvisna od več faktorjev, med katerimi je najpomembnejša točnost oslonilnih točk. Ker se slednja spreminja, smo funkcijo znova izbrali z empiričnimi testi. Vrsto utežne funkcije in njeno obliko smo izbirali med tremi različicami. Preizkusili smo (poglavje 8) Dansko metodo (Kubik et al., 1987), metodo po Kleinu (Klein in Förstner, 1984) in metodo z osnovno hiperbolično funkcijo. Danska metoda uporablja eksponentno funkcijo, nove uteži pa smo računali z (Kubik et al., 1987):

$$P_i = \exp\left(-\frac{v_i^2}{(2\sigma)^2}\right), \quad (47)$$

kjer je P_i nova utež, v popravek opazovanja in σ standardni odklon. Metoda po Kleinu deluje s hiperbolično funkcijo (Klein in Förstner, 1984):

$$P_i = P_j \frac{1}{1 + (a_i \cdot |v_i|)^d} \quad (48)$$

v kateri je:

$$a_i = \frac{\sqrt{P_j}}{4.4 \cdot \sqrt{no} \cdot \sigma}$$

$$d = 3.5 + \frac{82}{81 + Q^4} \quad (49)$$

$$Q = \frac{\sigma}{\sigma_{a-priori}},$$

P_j je stara utež in no je število nadštevilnih opazovanj. Tudi tretja preizkušena metoda deluje s hiperbolično funkcijo:

$$P_i = \frac{1}{1 + \frac{|v_i|}{\sigma}}. \quad (50)$$

Mejo, ki določa, kdaj ima opazovanje preveliko napako, smo določili pri dveh standardnih odklonih (2σ). Algoritem najprej preveri katera opazovanja imajo popravke večje od določene meje in nato letem spremeni utež glede na izbrano funkcijo. Če je popravek tudi v drugi iteraciji prevelik, se opazovanju ponovno izračuna utež. Postopek se ponavlja, dokler niso popravki vseh opazovanj znotraj meje. Na ta način se točke ne odstrani, ampak se jim le zmanjša vpliv pri izravnavi in izračunu končnih parametrov (neznank). S tem se ohrani razporeditev točk oz. večja pokritost posnetka s točkami, kar je zelo pomembno za doseganje visokih točnosti z rigoroznimi geometričnimi modeli.

4.4 Geometrični model polnoslikovnega senzorja

Za ortorektifikacijo polnoslikovnih senzorjev je bil uporabljen geometrični model, ki ne vsebuje časovne komponente. Zaradi tega je model enostavnejši od vrstičnega in računa le šest parametrov zunanje orientacije, kar je enako kot pri letalski fotogrametriji. Tudi geometrični model polnoslikovnega senzorja uporablja kolinearne enačbe, ki pa imajo dodane še parametre notranje orientacije.

4.4.1 Funkcionalni model

Funkcionalni model polnoslikovnega senzorja temelji na osnovnih kolinearnih enačbah. Razlika z vrstičnim modelom je predvsem v številu in vrsti neznank. V primeru polnoslikovnega senzorja se celoten posnetek zajame v trenutku, kar pomeni, da ima posnetek le en perspektivni center in en niz rotacij. Skupno je torej le šest parametrov zunanje orientacije – koordinate perspektivnega centra (X_S, Y_S, Z_S) in rotacije ($\omega_S, \varphi_S, \kappa_S$).

Ker imajo majhni sateliti omejen prostor za komponente, večinoma uporabljajo polnoslikovni senzor, ki zaradi enostavnosti delovanja zasede malo prostora. Ker imajo tovrstni sateliti manjši uporabni volumen, lahko pride do večjih temperaturnih razlik v ohišju in tudi slabšega odvajanja visokih temperatur. Zaradi termalne nestabilnosti se materiali krčijo in raztezajo, kar vodi tudi v spreminjanje oblike in položaja komponent. Te spremembe so sicer zelo majhne, vendar lahko vplivajo na opazovanja in kasneje na delovanje modela. Zaradi tega v modelu polnoslikovnega senzorja tudi parametre notranje orientacije obravnavamo kot neznanke. Za modeliranje notranje orientacije smo izbrali tri parametre – goriščno razdaljo f , in premik detektorja v slikovni ravnini, ki ga definirata količini x_0 in y_0 . Dopolnjena oblika kolinearnih enačb je (Mikhail et al., 2001):

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{m_{11} \cdot (X - X_S) + m_{12} \cdot (Y - Y_S) + m_{13} \cdot (Z - Z_S)}{m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S)} \\ y - y_0 &= -f \frac{m_{21} \cdot (X - X_S) + m_{22} \cdot (Y - Y_S) + m_{23} \cdot (Z - Z_S)}{m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S)}, \end{aligned} \quad (51)$$

pri čemer so parametri enaki kot pri enačbi (14).

V okviru doktorske disertacije je bil izdelan splošen in rigorozen geometrični model za polnoslikovne senzorje. S pravilno predpripravo metapodatkov lahko model deluje praktično z vsemi snemalnimi sistemi, ki uporabljajo polnoslikovne senzorje. Poleg tega model rigorozno opiše razmerje med posnetkom in objektnim prostorom s kolinearnimi enačbami.

Geometrični model polnoslikovnega senzorja je podrobno opisan v naslednjih podpoglavjih.

4.4.1.1 Linearizacija

Linearizacija kolinearnih enačb poteka enako kot v primeru vrstičnega senzorja, le da imamo pri polnoslikovnem senzorju več vrst neznank (parametre notranje in zunanje orientacije). Tokrat se parcialni odvodi računajo za devet neznank ($X_S, Y_S, Z_S, \omega_S, \varphi_S, \kappa_S, f, x_0, y_0$).

Parcialni odvodi prvega člena glede na neznanke za x in y so (Kraus, 2007):

$$\frac{\partial x}{\partial X_S} = -\frac{f}{D^2} (m_{13}Nx - m_{11}D) = b_{1,1}$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_S} = -\frac{f}{D^2} (m_{23}Nx - m_{21}D) = b_{1,2}$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z_S} = -\frac{f}{D^2} (m_{33}Nx - m_{31}D) = b_{1,3}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega_S} = -\frac{f}{D} \left(((Y - Y_S)m_{33} - (Z - Z_S)m_{23}) \frac{Nx}{D} - (Y - Y_S)m_{31} + (Z - Z_S)m_{21} \right) = b_{1,4}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi_S} = \frac{f}{D} \left((Nx \cos \kappa - Ny \sin \kappa) \frac{Nx}{D} + D \cos \kappa \right) = b_{1,5}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \kappa_S} = -\frac{f}{D} Ny = b_{1,6}$$

$$\frac{\partial x}{\partial x_0} = 1 = b_{1,7}$$

$$\frac{\partial x}{\partial y_0} = 0 = b_{1,8}$$

$$\frac{\partial x}{\partial f} = -\frac{Nx}{D} = b_{1,9}$$

$$\frac{\partial y}{\partial X_S} = -\frac{f}{D^2} (m_{13}Ny - m_{12}D) = b_{2,1} \tag{52}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y_S} = -\frac{f}{D^2} (m_{23}Ny - m_{22}D) = b_{2,2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z_S} = -\frac{f}{D^2} (m_{33}Ny - m_{32}D) = b_{2,3}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega_s} = -\frac{f}{D} \left(((Y - Y_s)m_{33} - (Z - Z_s)m_{23}) \frac{Ny}{D} - (Y - Y_s)m_{32} + (Z - Z_s)m_{22} \right) = b_{2,4}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi_s} = \frac{f}{D} \left((Nx \cos \kappa - Ny \sin \kappa) \frac{Ny}{D} - D \sin \kappa \right) = b_{2,5}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \kappa_s} = \frac{f}{D} Nx = b_{2,6}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_0} = 0 = b_{2,7}$$

$$\frac{\partial y}{\partial y_0} = 1 = b_{2,8}$$

$$\frac{\partial y}{\partial f} = -\frac{Ny}{D} = b_{2,9}$$

Enačbe (52) skupaj s približnimi vrednostmi neznank se uporabijo za izračun vrednosti matrike koeficientov.

4.4.1.2 Matrična oblika enačb popravkov

Enačbe popravkov v posredni izravnavi geometričnega modela zapišemo v matrični obliki z enačbo (7). Vse enačbe popravkov so vezane na uporabljene oslonilne točke, število členov enačb pa je vezano na število neznank. Ker vsaka oslonilna točka tvori 2 enačbi, imamo pri n točkah matriko koeficientov B velikosti $[2 \times n, 9]$. Matrika B ima obliko:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_s} & \frac{\partial x_1}{\partial Y_s} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial y_0} & \frac{\partial x_1}{\partial f} \\ \frac{\partial y_1}{\partial X_s} & \frac{\partial y_1}{\partial Y_s} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial y_0} & \frac{\partial y_1}{\partial f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_n}{\partial X_s} & \frac{\partial x_n}{\partial Y_s} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial y_0} & \frac{\partial x_n}{\partial f} \\ \frac{\partial y_n}{\partial X_s} & \frac{\partial y_n}{\partial Y_s} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial y_0} & \frac{\partial y_n}{\partial f} \end{bmatrix}. \quad (53)$$

Matrika oz. vektor neznank Δ ima velikost $[9, 1]$, vektor popravkov v in vektor opazovanj f pa $[2 \times n]$. V matrični obliki jih zapišemo:

$$\mathbf{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \dots \\ \Delta_{y0} \\ \Delta_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{OT1x} \\ v_{OT1y} \\ \dots \\ v_{OTnx} \\ v_{OTny} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_{OT1x} \\ f_{OT1y} \\ \dots \\ f_{OTnx} \\ f_{OTny} \end{bmatrix}. \quad (54)$$

4.4.2 Stohastični model

Matrika uteži za geometrični model polnoslikovnega modela je simetrična in vsebuje samo natančnosti oslonilnih točk. Matriko uteži, kjer ima vsaka od n točk različno natančnost, zapišemo z:

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & & & & \\ & \sigma_{y1}^2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \sigma_{xn}^2 & \\ & & & & \sigma_{yn}^2 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (55)$$

4.4.3 Reševanje sistema linearnih enačb in izločanje grobih napak

Reševanje sistema linearnih enačb in izločanje grobih napak poteka zelo podobno kot pri geometričnem modelu za vrstične senzorje. Največja razlika je v vrednosti najmanjšega možnega števila oslonilnih točk, s katerim se izvede izravnava, saj jih polnoslikovni model za določitev devetih parametrov zunanje in notranje orientacije potrebuje le pet.

4.5 Povzetek in zaključki poglavja 4

Sateliti za opazovanje Zemlje uporabljajo več vrst snemalnih sistemov. V zadnjih letih so se najbolj uveljavili vzdolžni sistemi, z naraščanjem števila majhnih satelitov pa se povečuje tudi uporaba polnoslikovnih sistemov. Polnoslikovni sistem bo vgrajen tudi v prvi slovenski satelit. Zaradi tega smo se v doktorski disertaciji odločili za izdelavo dveh izvedb geometričnega modela, ki delujeta z vrstičnimi oz. polnoslikovnimi senzorji.

Izdelan geometrični model temelji na že razvitih in uporabljenih modelih. Končna oblika modela je sestavljena iz več sklopov (npr. izravnava, izločanje točk) in je prilagojena za delo v samodejnem postopku za ortorektifikacijo. Obe izvedbi modela sta indirektni (delujeta le z oslonilnimi točkami) in splošni (prilagojeni sta za vse snemalne sisteme, ki snemajo v vrstičnem oz. polnoslikovnem načinu).

Vhodni podatek za geometrični model so oslonilne točke. Te točke imajo zaradi atmosferske refrakcije in ukrivljenosti Zemlje sistematične napake, ki jih moramo pred vstopom v geometrični model popraviti. Popravljenе točke lahko še vedno vsebujejo grobe napake, ki jih v modelu izločamo z algoritmom RANSAC. Vpliv slabših točk na končne parametre model zmanjšuje z metodami robustne ocene, katerih delovanje je ovrednoteno v poglavju 8.

5 ORTOREKTIFIKACIJA

Izdelan postopek se konča z ortorektifikacijo posnetka. V tem poglavju so najprej predstavljene metode za izdelavo ortoposnetkov, ki se delijo na dve skupini: direktne (neposredne) in indirektne (posredne). Opisani so postopki obdelave in rezultati posameznih metod. Sledi še podroben opis indirektne metode ortorektifikacije, ki je bila vključena v postopek samodejne ortorektifikacije.

Ortorektifikacija je pretvorba posnetka tako, da je prikazan v ortogonalni projekciji (glej poglavje 2.3). Z ortorektifikacijo določimo, kateri slikovni element na surovem posnetku ustreza slikovnemu elementu na ortoposnetku oz. položaju v prostoru. Ker v samodejnem postopku obdelujemo le en posnetek naenkrat, ne moremo uporabiti standardne fotogrametrične metode prostorskega preseka žarkov (angl. space intersection), ki se uporablja v primeru stereoparov. V primeru enega posnetka se uporablja DMR in pa pogoj kolinearnosti, ki rigorozno poveže slikovno koordinato s koordinato v prostoru.

5.1 Metode izdelave ortoposnetkov

Običajno se pri ortorektifikaciji uporabljata dve skupini metod (Konecny, 1979). V prvo skupino sodijo t.i. direktne metode, ki delujejo tako, da vsak piksel oz. slikovne koordinate projicirajo v 3R prostor. Druga skupina, t.i. indirektne metode, delujejo v obratni smeri. Metode začnejo v objektnem prostoru (angl. object space) in projicirajo položaj slikovnega elementa preko DMR-ja na surov posnetek oz. slikovne koordinate. Radiometrično vrednost na ortoposnetku dobimo s prevzorčenjem radiometričnih vrednosti okoliških pikselov na surovem posnetku.

5.1.1 Direktne metode

Direktne metode se veliko uporabljajo za določitev posameznih prostorskih koordinat, redkeje za celotno ortorektifikacijo. Za ortorektifikacijo so služile predvsem pri vrstičnih senzorjih v osemdesetih letih (npr. za satelit SPOT), preden so se uveljavili indirektni modeli (Chen in Lee, 1993). Tudi v primeru direktnih metod potrebujemo poleg parametrov zunanje orientacije še informacijo o višini, ki jo dobimo iz DMR-ja. Prostorske koordinate piksla dobimo s presekom med površjem in žarkom gledanja (angl. view ray), ki se začne v gorišču (perspektivnem centru) in gre skozi obravnavani piksel. Metode, s katerimi se na ta način določa koordinate preseka, imenujemo tudi metode za obrnjeno projiciranje posamičnega žarka (angl. single-ray backprojection) (Mikhail et al., 2001). V splošnem poznamo dve metodi, s katerima rešujemo problem obrnjenega projiciranja (Sheng, 2004): iterativna fotogrametrična metoda (angl. iterative photogrammetric method) in metoda sledenja žarku (angl. ray tracing method). Iterativna fotogrametrična metoda (IP) se najpogosteje uporablja v

fotogrametriji, medtem ko se metoda sledenja žarku (RT) največ uporablja v računalniški grafiki. V praksi se je uveljavila tudi tretja metoda, imenovana iterativna metoda sledenja žarku (IRT), ki sicer temelji na metodi RT, vendar je od nje hitrejša in učinkovitejša. V vseh naštetih primerih se uporablja inverzne kolinearne enačbe, kjer iščemo prostorski koordinati X in Y (Mikhail et al., 2001):

$$\begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S) \frac{m_{11} \cdot (x - x_0) + m_{21} \cdot (y - y_0) + m_{31} \cdot (-f)}{m_{13} \cdot (x - x_0) + m_{23} \cdot (y - y_0) + m_{33} \cdot (-f)} \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S) \frac{m_{12} \cdot (x - x_0) + m_{22} \cdot (y - y_0) + m_{32} \cdot (-f)}{m_{13} \cdot (x - x_0) + m_{23} \cdot (y - y_0) + m_{33} \cdot (-f)}, \end{aligned} \quad (56)$$

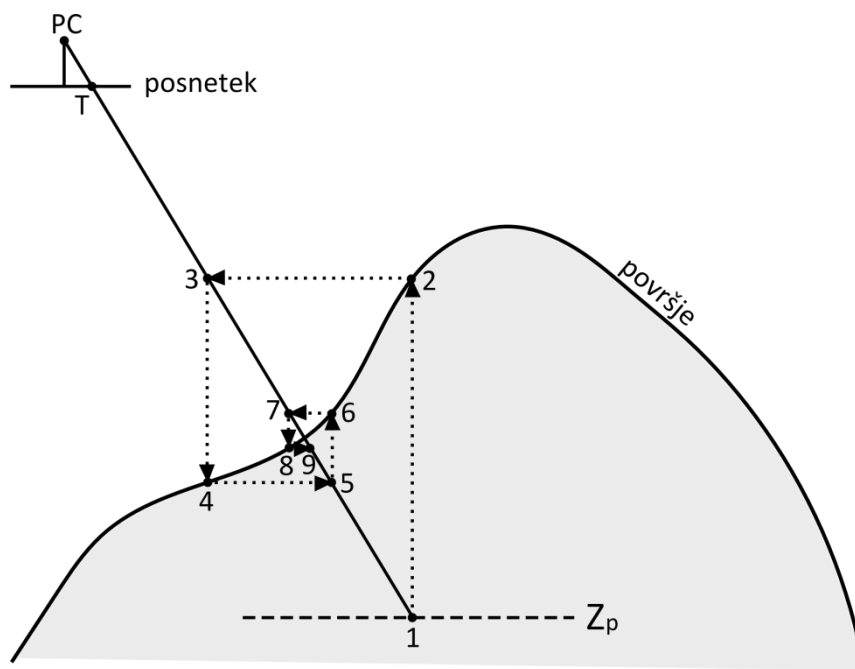
pri čemer so parametri enaki kot pri enačbi (14).

5.1.1.1 Iterativna fotogrametrična metoda

V fotogrametriji je najpogosteje uporabljena iterativna fotogrametrična metoda, ki deluje iterativno in je od vseh najhitrejša. Slika 8 prikazuje njeno delovanje, ki temelji na izračunu preseka slikovnega žarka z DMR-jem. Postopek, s katerim metoda pridobi prostorske koordinate točke T , deluje v naslednjih korakih:

- 1) Z inverznimi kolinearnimi enačbami in povprečno višino modela reliefa (Z_p) se izračunajo koordinate začetne projicirane točke 1.
- 2) Iz točke 1 sledimo do točke 2 na površju modela reliefa, kjer izračunamo višino.
- 3) Izračunano višino uporabimo za izračun prostorskih koordinat točke 3.
- 4) Izračune iz prvih treh točk ponavljamo dokler koordinate ne konvergirajo.
- 5) Če sta zadnji dve projicirani točki znotraj predhodno določenih meja, se iteracije ustavijo in zadnje koordinate obveljajo kot končni rezultat.
- 6) Radiometrična vrednost iz posnetka se prepíše na izračunane koordinate v ortoposnetku.

Metoda IP je v primerjavi z drugimi metodami zelo hitra in dokaj zanesljiva, v kolikor pri ortorektifikaciji uporabljamo DMR srednje ali nizke ločljivosti. Pri zelo razgibanem terenu in visokoločljivem modelu reliefa pa lahko odpove ali privede do napačnih rezultatov. Napake nastopijo zaradi divergence (angl. divergence) in zakrivanja (angl. occlusion), ki sta med drugim posledica velikega kota gledanja in naklona površja. V redkih primerih se lahko postopek ujame v neskončno zanko. Zaradi tega uporaba modelov reliefa iz lidarskih podatkov v polni ločljivosti, ki je običajno en meter in manj, ni priporočljiva.



Slika 8: Iterativna fotogrametrična metoda (IP).

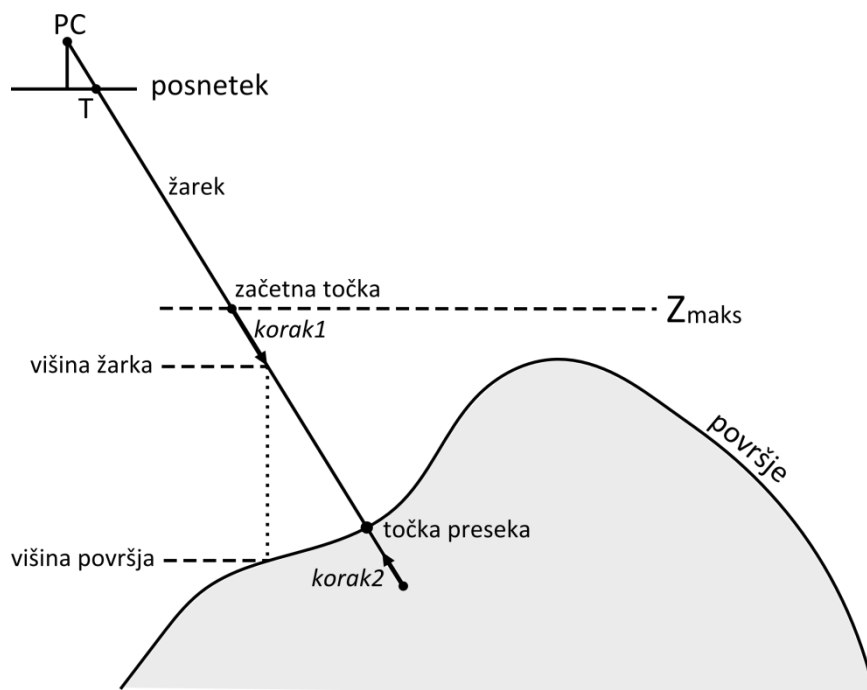
Figure 8: Iterative photogrammetric method (IP).

5.1.1.2 Iterativna metoda sledenja žarku

Ker je iterativna metoda sledenja žarku procesno zelo zahtevna in počasna, se je v fotogrametriji uveljavila njena iterativna različica, ki dosega enake rezultate v krajšem času. Metoda IRT, ki sta jo predlagala O'Neill in Dowman (1988), določi točko preseka z iterativnim podaljševanjem žarka gledanja, dokler ne doseže površja. Ključni parameter je dolžina koraka, s katerim podaljšamo žarek, saj je od njega odvisna hitrost izračuna koordinat in točnost rezultata. Če je korak velik, je metoda zelo hitra, vendar lahko pride do napak. V primeru kratkega koraka je proces bolj zamuden, rezultati pa so zelo točni. Postopek, s katerim metoda pridobi prostorske koordinate točke T , deluje v naslednjih korakih (slika 9):

- 1) Z inverznimi kolinearnimi enačbami in največjo višino modela reliefa (Z_{maks}) se izračunajo koordinate začetne točke.
- 2) Z izračunanimi koordinatami se pridobi pripadajočo višino iz modela reliefa.
- 3) Izračuna se razlika med zadnjimi višinami in se jo primerja s predoločeno mejo. Če je razlika večja od meje, se žarek gledanja podaljša za korak (višini se vrednost koraka odšteje).
- 4) Izračune iz prvih treh točk ponavljamo, dokler ni razlika višin negativna ali pade znotraj meje.
- 5) V primeru negativne razlike se korak zmanjša ter prišteje zadnji višini.

- 6) Izračun se ponavlja, dokler razlika višin ne pade znotraj meje. V tem primeru se iteracije ustavijo in zadnje koordinate obveljajo kot končni rezultat.
- 7) Radiometrična vrednost iz posnetka se prepíše na izračunane koordinate na ortoposnetku.

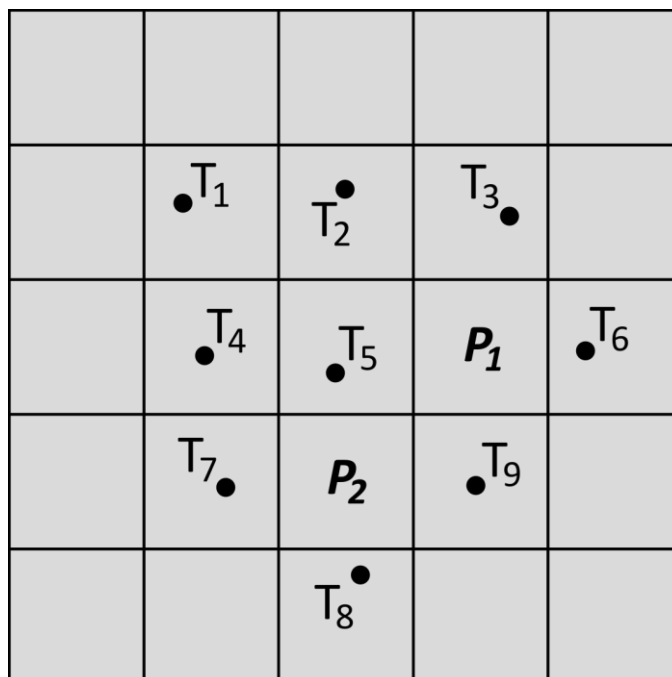


Slika 9: Iterativna metoda sledenja žarku (IRT).

Figure 9: Iterative ray tracing method (IRT).

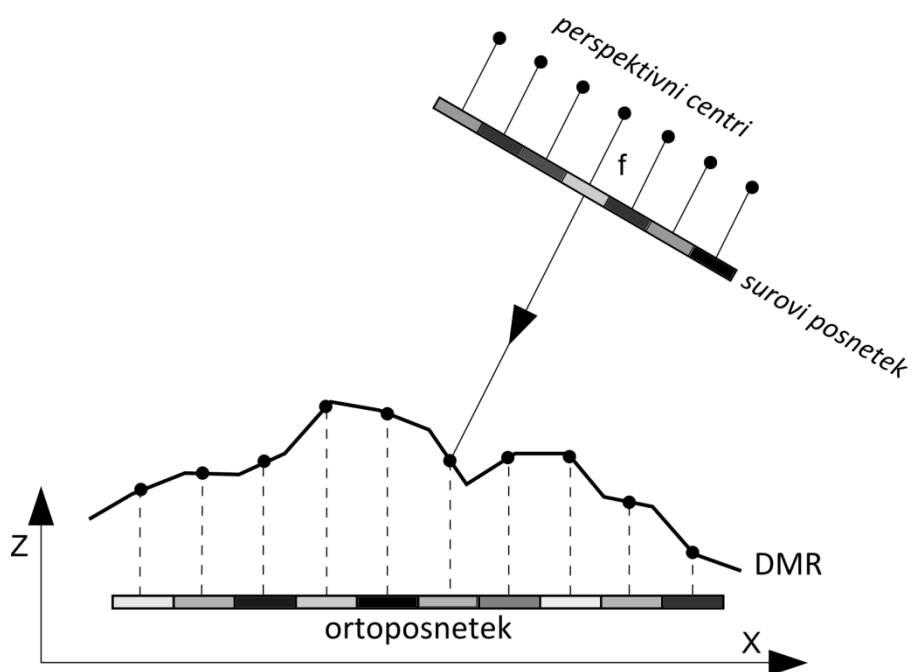
Metoda IRT sicer ni tako hitra kot metoda IP, vendar je veliko bolj zanesljiva in pri izbranem majhnem koraku tudi ne prihaja do napak. Zanesljiva je tudi pri modelih reliefa visoke ločljivosti in pri velikih kotih gledanja satelita ter se uporablja za izdelavo popolnega ortofota (angl. true orthophoto).

Direktne metode so ob pravilni uporabi pri izdelavi ortoposnetkov zelo zanesljive. Njihova največja pomanjkljivost je računska zahtevnost in trajanje obdelave. Končni ortoposnetek ima ponavadi tudi prazne piksele, saj se zaradi različnih velikosti pikslov in predvsem razgibanosti reliefa vsak piksel ne preslika vedno v svoj element ortoposnetka (slika 10). V tem primeru je potrebno piksele naknadno zapolniti, metoda zapolnitve pa je odvisna od velikosti nastalih lukenj. Če so te manjše, se lahko uporabi prevzorčenje iz sosednjih pikslov, drugače potrebujemo dodatne posnetke, posnete iz drugačnih zornih kotov, s katerimi zapolnimo manjkajoče dele. Izdelava ortoposnetkov z direktno metodo iz posnetka vrstičnega skenerja je prikazana na sliki 11.



Slika 10: Ponazoritev preslikave pikslov pri izdelavi ortoposnetka z direktnimi metodami. Zaradi preslikave pikslov (T_6 in T_8) v sosednje celice sta dve celici v ortoposnetku prazni (P_1 in P_2).

Figure 10: Example of pixel mapping at the generation of orthoimages with direct methods. Due to the mapping of pixels T_6 in T_8 to neighbouring cells, two cells in the orthoimage are without values (P_1 in P_2).



Slika 11: Direktna metoda ortorektifikacije za vrstične skenerje.

Figure 11: Direct orthorectification method for linear sensors.

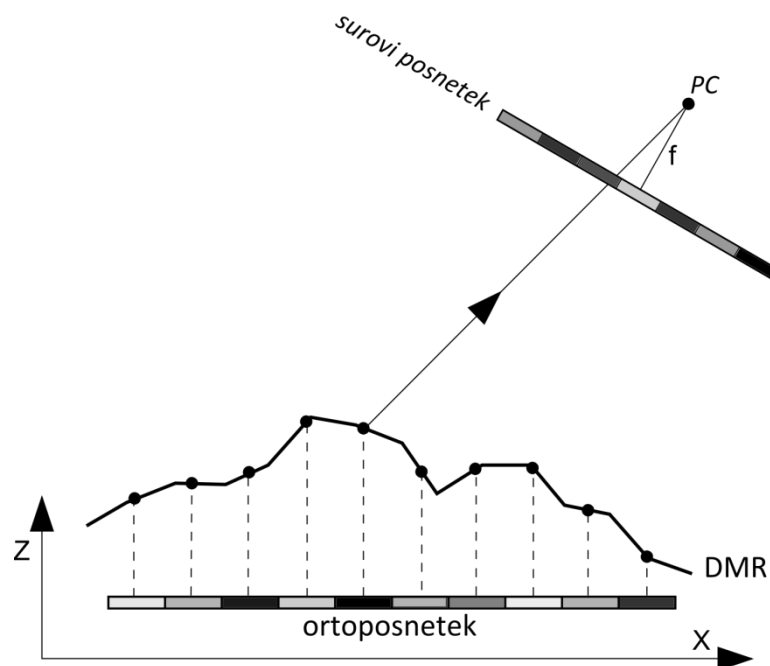
5.1.2 Indirektne metode

Indirektne metode se v fotogrametriji pojavijo že v šestdesetih letih prejšnjega stoletja (Smith, 1995), digitalne oblike metod pa v sedemdesetih (Konecny, 1979). Pred uvedbo vrstičnih skenerjev oz. visokoločljivih DMR-jev so bile tudi edine praktično uporabljene metode za ortorektifikacijo. Zaradi hitrosti obdelave in enostavnosti algoritmov se jih tudi danes veliko uporablja. Indirektne metode delujejo v obratni smeri kot direktne metode - s projiciranjem točke iz prostorskega sistema v točko na posnetku, ki je v 2R sistemu. Za vrstične skenerje so se prve indirektne metode začele pojavljati razmeroma pozno. Chen in Lee (1993) sta predlagala rešitev, ki temelji na metodi Newton-Raphson. Čeprav je ta metoda uspešna, je zelo občutljiva na začetne pogoje in pravilno deluje le, kjer se enačba tirnice spreminja monotono. To sicer velikokrat drži za satelite, redko pa za letalska snemanja. Izboljšano verzijo indirektne metode so predlagali Kim et al. (2001). Metoda je bolj robustna, saj deluje tudi pri nemonotonem premikanju in rotacijah platforme, na kateri je nameščena kamera. V naštetih primerih se uporablja enačbe (14), kjer iščemo slikovni koordinati x in y .

Izdelava ortoposnetka z indirektno metodo za polnoslikovni senzor je dokaj preprosta. Zaradi zaporednega snemanja vrstic ob različnih časih pa pri vrstičnih skenerjih transformacija slikovne koordinate iz prostorske ni reverzibilna. To pomeni, da lahko rešitev dobimo z iteracijami ali dodatnimi izračuni, odvisno od geometričnega modela. V splošnem pa indirektne metode delujejo v naslednjih korakih:

- 1) Izračuna se velikost in koordinate ortoposnetka ter določi velikost piksla.
- 2) Za vsak piksel se pridobi pripadajočo višino iz modela reliefa.
- 3) S kolinearnimi enačbami, 2R koordinatami pikslov in višinami modela reliefa na pikslih se izračunajo slikovne koordinate na surovem posnetku.
- 4) Z interpolacijo radiometričnih vrednosti v okolici izračunane koordinate se dobi vrednost piksla na ortoposnetku.
- 5) Na enak način se izračuna vrednosti vsakega piksla na ortoposnetku, kamor se vrednosti tudi zapišejo.

Indirektne metode imajo več prednosti v primerjavi z direktnimi. Dokazano je, da so indirektne metode boljše od direktnih v kakovosti ter hitrosti obdelave (Kim et al., 2001). Kljub vsem prednostim pa so lahko indirektne metode neuporabne pri uporabi visokoločljivih modelov reliefa in/ali pri obdelavi posnetkov, ki so bili zajeti pod velikim kotom. Poleg tega indirektne metode ne puščajo praznih pikslov, zaradi česar dodatna obdelava ni potrebna. Pri posnetkih, ki so snemani v nadirju in v vrstičnem načinu, je uporaba indirektnih metod zanesljiva. Izdelava ortoposnetka z indirektno metodo iz polnoslikovnega posnetka je prikazana na sliki 12.



Slika 12: Ortorektifikacija polnoslikovnega posnetka z indirektno metodo.

Figure 12: Indirect orthorectification method for a fullframe image.

5.2 Postopek izdelave ortoposnetkov

Indirektne metode so hitre in zanesljive, če ne gre za ekstremne primere snemanja. Zaradi tega smo to metodo uporabili tudi v okviru doktorske disertacije. V primeru polnoslikovnega sistema je uporaba enostavna, pri vrstičnih senzorjih pa je prisotna še časovna komponenta, ki zahteva dodatne izračune. Slika 13 prikazuje potek indirektne metode ortorektifikacije v primeru razvitega geometričnega modela za vrstični skener. Pri izračunu slikovnih koordinat je potrebno upoštevati delitev tirnice na dva dela ter parametre zunanje orientacije, ki jih dobimo po enačbah (19).

Ker je pri vrstičnem skenerju slikovna koordinata x enaka 0 za vsako vrstico, lahko kolinearne enačbe zapišemo (Kim et al., 2001):

$$\begin{aligned}
 0 &= -f \frac{m_{11} \cdot (X - X_S) + m_{12} \cdot (Y - Y_S) + m_{13} \cdot (Z - Z_S)}{m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S)} \\
 y &= -f \frac{m_{21} \cdot (X - X_S) + m_{22} \cdot (Y - Y_S) + m_{23} \cdot (Z - Z_S)}{m_{31} \cdot (X - X_S) + m_{32} \cdot (Y - Y_S) + m_{33} \cdot (Z - Z_S)},
 \end{aligned} \tag{57}$$

pri čemer so parametri enaki kot pri enačbi (14).

Torej lahko problem inverzne metode rešimo, če izračunamo koordinato x iz enačbe:

$$0 = m_{11} \cdot (X - X_s) + m_{12} \cdot (Y - Y_s) + m_{13} \cdot (Z - Z_s). \quad (58)$$

Za razliko od perspektivnih posnetkov (en projekcijski center za celoten posnetek) pri vrstičnih posnetkih elementi rotacije in položaj satelita niso konstantni. Zaradi tega enačba (58) ni linearna in je ne moremo rešiti analitično (Kim et al., 2001). Če v enačbo (58) vstavimo enačbe parametrov zunanje orientacije, dobimo:

$$f(t) = t^2 \cdot (X_2 \cdot m_{11} + Y_2 \cdot m_{12} + Z_2 \cdot m_{13}) + t \cdot (X_1 \cdot m_{11} + Y_1 \cdot m_{12} + Z_1 \cdot m_{13}) + m_{11} \cdot (X_0 - X) + m_{12} \cdot (Y_0 - Y) + m_{13} \cdot (Z_0 - Z). \quad (59)$$

Z rešitvijo kvadratne enačbe dobimo čas snemanja t za posamezno točko, pri čemer je $f(t) = 0$. Celoten postopek izračuna slikovnih koordinat točke je naslednji:

- 1) Izberemo 3R točko (koordinate X , Y , Z). Ker ni znano v katerem segmentu se nahaja projicirana slikovna točka, se čas snemanja t izračuna dvakrat, enkrat z vsakim nizom parametrov zunanje orientacije.
- 2) Glede na izračunana trenutka snemanja se lahko ugotovi, kateremu segmentu pripada točka, s čimer določimo čas snemanja točke.
- 3) Izračuna se pripadajoče parametre zunanje orientacije ob času snemanja točke.
- 4) Slikovno koordinato x dobimo po enačbi:

$$x = \frac{t}{t_v}, \quad (60)$$

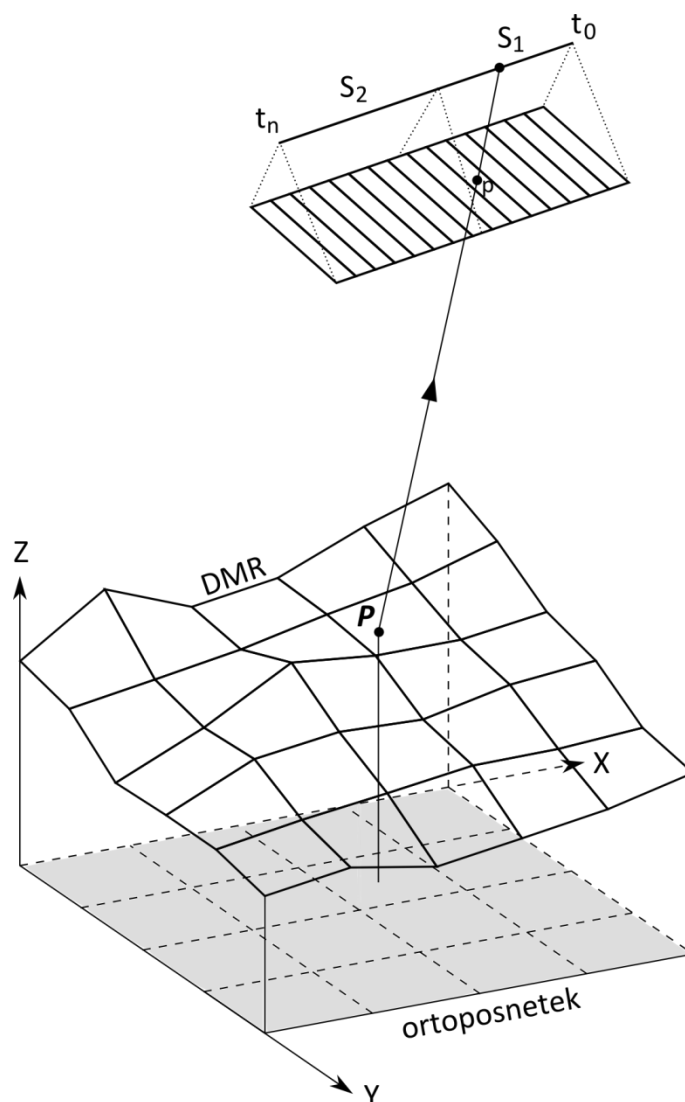
kjer je t_v čas snemanja ene vrstice.

- 5) Slikovno koordinato y v metrih dobimo najprej po kolinearni enačbi. Končno pa z:

$$y = \frac{y_m}{p_{vel}} + \frac{n_s}{2}, \quad (61)$$

kjer je y_m slikovna koordinata y v metrih, p_{vel} velikost piksla v metrih, n_s pa število stolpcev posnetka.

- 6) Z bilinearno interpolacijo radiometričnih vrednosti pikslov v okolici izračunane slikovne koordinate se dobi vrednost piksla na ortoposnetku.



Slika 13: Indirektna metoda ortorektifikacije za vrstični skener. Pri ortorektifikaciji je treba upoštevati geometrični model, v katerem je tirnica razdeljena na dva segmenta (S_1 in S_2).

Figure 13: Indirect orthorectification method for linear sensors. The orbit in the geometric model which is divided in two segments (S_1 and S_2) has to be taken into account.

Celoten postopek se opravi za vsak piksel ortoposnetka. Na koncu se rezultatu pripiše še informacija o položaju (koordinate zgornjega levega vogala ortoposnetka) in ortoposnetek shrani v zahtevan zapis.

5.3 Povzetek in zaključki poglavja 5

Za ortorektifikacijo se uporabljajo direktne ali indirektna metode. Direktne metode so zelo zanesljive, njihova največja pomanjkljivost pa je računska zahtevnost in dolgotrajnost obdelave. Izdelani ortoposnetek ima ponavadi tudi prazne piksele, katere je potrebno naknadno zapolniti. Če je število praznih pikslov manjše, se njihove vrednosti lahko pridobi s prevzorčenjem iz sosednjih pikslov, drugače pa je nujna uporaba dodatnih posnetkov, snemanih iz drugačnih zornih kotov.

Indirektne metode so v primerjavi z direktnimi boljše, kar zadeva kakovost ter hitrost obdelave. Poleg tega indirektne metode ne puščajo praznih pikslov. Kljub prednostim pa so lahko indirektne metode neuporabne pri uporabi visokoločljivih modelov reliefa in/ali obdelavi posnetkov, ki so bili snemani pod velikim kotom.

Pri posnetkih, ki so snemani iz vesolja v običajnih razmerah in z običajnimi nastavitvami, je uporaba indirektnih metod zanesljiva in hitra. Zaradi tega smo to metodo implementirali v izdelan postopek ortorektifikacije. V primeru polnoslikovnega sistema je uporaba enostavna, pri vrstičnih senzorjih pa je prisotna še časovna komponenta, ki zahteva dodatne izračune.

II PRAKTIČNI DEL

6 METODE DELA IN UPORABLJENI PODATKI

Delovanje izdelanega ortorektifikacijskega postopka smo ocenili s poskusi na podatkih, ki smo jih imeli na voljo in so bili primerni za ta namen. Metode dela pri preizkušanju postopka so predstavljene v prvem podpoglavju. Opisani so opravljeni poskusi, s katerimi smo določili uspešnost postopka in izbrali najprimernejše metode obdelave. V drugem podpoglavju so podrobneje predstavljeni uporabljeni testni podatki in sateliti, s katerimi so bili zajeti.

V doktorski disertaciji smo razvili postopek samodejne ortorektifikacije optičnih satelitskih posnetkov. Postopek je bil preizkušen s testiranjem na satelitskih posnetkih različnih ločljivosti in na različnih lokacijah, večinoma znotraj Slovenije. V poskuse so bili vključeni visokoločljivi posnetki RapidEye in zelo visokoločljivi posnetki WorldView-2.

6.1 Metode dela

Uspešnost in robustnost delovanja razvite samodejne ortorektifikacije smo preverili s petimi empiričnimi poskusi. S prvim smo preverili točnost samodejno določenih oslonilnih točk, naslednji trije so služili za preizkus delovanja geometričnega modela, zadnji pa je ocenil točnost izdelanih ortoposnetkov.

Uporabljeni poskusi so:

Preverjanje kakovosti samodejno določenih oslonilnih točk

Pred preverjanjem delovanja geometričnega modela smo preverili kakovost samodejno določenih oslonilnih točk. Ker so lahko v točkah prisotne grobe napake, je nujno določiti približno število in velikost napak. Le tako lahko kasneje pravilno ocenimo kakovost modela in ortorektifikacije. Zaradi velikega števila pridobljenih točk je vizualna kontrola zelo zamudna in nepraktična. Zato smo natančnost točk preverjali s koeficienti RPC, ki jih ponudniki posnetkov priložijo ostalim metapodatkom. Koeficienti se ponavadi uporabljajo za ortorektifikacijo, saj predstavljajo empirični model RFM za preslikavo točk iz slikovnega sistema v prostorski ali obratno. Pred uporabo je potrebno koeficiente popraviti z nekaj dobrimi oslonilnimi točkami. V praksi so popravki v obliki translacij 2R koordinat.

Pred uporabo koeficientov RPC smo le-te preverili z ročno izmerjenimi in dobro razporejenimi kontrolnimi točkami (KT). Na ta način smo preverili natančnost koeficientov RPC in dobljene rezultate uporabili za ovrednotenje poskusov s samodejno določenimi točkami. Čeprav so

koeficienti običajno zelo natančni (Grodecki in Dial, 2003), je njihov vpliv na določitev natančnosti točk vseeno vprašljiv na posnetkih z zelo razgibanim terenom. Natančnost točk smo preverili s primerjavo koordinat, pridobljenih prek koeficientov, in izmerjenih (določenih) koordinat. Pri tem smo za mero uporabili koren srednje kvadratne napake (angl. root mean square error, RMSE).

Analiza vpliva različnega števila uporabljenih oslonilnih točk

Določanje točk poteka po izsekih posnetka. Na vsakem izseku smo določili več oslonilnih točk. Število izsekov in oslonilnih točk se spreminja glede na vrsto posnetka. Posnetki RapidEye, na primer, zajemajo večjo površino in so zaradi tega razdeljeni na več izsekov kot posnetki WorldView-2. Število izsekov in točk smo določili z empiričnimi poskusi na več posnetkih. Zaradi pomanjkanja cest na nekaterih izsekih, različne pokrovnosti in napačne detekcije, je število točk za vsak posnetek različno. S poskusi smo določili tudi najvišje število točk na izsek, ki še znatno vpliva na natančnost delovanja postopka. Število teh točk je največje število (niz) točk za poskuse. Za vsak posnetek smo poleg največjega niza točk ustvarili še več nizov z izločanjem točk iz največjega niza glede na njihovo kakovost in razporeditev. Vsak niz je bil uporabljen v geometričnem modelu za izračun neznanih parametrov. Natančnost smo ocenili z računanjem napake RMSE, ki jo dobimo s primerjavo med ročno izmerjenimi koordinatami kontrolnih točk in koordinatami, ki jih dobimo z rezultati geometričnega modela.

Primerjava različnih metod robustne ocene

Za postopek je pomembna tudi izbrana metoda za robustno oceno. Najboljšo metodo smo izbrali s preizkušanjem in primerjavo treh različnih metod: Danske metode, metode po Kleinu in metode s hiperbolično funkcijo. Metoda, ki je dosegla najboljše rezultate pri uporabljenih posnetkih, je bila tudi implementirana v ortorektifikacijski postopek.

Analiza uspešnosti detekcije in izločanja grobih napak

Robustnost geometričnega modela je bila preizkušena z umetnim dodajanjem grobih napak oslonilnim točkam. Za vsak posnetek smo izbrali večji in manjši niz oslonilnih točk. Pri posnetkih RapidEye je bil večji niz tisti, ki je dosegel najboljše rezultate pri drugem poskusu, medtem ko je pri posnetkih WorldView-2, zaradi manjšega števila določenih točk, večji niz vseboval vse točke. Manjši niz je predstavljal približno četrtno večjega niza ali tretjino v primeru manjšega števila točk v večjem nizu. V večjem nizu smo izbrali deset natančnih in enakomerno razporejenih točk

ter obema slikovnjima koordinatama točk dodali napake velikosti od enega do deset pikslov. V manjšem nizu smo izbrali le pet točk, ki smo jim dodali napake velikosti od enega do pet pikslov. V kolikor je imel niz le okoli trideset točk, smo izbrali približno 10 % točk, ki smo jim dodali napake ali pa smo zmanjšali mejo za izločanje točk. Oba niza smo uporabili v geometričnem modelu ter analizirali natančnost rezultatov in delovanje samodejnega izločanja točk.

Ocena položajne točnosti ortoposnetkov

Ortoposnetke smo izdelali s parametri zunanje orientacije najbolj natančnega rezultata in modelom reliefa z ločljivostjo 12,5 m (GURS, 2015a). Natančnost ortoposnetkov smo preverili z ročno izmerjenimi kontrolnimi točkami. Na vsakem posnetku smo izmerili 30 kontrolnih točk, ki smo jih postavili na cestna križišča, enakomerno po celem posnetku. Koordinate točk na istih položajih smo izmerili še na državnem ortofotu z ločljivostjo 0,5 m in ocenjeno položajno točnostjo 1 m. S primerjavo koordinat smo lahko ocenili položajno točnost ortoposnetkov.

Z opisanimi poskusi smo ocenili uspešnost implementacije in delovanja postopka samodejne ortorektifikacije. Poleg tega smo s poskusi izbrali tudi metode, ki bodo uporabljene v dejanski izvedbi postopka, in najprimernejše vhodne podatke ter vrednosti (začetnih) parametrov.

6.2 Podatki

Za potrebe doktorske disertacije smo celoten ortorektifikacijski postopek in vse poskuse opravili na treh posnetkih satelitov RapidEye in treh posnetkih satelita WorldView-2. Sateliti kot tudi njihovi posnetki se razlikujejo v več lastnostih, za ortorektifikacijo pa sta pomembna predvsem dva – prostorska ločljivost in širina pasu snemanja. Preizkušeni posnetki omenjenih satelitov so reprezentativni predstavniki v svojih ločljivostnih razredih za večino posnetkov, ki se trenutno uporabljajo v raznih aplikacijah (npr. kartiranje, analize v GIS).

Oba uporabljena satelita snemata v vrstičnem načinu. Čeprav je bila v sklopu disertacije predvidena tudi obdelava polnoslikovnih satelitskih posnetkov, jih do zaključka dela nismo uspeli pridobiti. Trenutno v polnoslikovnem načinu snemajo le nekateri majhni sateliti, njihovi posnetki pa so v veliko primerih neuporabni za ortorektifikacijo (pomanjkanje metapodatkov, slaba kakovost ipd.) ali jih je težko pridobiti. Posnetki slovenskega majhnega satelita, ki deluje v polnoslikovnem načinu in ki bo v prihodnje uporabljal model, razvit v sklopu doktorske disertacije, še niso na voljo. Zaradi tega delovanje in rezultati obdelave polnoslikovnega geometričnega modela v doktorskem delu ne bodo prikazani, smo pa v nalogi opisali teorijo, ki je potrebna za njegovo implementacijo.

6.2.1 RapidEye

Sateliti RapidEye so del komercialnega sistema za daljinsko zaznavanje Zemlje. Konstelacija je sestavljena iz petih minisatelitov, ki lahko v enem dnevu posnamejo do 5 milijonov km². Sateliti krožijo v sončno sinhroni tirnici na višini okoli 630 km in snemajo z vrstičnimi senzorji v petih spektralnih kanalih. Prostorska ločljivost posnetkov na tleh je okoli 6,5 m, kar RapidEye uvršča med visokoločljive satelite. Sistem satelitov, kontrolni segment in zemeljske postaje je izdelalo podjetje MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd) s podizvajalci. Satelite so izstrelili 29. avgusta 2008 iz izstrelišča Baikonur v Kazahstanu. Sistem je trenutno last podjetja BlackBridge (BlackBridge, 2015), ki z njim tudi upravlja. Glavne lastnosti satelitov so prikazane v preglednici 2.

Razvoj samodejnega ortorektifikacijskega postopka se je začel z 19 posnetki RapidEye, ki so bili posneti nad Slovenijo med letoma 2011 in 2013. Postopek trenutno dosega dobre rezultate z vsemi posnetki, ki pokrivajo vse mesece v letu in imajo zaradi tega tudi zelo različno osvetljenost in stanje rastja. V disertaciji so predstavljeni rezultati za tri izbrane posnetke, ki so bili posneti na območjih z različno pokrovnostjo in razgibanostjo terena ter v različnih letih, žal vsi v poletnem času. Uporabljeni posnetki predstavljajo dober nabor za preizkušanje zmogljivosti in robustnosti samodejnega postopka.

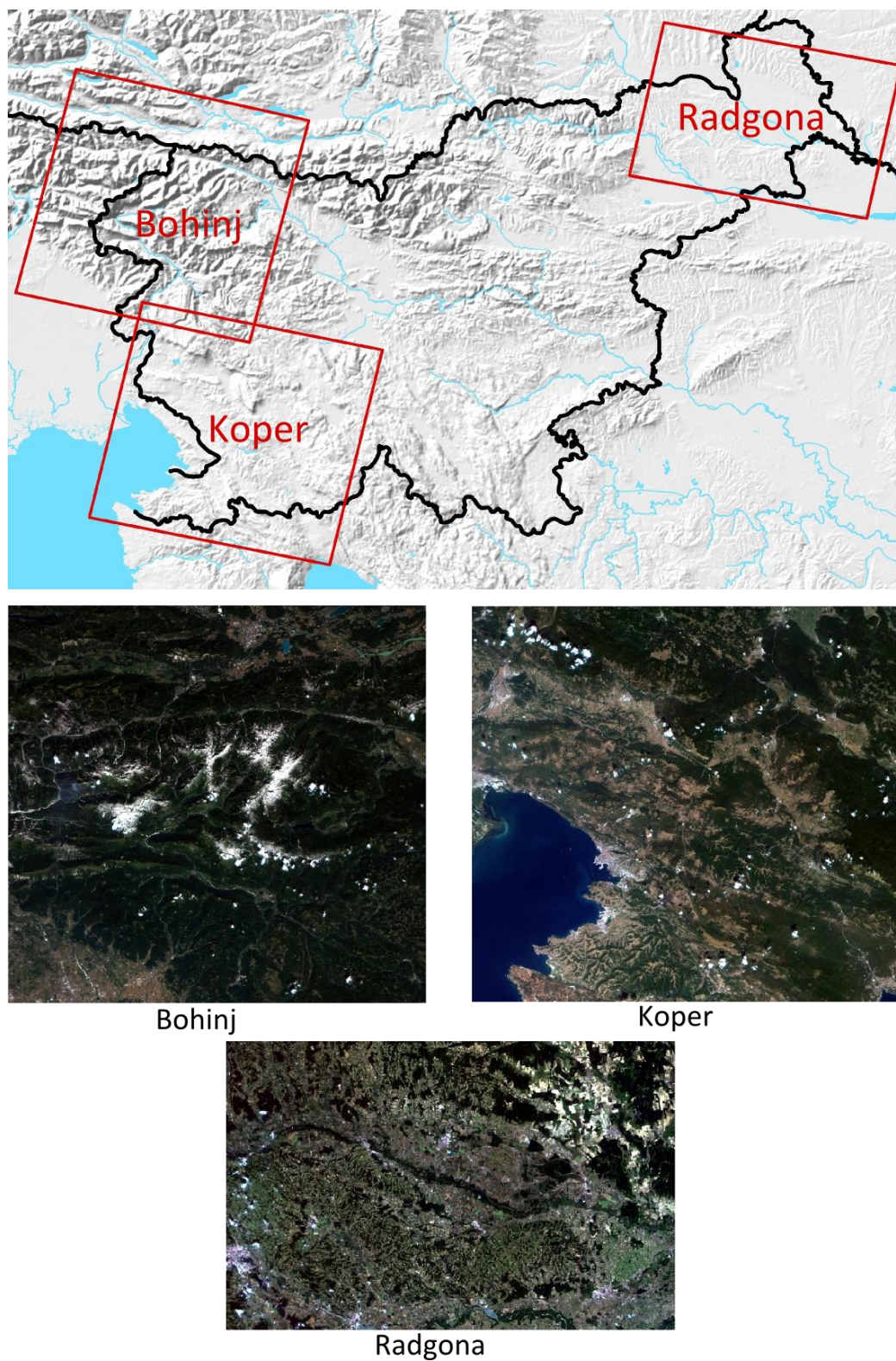
Preglednica 2: Lastnosti satelitov RapidEye (eoPortal, 2015a).

Table 2: Properties of RapidEye satellites (eoPortal, 2015a).

Tirnica	sončno sinhrona, višina leta ~630 km
Prostorska ločljivost nadir	~6,5 m
Širina pasu snemanja	77 km
Detektor	vrstični CCD, 12000 pikslov (elementov)
Optika	TMA, goriščna razdalja 633 mm
Čas ponovnega obiska	1 dan z zasuki (vsi sateliti)
Radiometrična ločljivost	12 bitov
Masa satelita ob izstrelitvi	156 kg
Kanali	modra: 440-510 nm
	zelena: 520-590 nm
	rdeča: 630-685 nm
	rob rdeče: 690-730 nm
	bližnja IR: 760-850 nm
Prostor za shranjevanje podatkov	48 Gbit
Hitrost prenosa podatkov	80 Mbit/s

Nekatere lastnosti testnih posnetkov prikazuje preglednica 3. Posnetke, ki smo jih poimenovali po krajih oz. območjih, ki se pojavijo na posnetkih, vsebujejo zelo malo oblakov. Posnetek Bohinj je bil posnet skoraj v nadirju, medtem ko imata preostala dva le manjši kot gledanja. Zaradi bližine državne meje je posnetek Radgona manjši, s površino 3800 km², Bohinj in Koper pa obsegata 5500 km². Posnetki prikazujejo tri morfološko različne regije v Sloveniji. Posnetek Koper obsega večinoma gričevnato obalno območje, Radgona ravninski teren z območji gričevja, posnetek Bohinj pa je najbolj

razgiban z visokimi gorami in ozkimi dolinami. Vsi posnetki poleg ozemlja Slovenije vsebujejo tudi dele sosednjih držav (slika 14).



Slika 14: Uporabljeni surovi posnetki RapidEye (spodaj) in njihov položaj (zgoraj).

Figure 14: Used raw RapidEye images (below) and their locations (above).

Preglednica 3: Lastnosti uporabljenih posnetkov RapidEye.

Table 3: Properties of the used RapidEye images.

Posnetek	Datum	Kot gledanja [°]	Velikost [piksel]	Oblačnost [%]
Radgona	11. 6. 2011	3,65	11.802 × 7604	0
Koper	18. 8. 2012	6,74	11.796 × 10.753	1
Bohinj	1. 8. 2013	0,12	11.802 × 11.223	3

6.2.2 WorldView-2

Satelit WorldView-2 so izstrelili 8. oktobra 2009 iz izstrelišča Vanderberg v Kaliforniji, ZDA. Izdelalo ga je podjetje Ball Aerospace and Technologies Corporation, lastnik in upravljaec pa je podjetje DigitalGlobe Inc. (DigitalGlobe, 2015b). Snema v zelo visoki ločljivosti in do izstrelitve njegovega naslednika (WorldView-3 leta 2014) je veljal za komercialni satelit z najboljšo prostorsko ločljivostjo (0,46 m). WorldView-2 kroži v sončno sinhroni tirnici na višini okrog 770 km. Snemalni sistem lahko pridobi posnetek v pankromatskem in/ali večspektralnem načinu, pri čemer ima skupno devet kanalov. V primerjavi s sateliti RapidEye je WorldView-2 veliko večji, ima več načinov snemanja in tudi boljše gibljivost. Ena večjih razlik med satelitoma je prostorska ločljivost. Na zelo visokoločljivih posnetkih je prisotnih veliko več detajlov, kar vpliva tudi na vrsto uporabljenih metod za obdelavo in način obdelave posnetkov. Glavne lastnosti satelita so prikazane v preglednici 4.

Preglednica 4: Lastnosti satelita WorldView-2 (eoPortal, 2015b).

Table 4: Properties of the WorldView-2 satellite (eoPortal, 2015b).

Tirnica	sončno sinhrona, višina leta ~770 km
Prostorska ločljivost nadir	0,46 m PAN
	1,84 m MS
Širina pasu snemanja	16,4 km
Detektor	vrstični CCD, 35000 pikslov PAN, 9300 pikslov MS
Optika	TMA, goriščna razdalja 13,3 m
Čas ponovnega obiska	1,1 dan z zasuki
Radiometrična ločljivost	11 bitov
Masa satelita ob izstrelitvi	2800 kg
Kanali	pan: 450-800 nm
	svetlo modra: 400-450 nm
	modra: 450-510 nm
	zelena: 510-580 nm
	rumena: 585-625 nm
	rdeča: 630-690 nm
	rob rdeče: 705-745 nm
	bližnja IR: 770-895 nm
bližnja IR: 860-1040 nm	
Prostor za shranjevanje podatkov	2199 Gbit
Hitrost prenosa podatkov	800 Mbit/s

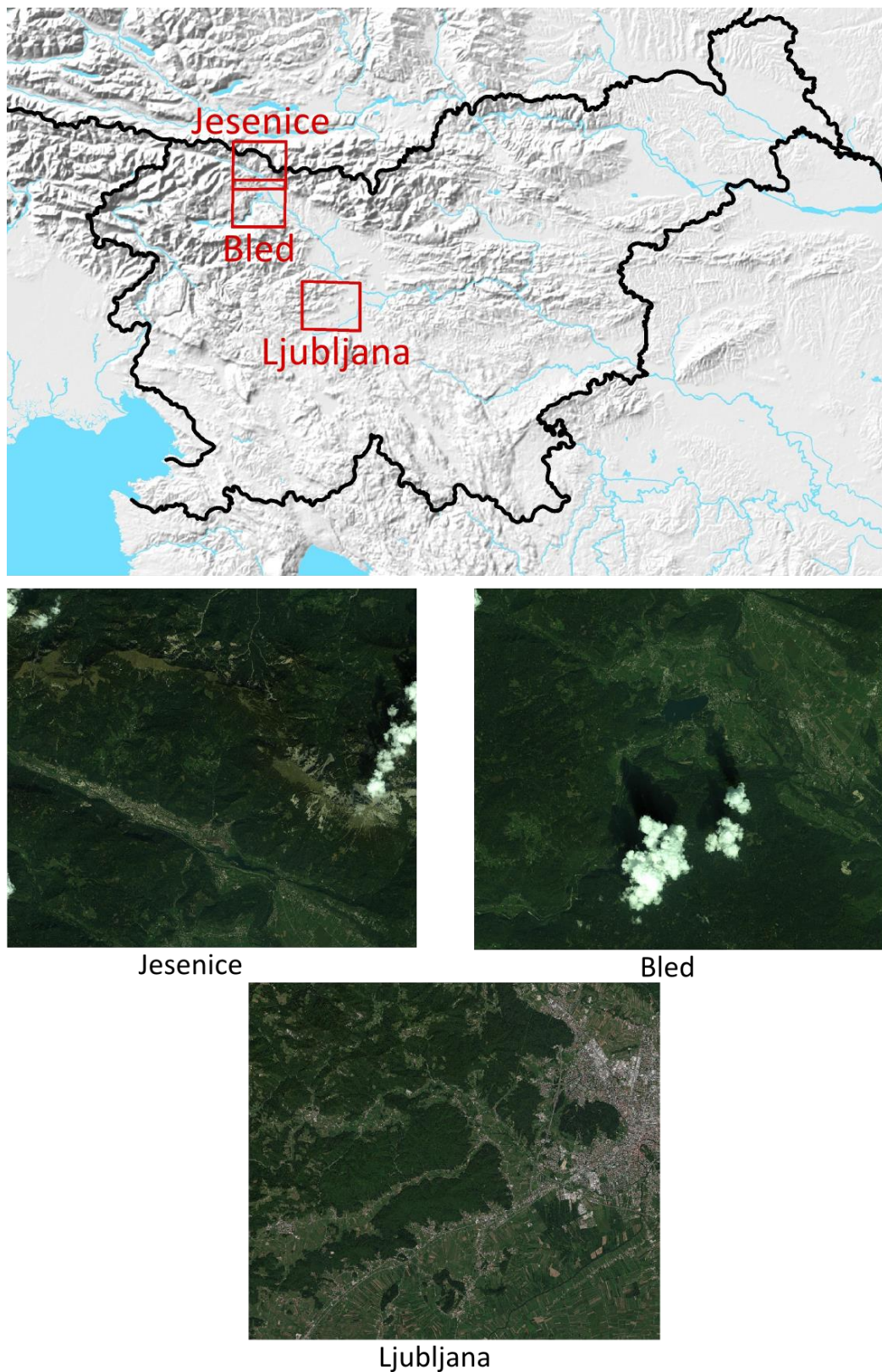
Za raziskave smo imeli na razpolago tri posnetke WorldView-2, ki so bili pridobljeni v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI. Prvi je bil posnet poleti leta 2010, druga dva pa v letu 2012 in sicer v istem preletu. Zaradi tega imata posnetka tudi podobne značilnosti (preglednica 5). Vsi uporabljeni posnetki so večspektralni s prostorsko ločljivostjo okoli 2 m. Manjša ločljivost od nominalne je posledica kota gledanja, ki v vseh primerih presega deset stopinj. Največji kot gledanja ima posnetek Ljubljana, satelit pa je bil med snemanjem usmerjen pravokotno na tirnico. Pri ostalih posnetkih je satelit snemal pod kotom v smeri leta (vzdolž tirnice). Vsi posnetki (slika 15) imajo približno enako velikost in sicer okrog 255 km², kar je precej manj od posnetkov RapidEye. Pokritost z oblaki je majhna in nima vpliva na obdelavo.

Posnetki se razlikujejo tudi glede pokrovnosti. Posnetek Ljubljana prikazuje del mesta Ljubljane, ravninsko in poljedelsko Ljubljansko barje ter gričevnat svet. Posnetka Jesenice in Bled obsegata gorata območja z dolinami in planotami. Gorat je predvsem posnetek Jesenice, katerega severni del zaobjema območje Karavank.

Preglednica 5: Lastnosti uporabljenih posnetkov WorldView-2.

Table 5: Properties of the used WorldView-2 images.

Posnetek	Datum	Kot gledanja [°]	Velikost [piksel]	Oblačnost [%]
Ljubljana	1. 8. 2010	18,8	7603 × 8766	0
Jesenice	11. 9. 2012	12,8	7415 × 8472	3,5
Bled	11. 9. 2012	12,5	7409 × 8464	5



Slika 15: Uporabljeni surovi posnetki WorldView-2 (spodaj) in njihov položaj (zgoraj).

Figure 15: Used raw WorldView-2 images (below) and their locations (above).

6.3 Povzetek in zaključki poglavja 6

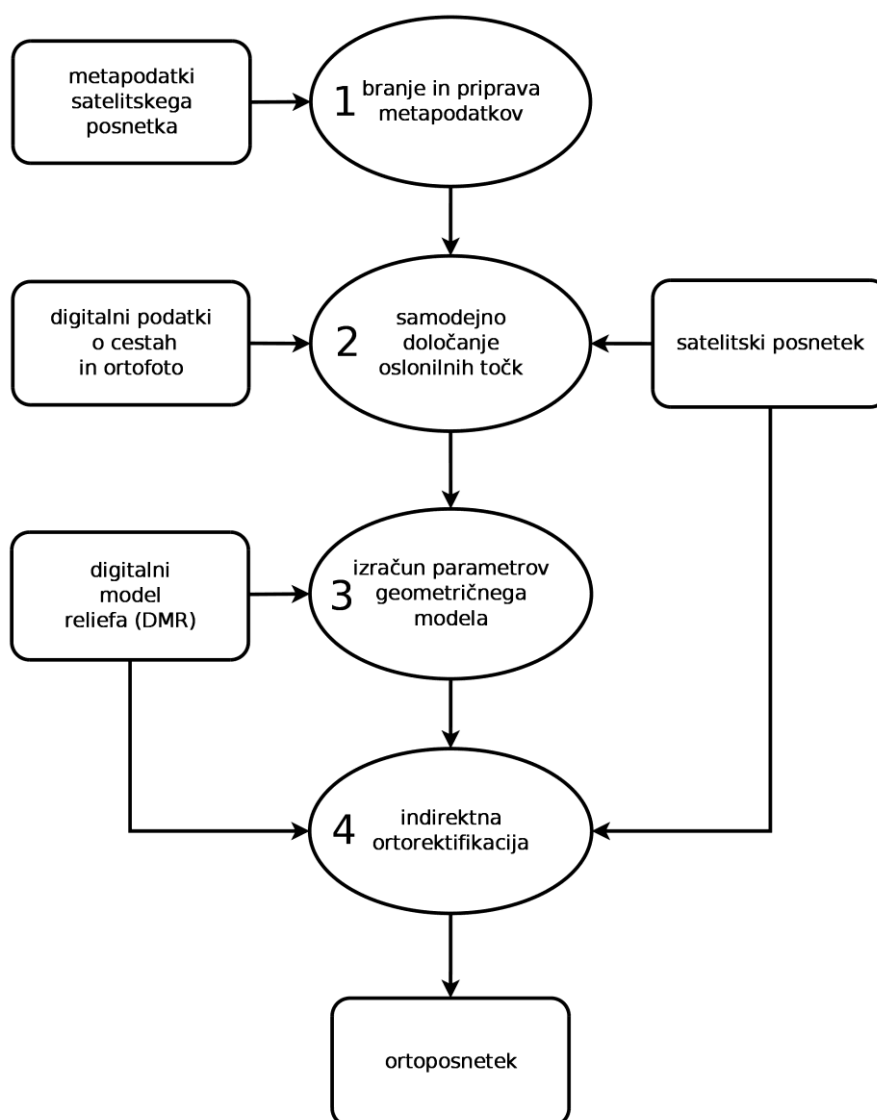
Uspešnost delovanja razvite metode samodejne ortorektifikacije smo preizkusili s petimi empiričnimi poskusi. V poglavju 6 smo poskuse, s katerimi smo preverili točnost samodejno določenih oslonilnih točk, ocenili najboljše število uporabljenih točk, izbrali najboljšo metodo za robustno oceno, preizkusili delovanje metod za izločanje grobih napak ter ocenili točnost izdelanih ortoposnetkov, opisali. Rezultati poskusov so prikazani v nadaljevanju naloge (poglavje 8). Poleg ugotavljanja robustnosti razvitega postopka so poskusi služili za izbiro najprimernejših metod in vhodnih podatkov ter vrednosti začetnih parametrov.

Poskuse smo opravljali z naborom podatkov, ki je obsegal tri posnetke satelitov RapidEye in tri posnetke satelita WorldView-2. Posnetki obeh sistemov se razlikujejo v več lastnostih, najpomembnejša pa sta prostorska ločljivost in velikost posnetkov, ki je odvisna predvsem od širine pasu snemanja. Posnetki RapidEye imajo ločljivost 6,5 m, medtem ko imajo večspektralni posnetki WorldView-2 ločljivost 2 m in obsegajo manjše območje. Obe vrsti posnetkov sta reprezentativna predstavnika v svojih ločljivostnih razredih, kar zadostuje za primerno oceno delovanja postopka z vrstičnim modelom senzorja. Ker podatkov polnoslikovnih sistemov nismo imeli na razpolago, polnoslikovnega geometričnega modela nismo empirično ovrednotili.

7 SAMODEJEN POSTOPEK ORTOREKTIFIKACIJE

V tem poglavju bo opisano delovanje samodejnega postopka za ortorektifikacijo oz. delovanje posameznih algoritmov, ki so bili razviti v okviru doktorske disertacije. Postopek je sestavljen iz štirih osnovnih modulov (slika 16), ki so opisani vsak v svojem podpoglavju:

- modul za branje in pripravo metapodatkov (7.1),
- modul za samodejno določanje oslonilnih točk (7.2),
- modul za izračun parametrov geometričnega modela (7.3) in
- modul za izvedbo ortorektifikacije (7.4).



Slika 16: Samodejni postopek za ortorektifikacijo je sestavljen iz štirih osnovnih modulov.

Figure 16: The automatic orthorectification procedure is divided into four main modules.

Vsi moduli so bili napisani (kodirani) v programskem jeziku IDL (Interactive Data Language). Izjema je modul za iskanje oslonilnih točk, ki je delno napisan v programskem jeziku C++, delno pa v IDL. Podrobneje bodo predstavljeni priprava podatkov, geometrični model in ortorektifikacija. Čeprav je bila samodejna določitev točk namensko izdelana za ortorektifikacijski postopek, večina tega dela ni bila narejena v okviru doktorske disertacije, zato bo prikazana le na kratko. Vsi moduli so vključeni v procesno verigo STORM, ki je v zaključni razvojni fazi in vključuje še druge module za obdelavo satelitskih podatkov, kot smo podrobneje opisali v podpoglavju 2.4.

7.1 Modul za branje in pripravo metapodatkov

Modul v dveh zaporednih korakih prebere metapodatke in jih pripravi za vstop v geometrični model.

7.1.1 Branje metapodatkov

Pred vstopom posnetka v geometrični model je potrebno pripraviti metapodatke, ki so nujni za delovanje modela. V ta namen je bil izdelan modul, ki prebere metapodatke in izloči tiste parametre, ki se kasneje uporabijo pri določevanju oslonilnih točk in v postopku za ortorektifikacijo posnetka: podatke o geometriji senzorja, lastnostih posnetka ter začetne približke parametrov zunanje in notranje orientacije.

Trenutno ponudniki posnetkov metapodatke večinoma že dostavljajo v standardiziranem zapisu XML (angl. EXtensible Markup Language), vendar je sama struktura datoteke XML različna (nestandardna) za skoraj vsak satelit. Izjeme so sateliti, ki so proizvod istega podjetja, vendar tudi v tem primeru lahko pride do razhajanj zaradi različnih verzij. Zaradi tega je bil bralnik za izločanje podatkov (angl. parser) izdelan za vsako vrsto posnetkov (metapodatkov) posebej. V nekaterih primerih vseh potrebnih podatkov ni v priloženi metapodatkovni datoteki (ponavadi so to podatki o snemalnem sistemu), zaradi česar je potrebno manjkajoče metapodatke pridobiti iz drugih virov (medmrežje, lastnik satelita ipd.). Metapodatki, ki smo jih uporabili pri ortorektifikaciji preizkušenih posnetkov, so:

- število vrstic posnetka,
- število stolpcev posnetka,
- število kanalov posnetka,
- goriščna razdalja snemalnega sistema,
- velikost piksla (elementa) v detektorju,
- kot gledanja satelita v času zajema,

- datum in ura zajema,
- čas zajema prve vrstice,
- rotacije satelita,
- položaj satelita (v sistemu ECEF; glej str. 70) in
- hitrost satelita (v sistemu ECEF).

Edina večja razlika med metapodatki posnetkov RapidEye in WorldView-2 je vrsta rotacij. Posnetki RapidEye imajo rotacije podane v obliki trojice kotov nagib, naklon in zasuk (angl. roll, pitch, yaw), medtem ko so pri WorldView-2 rotacije podane v obliki kvaternionov (glej str. 72).

Bralnik metapodatkov je prirejen za zapis XML, kar pomeni, da zaporedno bere podatke iz metapodatkovne datoteke glede na najdeno značko XML (angl. tag). Ko podatek najde, ga shrani v zanj določeno spremenljivko. Vse dobljene spremenljivke se shranijo v podatkovno strukturo (angl. data structure), ki služi za enostavno izmenjavo podatkov med moduli. Podatkovna struktura je vstopni podatek za naslednji korak, ki prebrane podatke pripravi za geometrični model.

7.1.2 Priprava metapodatkov za vstop v geometrični model

Drugi korak modula služi za preračun v prvem koraku prebranih podatkov v koordinatni sistem, ki se uporablja v modelu in v katerem bo tudi končni ortoposnetek. Pridobljeni podatki bodo vstopili v model kot približne vrednosti iskanih parametrov (neznanke), ki se dokončno določijo v modelu. Ker je model generičen oz. splošen, so približne vrednosti vedno enake (istega tipa) za vse senzorje. V pripravo metapodatkov vstopijo trirazsežne položajne koordinate satelita (tirnica), ki so v večini primerov že podane v koordinatnem sistemu ECEF (angl. Earth Centered Earth Fixed) in v časovnem intervalu, ki pokrije čas zajema posnetka ter čas pred začetkom in po koncu snemanja. V istem časovnem intervalu so ponavadi podane tudi rotacije satelita. V primeru rotacij je med senzorji večja razlika, saj so včasih podane s koti nagib, naklon in zasuk, drugič z rotacijami v sistem ECEF itn. V zadnjem času je tendenca podajanja kotov v obliki kvaternionov, ki zahtevajo še dodatno preračunavanje za vstop v model.

V primeru vrstičnega skenerja se vhodni metapodatki uporabijo za izračun 24 parametrov zunanje orientacije. Ker je tirnica razdeljena na dva segmenta, se parametri dvakrat ponovijo. Vsak segment ima devet parametrov za opis položaja in tri za rotacije satelita. Pri polnoslikovnem senzorju pa imamo le tri parametre za položaj in tri za rotacije satelita (poleg parametrov notranje orientacije). Našteti parametri so torej izhodne vrednosti modula. Ker ima vsak senzor svojo obliko zapisa metapodatkov, je bilo potrebno izdelati prav toliko modulov za branje in pripravo metapodatkov. Pri

pripravi se metapodatkom najprej uskladi enote (pretvorba v metre, decimalne stopinje, sekunde). Pri izdelavi modula je bilo potrebno biti posebno pozoren pri enotah (tudi predznakih) za goriščno razdaljo teleskopa in velikosti elementov (pikslov) na detektorju.

V nadaljevanju začne modul s preračunavanjem podatkov položaja satelita v slovenski koordinatni sistem in obliko, ki jo zahteva geometrični model. Najprej pretvori čas prve posnete vrstice in čase za podane položaje satelita v sekunde. Nato se izračuna čas začetka $t_{zač}$, sredine t_{sre} in konca t_{kon} za oba segmenta tirnice, ki jo je satelit prepotoval v času snemanja. Šele potem je na vrsti preračun položajnih koordinat iz ECEF v slovenski koordinatni sistem D48 oz. Gauss-Kruegerjevo projekcijo. Koordinate ECEF, ki se nanašajo na elipsoid WGS84, se najprej spremenijo v kartezične koordinate na elipsoidu Bessel². Sledi transformacija v elipsoidne koordinate in v končno projekcijo (Borčič, 1976). Tako izračunane koordinate so vstopni podatek za izračun približnih vrednosti. V kolikor se ortoposnetki računajo za druge države oziroma v drugi projekciji, je potrebno transformacijo prilagoditi za to projekcijo. V bolj splošnem primeru se lahko izravnavo računa tudi v sistemu ECEF (npr. Poli, 2005), vendar je potrebno pred uporabo vse ortoposnetke še preprojicirati v želeni koordinatni sistem. V vseh primerih je nadaljnja obdelava enaka. Vrednosti se v modulu najprej interpolirajo s kubičnimi zlepkami, kar daje najboljše rezultate, posebno, če so podatki o tirnici bolj redki (z večjimi časovnimi presledki). Iz zlepkov modul poišče vrednosti za čas začetka, sredine in konca za oba segmenta tirnice. Na koncu se iskane vrednosti dobijo z enačbami (Poli, 2005):

$$d_1 = \frac{X(t_{kon}) - X(t_{zač})}{t_{kon} - t_{zač}}$$
$$d_2 = \frac{2 \cdot X(t_{sre}) - X(t_{zač}) - X(t_{kon})}{(t_{kon} - t_{zač})^2}$$
$$X_0 = X_{zač} \tag{62}$$
$$X_2 = \frac{d_2}{2}$$
$$X_1 = d_1 - 2 \cdot X_2.$$

V enačbah (62) je podan primer za koordinato X. Začetne vrednosti za koordinati Y in Z se dobi na enak način.

Pri rotacijah iščemo le tri t.i. fotogrametrične kote (ω , φ , κ) za vsak segment. Koti so rotacije slikovne ravnine snemalnega sistema oz. senzorja satelita v objektni koordinatni sistem. Ker v modulu iščemo samo približne vrednosti rotacij, smo izračun poenostavili tako, da smo računali rotacije v lokalni

² Procesiranje lahko deluje tako v starem koordinatnem sistemu D48, kot v novem D96. Trenutno je operativna različica še v sistemu D48.

sistem, ki je tangen na elipsoid in ima izhodišče v središču posnetka. Pri izračunu rotacij so se pokazale večje razlike pri podanih metapodatkih za posamezen satelit. Na primer, posnetki RapidEye imajo podane kote oz. rotacije glede na tirnico satelita, medtem ko imajo posnetki satelitov WorldView-2 ter Pleiades 1A in 1B rotacije glede na sistem ECEF. Poleg tega imajo nekateri novejši sateliti, tudi zadnji trije, kote podane v obliki kvaternionov. Kvaternioni so alternativni matematični zapis orientacij ali rotacij nekega objekta v trirazsežnem prostoru. V primerjavi z Eulerjevimi koti so bolj enostavni in jih je lažje izračunati. Trenutno se vedno bolj uporabljajo v robotiki, računalniški grafiki, navigaciji, orbitalni mehaniki satelitov itn. (Kuipers, 1999). Čeprav imajo kvaternioni nekaj več prednosti, smo jih morali pred vključitvijo v model pretvoriti v Eulerjeve kote, ki so še vedno večkrat prisotni v metapodatkih in so tudi vhodni podatki v izravnavo. Transformacija poteka po enačbah (63), (64) in (65) (ASTRIUM, 2012). Kvaternione Q_n se najprej normalizira z:

$$norm = \sqrt{Q_0^2 + Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2}, \quad (63)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Q_0}{norm} \\ \frac{Q_1}{norm} \\ \frac{Q_2}{norm} \\ \frac{Q_3}{norm} \end{bmatrix}. \quad (64)$$

Nato se izračuna rotacijsko matriko med koordinatnim sistemom slikovne ravnine in sistemom ECEF z:

$$\mathbf{Rot}_{ECEF} = \begin{bmatrix} w^2 + x^2 - y^2 - z^2 & 2 \cdot (x \cdot y - w \cdot z) & 2 \cdot (x \cdot z + w \cdot y) \\ 2 \cdot (x \cdot y + w \cdot z) & w^2 - x^2 + y^2 - z^2 & 2 \cdot (y \cdot z - w \cdot x) \\ 2 \cdot (x \cdot z - w \cdot y) & 2 \cdot (y \cdot z + w \cdot x) & w^2 - x^2 - y^2 + z^2 \end{bmatrix}. \quad (65)$$

Za izračun končne približne rotacije smo rabili še rotacijo iz sistema ECEF v lokalni tangenti koordinatni sistem z izhodiščem na površini elipsoida. Omenjena rotacija je sestavljena iz zasukov okoli osi X in Y z:

$$\mathbf{Rot}_{LG} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + 90^\circ) & 0 & -\sin(\varphi + 90^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi + 90^\circ) & 0 & \cos(\varphi + 90^\circ) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\lambda - 180^\circ) & \sin(\lambda - 180^\circ) & 0 \\ -\sin(\lambda - 180^\circ) & \cos(\lambda - 180^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (66)$$

Končno rotacijo pa pridobimo s produktom obeh rotacij:

$$\mathbf{Rot} = \mathbf{Rot}_{LG} \cdot \mathbf{Rot}_{ECEF}. \quad (67)$$

Če končno rotacijsko matriko Rot predstavimo kot:

$$\mathbf{Rot} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (68)$$

dobimo Eulerjeve kote z enačbami (Kraus, 2000):

$$\begin{aligned} \omega &= a \tan\left(-\frac{r_{23}}{r_{33}}\right) \\ \varphi &= a \sin(r_{13}) \\ \kappa &= a \tan\left(-\frac{r_{12}}{r_{11}}\right). \end{aligned} \quad (69)$$

V primeru, ko imamo podane kote za nagib, naklon in zasuk (npr. RapidEye), se postopek prične z interpolacijo kotov s kubičnimi zlepkami. Po interpolaciji se poišče kote za sredino obeh segmentov. Rotacijo v sistem ECEF dobimo z množenjem rotacije iz sistema sensorja v orbitalni koordinatni sistem in iz orbitalnega v sistem ECEF. Rotacijo iz koordinatnega sistema satelita v orbitalni sistem dobimo z enačbo, kjer so vstopni podatki koti nagib, naklon in zasuk:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{s} \rightarrow \mathbf{o}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (70)$$

kjer so elementi matrike:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos(\textit{pitch}) \cdot \cos(\textit{yaw}) + \sin(\textit{pitch}) \cdot \sin(\textit{roll}) \cdot \sin(\textit{yaw}) \\ r_{12} &= \cos(\textit{roll}) \cdot \sin(\textit{yaw}) \\ r_{13} &= -\sin(\textit{pitch}) \cdot \cos(\textit{yaw}) + \cos(\textit{pitch}) \cdot \sin(\textit{roll}) \cdot \sin(\textit{yaw}) \\ r_{21} &= -\cos(\textit{pitch}) \cdot \sin(\textit{yaw}) + \sin(\textit{pitch}) \cdot \sin(\textit{roll}) \cdot \cos(\textit{yaw}) \\ r_{22} &= \cos(\textit{roll}) \cdot \cos(\textit{yaw}) \\ r_{23} &= \sin(\textit{pitch}) \cdot \sin(\textit{yaw}) + \cos(\textit{pitch}) \cdot \sin(\textit{roll}) \cdot \cos(\textit{yaw}) \\ r_{31} &= \sin(\textit{pitch}) \cdot \cos(\textit{roll}) \\ r_{32} &= -\sin(\textit{roll}) \\ r_{33} &= \cos(\textit{roll}) \cdot \cos(\textit{pitch}). \end{aligned} \quad (71)$$

Rotacijo v ECEF pa dobimo z vektorji položaja p in hitrostmi h v sistemu ECEF, ki so del metapodatkov. Vektorja najprej interpoliramo s kubičnimi zlepkami in določimo vrednosti na sredini segmentov. Z enačbami (Jovanovic et al., 1999):

$$\begin{aligned}
 r_1 &= -\frac{p}{\|p\|} \\
 r_2 &= -\frac{r_1 \times h}{\|r_1 \times h\|} \\
 r_3 &= r_2 \times r_1
 \end{aligned} \tag{72}$$

izračunamo vektorje s katerimi dobimo rotacijsko matriko:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{O} \rightarrow \mathbf{E}} = [r_3 \quad r_2 \quad r_1]. \tag{73}$$

Dobljena skupna rotacijska matrika se uporabi za rotacijo v lokalni koordinatni sistem. Na koncu se izvede še izračun končnih kotov po enačbah (69).

Pri delu s kvaternioni se interpolacija izvede šele po preračunu v kote ω , φ in κ . Modul tudi v tem primeru uporablja kubične zlepkke. Vstopni podatki v model so koti za sredine segmentov.

Vse pripravljene podatke in druge uporabne podatke, ki smo jih prebrali iz metapodatkovne datoteke, se na koncu modula zapiše v podatkovno strukturo. Podatkovna struktura se v postopku uporablja za prenos podatkov med moduli, ki so napisani v jeziku IDL. Podatki iz podatkovne strukture se uporabijo v modulu za izračun parametrov geometričnega modela.

7.2 Modul za samodejno določanje oslonilnih točk

Tudi modul za samodejno določanje oslonilnih točk je razdeljen na dva zaporedna koraka. Prvi korak poleg surovega posnetka uporablja še metapodatke in digitalne podatke o cestah. Digitalni podatki o cestah so na podatkovnem strežniku v rastrirani obliki in so sestavljeni iz treh virov vektorskih podatkov: cestnih podatkov iz DTK5, cestnih podatkov iz ZKGJI in podatkov OpenStreetMap za območja izven meja Slovenije. Glede na podatka o položaju in velikosti posnetka, ki ju dobimo iz metapodatkov, se izreže ustrezno območje digitalnih podatkov o cestah, iz katerih se takoj izračuna podatke oddaljenosti od cest. Za tem ali vzporedno lahko že poteka zaznava in izločanje cest iz surovega posnetka z morfološkim operatorjem. Pridobljene podatke se uporabi za določanje oslonilnih točk, kot je opisano v poglavju 3. V primeru dela z visokoločljivimi posnetki se proces po tem koraku ustavi in točke se zapišejo v tekstovno datoteko, ki je rezultat modula. Če pa ima vhodni posnetek zelo visoko ločljivost, se izvede še drugi korak.

Drugi korak uporablja državni ortofoto, s katerim dodatno izboljšamo točnost oslonilnih točk. Modul za vsako točko, ki jo dobimo po prvem koraku, izreže izsek iz surovega posnetka in ortofota. Središče izsekov je iskana točka. Oba izseka se najprej prevzorčita na enako prostorsko ločljivost in obrežeta tako, da je izsek surovega posnetka velikosti 100×100 pikselov in za 20 % večji od ortofota. Najboljši položaj (največja korelacija) korelacijskega okna (izsek ortofota) znotraj iskalnega okna (izsek iz

posnetka) predstavlja končni položaj točke. Pridobljene koordinate in natančnosti korelacije se zapišejo v tekstovno datoteko, ki je vhodni podatek za geometrični model.

7.3 Modul za izračun parametrov geometričnega modela

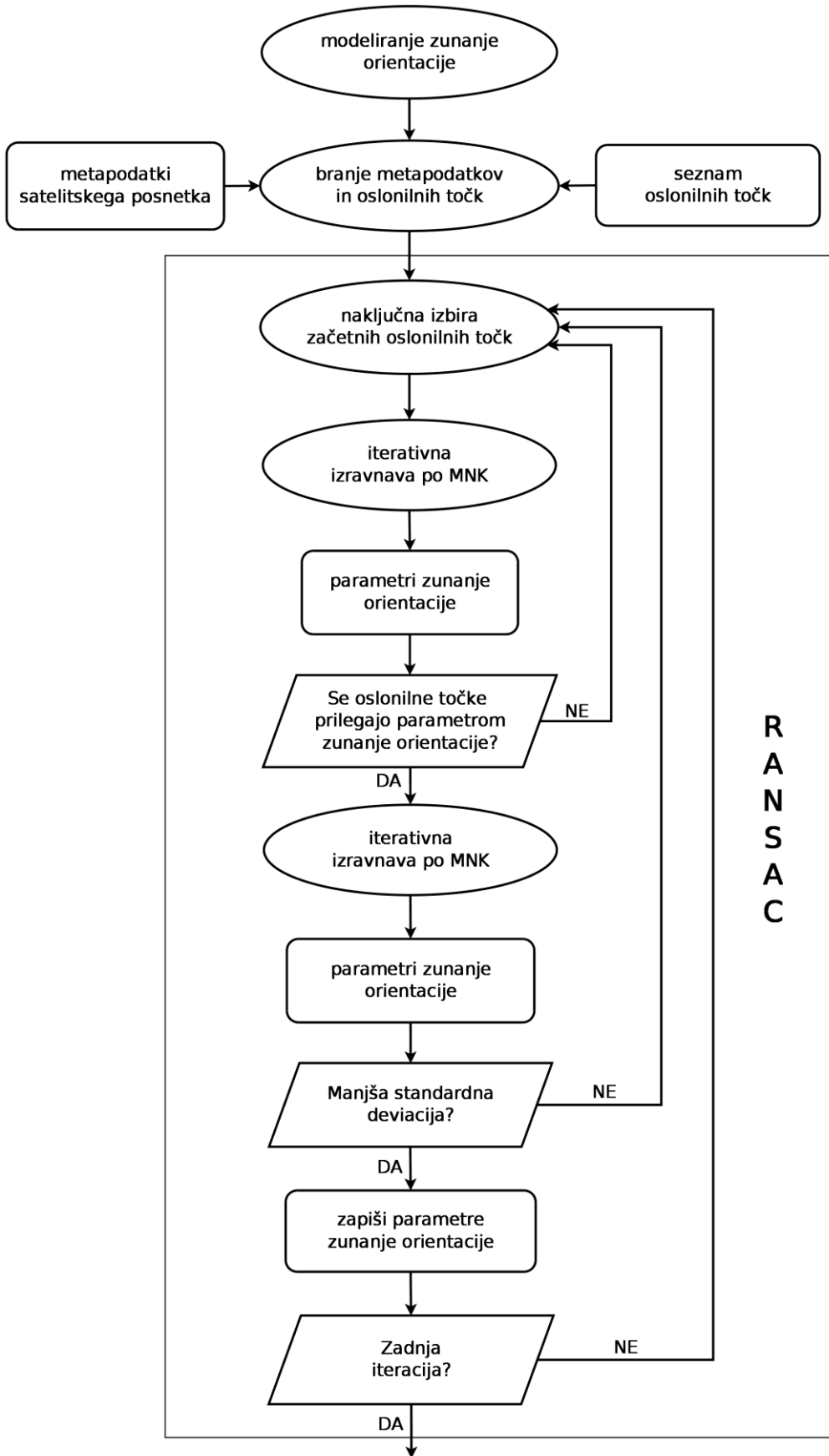
Modul za izračun parametrov geometričnega modela je najbolj zapleten del postopka in osrednji del naloge. Poleg izhodne podatkovne strukture modula za pripravo podatkov geometrični model uporablja še tekstovno datoteko s samodejno določenimi oslonilnimi točkami in DMR. V modelu se uporablja veliko iterativnih korakov in napredno določanje ter izločanje oslonilnih točk z grobimi napakami. Prav zaradi iterativnosti in iskanja konvergenca lahko postopek traja različno dolgo časa, odvisno od posnetka in števila dobljenih oslonilnih točk. V modulu se izvaja vrstični ali polnoslikovni model, odvisno od vrste posnetkov. V nekaterih segmentih modula se geometrična modela izvajata enako (npr. branje točk), v drugih (npr. izravnava) pa je postopek drugačen zaradi različnega načina snemanja in števila neznank. Polnoslikovni senzor je preprostejši in računsko manj zahteven (razlike so opisane v poglavju 4).

V modulu za izračun parametrov geometričnega modela se najprej prebereta DMR in datoteka s točkami. Iz datoteke se preberejo vsi ključni podatki za model: ID točke, X in Y koordinati točke iz referenčnih podatkov, x in y slikovni koordinati iz surovega posnetka in natančnost določitve točke (kriterijska funkcija oz. stopnja korelacije). Iz DMR-ja se za vsako točko pridobi še njena višina. Slikovne koordinate se preračunajo iz slikovnega koordinatnega sistema v koordinatni sistem kamere z:

$$\begin{aligned}x &= \left(v - \frac{N_v}{2} \right) \cdot p_v \\y &= \left(s - \frac{N_s}{2} \right) \cdot p_v.\end{aligned}\tag{74}$$

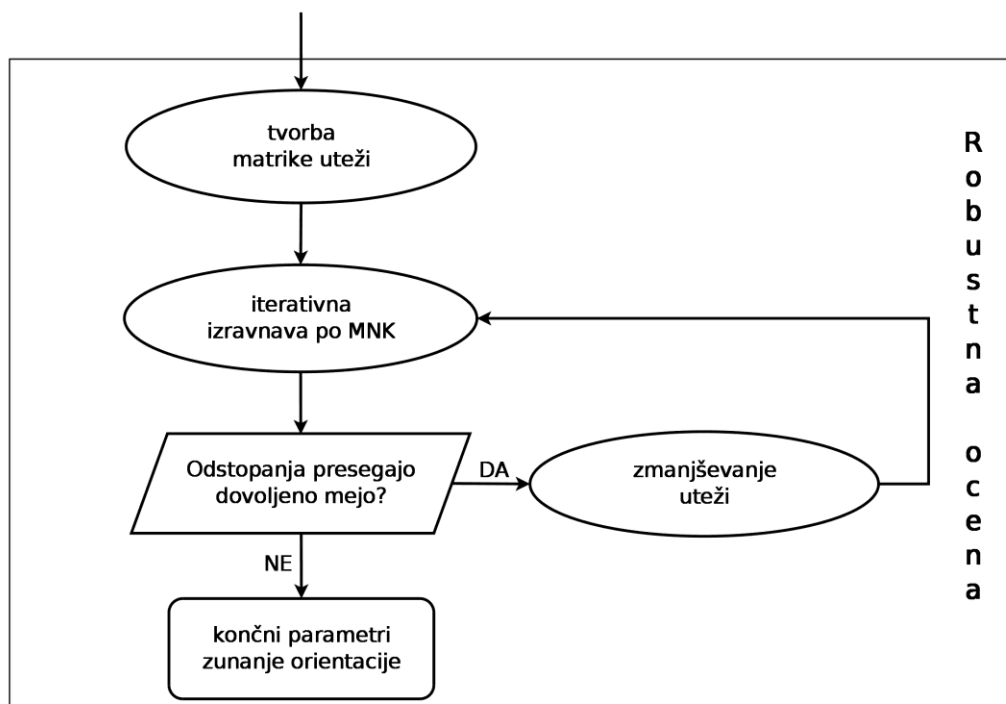
kjer je p_v velikost piksla, N_v število pikslov v vrstici, N_s število pikslov v stolpcu, v in s pa sta slikovni koordinati točke. Pri vrstičnem skenerju nastavimo koordinato x na vrednost 0, saj ima vsaka vrstica svoje izhodišče.

Nato se v modulu slikovne koordinate popravijo zaradi vpliva ukrivljenosti Zemlje in atmosfere refrakcije. Glede na višino leta in kot gledanja se koordinatam spremeni vrednosti za omenjena vpliva. Tako pripravljene koordinate vstopijo v geometrični model. Podrobno delovanje geometričnega modela prikazuje slika 17.



Se nadaljuje...

...nadaljevanje.



Slika 17: Shematizacija poteka izračunov parametrov geometričnega modela.

Figure 17: Schematic procedure of the computation of geometric model parameters.

Kot je razvidno na sliki 17, je celotna obdelava razdeljena na dva dela, ki potekata drug za drugim in sta podrobno opisana v poglavju 4. Oba dela delujeta iterativno na več ravneh. Poleg tega se v trenutni implementaciji celoten postopek ponovi petkrat, na koncu pa obvelja najboljši rezultat. Zaradi slabo razporejenih in netočnih oslonilnih točk lahko postane izravnava nestabilna. V takih primerih so rezultati po robustni oceni preslabi za uporabo in kot končni rezultati obveljajo le parametri, dobljeni po izravnavi z algoritmom RANSAC, ki je na take razmere manj občutljiva.

Rezultat izravnave so končni parametri zunanje in notranje orientacije, ki se zapišejo v podatkovno strukturo. Poleg parametrov se v podatkovno strukturo zabeležijo tudi osnovni podatki o posnetku, ki se uporabijo še v modulu za izvedbo ortorektifikacije. Na koncu modula se preveri še notranja natančnost modela. Parametre se uporabi za izračun prostorskih koordinat oslonilnih točk iz pikseljskih koordinat s kolinearnimi enačbami. Tako izračunane prostorske koordinate se odštejejo od koordinat, pridobljenih v modulu za samodejno določanje oslonilnih točk. Iz razlik se izračuna RMSE za obe koordinati in še skupni po enačbi:

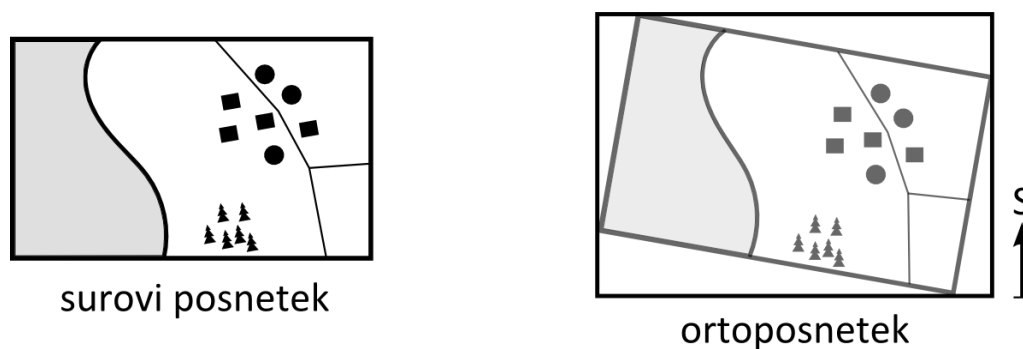
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n}}, \quad (75)$$

kjer je n število opazovanj in r razlika med koordinatama.

RMSE oslonilnih točk sicer ne poda absolutne natančnosti, vendar je vseeno dober pokazatelj prilaganja modela vhodnim točkam. Ob odsotnosti kontrolnih točk je to edina zanesljiva mera natančnosti modela.

7.4 Modul za izvedbo ortorektifikacije

Podatkovna struktura z izračunanimi parametri se prenese v modul za izvedbo ortorektifikacije, ki izdela končni ortoposnetek. Algoritem najprej prebere surov posnetek z vsemi kanali. Prvi korak ortorektifikacije je določitev velikosti matrike končnega ortoposnetka. Ker ima večina satelitov v sončno-sinhroni tirnici inklinacijo okoli 98° , je večina posnetkov zasukanih v smeri urinega kazalca glede na geografski sever. Zaradi tega največkrat vsi štirje vogalni piksli posnetka določajo največji in najmanjši obseg ortoposnetka (slika 18). Zato se v modulu najprej izračuna prostorske koordinate vogalov končne matrike. Pri tem se uporabi direktno metodo iterativnega sledenja žarku, ki sicer ni najhitrejša, je pa najbolj zanesljiva in splošno uporabna. Izračun poteka z inverznimi kolinearnimi enačbami, začetna vrednost višine pa je največja vrednost uporabljenega modela reliefa. Iz izračunanih koordinat se z odštevanjem dobi velikost območja posnetka. Z deljenjem z ločljivostjo posnetka pa dobimo velikost matrike ortoposnetka, izraženo v pikslih.



Slika 18: Določanje velikosti ortoposnetka (matrike) glede na surovi posnetek.

Figure 18: Orthoimage (matrix) extent determination in relation to the raw image.

Tako izračunane meje ne veljajo vedno za posnetke zajete pod velikim kotom, tiste, ki prikazujejo gorata območja, ali posnetke satelitov z zmožnostjo snemanja v smeri poldnevnika. Zaradi tega se velikost matrike poveča za 200 pikslov v obeh smereh. Na koncu postopka ortorektifikacije se prazne piksele odstrani in tako zmanjša velikost datoteke.

Pri izdelavi ortoposnetka se v trenutni različici modula uporablja DMR z ločljivostjo 12,5 m. Ker model reliefa ni visokoločljiv in večina satelitov snema pod majhnimi koti, se za ortorektifikacijo

lahko uporabi veliko različnih metod. V sklopu doktorske disertacije je bila predvidena primerjava rezultatov ortorektifikacij z različnimi DMR-ji, predvsem visokoločljivim lidarskim DMR-jem, vendar do zaključka našega dela ta še ni bil na voljo. Uporaba drugega DMR-ja v razvitem postopku je preprosta, paziti je treba le na uporabljen metodo glede na prostorsko ločljivost podatkov. Za izdelan postopek smo izbrali indirektno metodo ortorektifikacije (glej poglavje 5.1.2), saj ima nizke zahteve glede strojne opreme, je zelo hitra in ustreza uporabljenemu DMR-ju.

Ortorektifikacija zaporedno obdeluje piksele za vsako vrstico vhodnega posnetka. Najprej obdela zgornji levi piksel in nadaljuje po vrstici do zadnjega piksla. Vsakemu pikslu oz. prostorski koordinati piksla (X in Y) se najprej določi višina na DMR-ju. Višino se izračuna z bilinearnim prevzorčenjem sosednjih pikslov. Nato sledi postopek interpolacije, ki je opisan v poglavju 5.2. Rezultat so slikovne koordinate piksla. Če sta koordinati znotraj meja surovega posnetka, se radiometrično vrednost piksla izračuna z bilinearno interpolacijo sosednjih pikslov na surovem posnetku in nato zapiše v ortoposnetek. Če sta koordinati izven meja posnetka, ostane piksel prazen oziroma se mu pripiše vrednost 0. Dobljeno matriko radiometričnih vrednosti, ki jo praviloma tvorimo v bralno-pisalnem pomnilniku (angl. random-access memory, RAM), se na koncu izpiše na trdi disk v zapisu GeoTIFF. Datoteke TIFF se lahko bere v vseh geografskih informacijskih sistemih in v večini grafičnih programov.

7.5 Povzetek in zaključki poglavja 7

Postopek ortorektifikacije je sestavljen iz štirih osnovnih modulov:

- modula za branje in pripravo metapodatkov,
- modula za samodejno določanje oslonilnih točk,
- modula za izračun parametrov geometričnega modela in
- modula za izvedbo ortorektifikacije.

Moduli se izvajajo zaporedno, od branja metapodatkov do ortorektifikacije. Prvi modul prebere metapodatke iz datoteke v formatu XML in jih pripravi za vstop v naslednje module. Branje in priprava sta prilagojena za vsak snemalni sistem posebej, saj ima vsak ponudnik posnetkov svoj način zapisovanja metapodatkov. Drugi modul samodejno določi oslonilne točke z referenčnimi podatki o cestah in državnim ortofotom. Postopek je različen za posnetke z različno prostorsko ločljivostjo. Modul za izračun parametrov geometričnega modela je najbolj zapleten del postopka. Deluje v več iteracijah in ima vgrajena postopka za izločanje grobih napak. Modul je splošen in obdeluje vse vrste posnetkov po enakem postopku. Na koncu postopka modul za izvedbo ortorektifikacije izdelava ortoposnetek z DMR-jem z ločljivostjo 12,5 m in parametri geometričnega modela. Vsi moduli, ki so

bili razviti v okviru doktorske disertacije, so napisani v programskem jeziku IDL. IDL omogoča pisanje hitrih programov, ki lahko delujejo z velikimi matrikami, kar je v drugih razvojnih okoljih pogosto težava. Izdelani programi uspešno obdelajo datoteke velikosti več gigabajtov. Pozorni moramo biti le na razpoložljivi prostor na bralno-pisalnem pomnilniku, kjer poteka shranjevanje vseh začetnih, vmesnih in končnih rezultatov.

Razviti algoritmi potrebujejo za delovanje več pomožnih podatkov, ki jih mora zagotavljati namenski strežnik z zanesljivo in hitro povezavo do procesnega računalnika. Teh podatkov (DMR, ortofoto, podatki o cestah ipd.) je samo za območje Slovenije približno 450 GB. Z načrtovano uporabo podatkov boljših ločljivosti in podatkov drugih držav se bo v prihodnje količina precej povečala. Za potrebe Slovenije je trenutna rešitev zadovoljiva, v primeru širitve pa bo potrebno celostno načrtovanje shranjevanja in rokovanja tako s pomožnimi podatki, kot s posnetki in rezultati.

8 REZULTATI EMPIRIČNIH POSKUSOV NA IZBRANIH POSNETKIH

Vrstični geometrični model senzorja in indirektna metoda ortorektifikacije, opisana v prejšnjih poglavjih, sta bila uporabljena za orientacijo in ortorektifikacijo izbranih posnetkov RapidEye in WorldView-2. Posnetki oz. senzorji, ki so jih zajeli, se med seboj precej razlikujejo, predvsem glede prostorske ločljivosti, velikosti posnetka in načina snemanja. Vse uporabljene posnetke smo pridobili pri Centru odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije (Vesolje-SI). Pri obdelavi pomembne osnovne značilnosti satelitov (snemalnih sistemov) in posnetkov, smo opisali v poglavju 6.2. V tem poglavju so prikazani rezultati poskusov (opisanih v poglavju 6.1), ki so bili dobljeni z razvitimi algoritmi in izbranimi posnetki, ter njihova analiza. Rezultati za RapidEye so prikazani v poglavju 8.1, za WorldView-2 pa v poglavju 8.2.

8.1 Poskusi s posnetki RapidEye

8.1.1 Ocena točnosti samodejno določenih oslonilnih točk

Pred oceno točnosti samodejno določenih točk smo preverili točnost koeficientov RPC z ročno določenimi točkami, ki smo jih v izravnavi uporabili kot kontrolne točke. Rezultati so prikazani v preglednici 6. Če upoštevamo napako merjenja točk, ki smo jo ocenili na 0,5 piksla, lahko iz rezultatov vidimo, da so koeficienti RPC posnetkov Koper in Radgona zelo točni. Z RPC-ji posnetka Bohinj dobimo RMSE nad enim pikslom, kar smo pričakovali glede na topografijo območja. Na slabšo točnost koeficientov RPC tega posnetka kažeta tudi vrednosti največje napake in odstotek napak nad 2σ .

Preglednica 6: Točnost ročno določenih oslonilnih točk glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke RapidEye.

Table 6: Accuracy of the manual GCPs compared to coordinates computed from RPCs for RapidEye images.

Posnetek	Število oslonilnih točk	Največja napaka [piksel]	Napake nad 2σ [%]	RMSE X [piksel]	RMSE Y [piksel]	Skupni RMSE [piksel]
Radgona	22	1,15	0	0,45	0,49	0,66
Koper	26	1,61	0	0,37	0,86	0,94
Bohinj	27	2,26	7,4	0,75	0,90	1,17

Samodejno določene točke smo verificirali z istimi koeficienti RPC. Za vsak posnetek smo preverili dva niza oslonilnih točk, pri čemer je prvi vseboval vse točke (večji niz), drugi pa okoli 50 točk

(manjši niz). Točke v manjšem nizu smo izbrali glede na njihovo ocenjeno točnost in razporejenost po posnetku (poglavje 3). Preglednica 7 prikazuje RMSE samodejno detektiranih OT. Tudi rezultati teh točk kažejo na dobro ujemanje s koeficienti RPC. Za posnetka Radgona in Koper je RMSE pod enim pikslom, za posnetek Bohinj pa napaka presega en piksel.

Preglednica 7: Točnost samodejno določenih oslonilnih točk glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke RapidEye.

Table 7: Accuracy of the automatically extracted GCPs compared to coordinates computed from RPCs for RapidEye images.

Posnetek	Niz	Število oslonilnih točk	Največja napaka [piksel]	Napake nad 2σ [%]	RMSE X [piksel]	RMSE Y [piksel]	Skupni RMSE [piksel]
Radgona	Večji	501	5,86	1,6	0,51	0,41	0,65
	Manjši	50	5,68	4,0	0,79	0,55	0,96
Koper	Večji	467	3,46	3,9	0,48	0,73	0,88
	Manjši	56	1,70	5,3	0,47	0,77	0,90
Bohinj	Večji	325	3,63	4,3	0,75	1,24	1,45
	Manjši	53	3,02	5,7	0,69	1,08	1,28

Glede na razgibano območje, ki ga pokriva posnetek Bohinj, so rezultati pričakovani in v vseh primerih kažejo na kakovostne OT. Zanimiva je primerjava med nizi točk, saj v dveh primerih manjši niz vsebuje slabše točke, kar kaže na nezanesljivost podatka o točnosti točk, ki ga dobimo v procesu določanja. Tudi pri ohranjanju optimalne razporeditve točk se v nizu obdržijo točke z večjimi napakami.

Za pravilno validacijo celotnega ortorektifikacijskega postopka je pomembno oceniti velikost odstopanj določenih OT. Dobra kazalnika za validacijo in prisotnost grobih napak sta največja napaka in odstotek napak, ki so za 2σ večji ali manjši od srednje napake. Čeprav lahko iz preglednice 7 sklepamo, da so v vseh nizih prisotne večje grobe napake, je njihov odstotek majhen in nikoli ne presega 6 %. Izračunane vrednosti potrjujejo tezo, da v geometričnem modelu potrebujemo dobre metode za odkrivanje in izločanje grobih napak.

8.1.2 Vpliv števila oslonilnih točk na izračun parametrov geometričnega modela

Za vsak posnetek smo izdelali več nizov oslonilnih točk s 15 do 500 točkami. Vsak niz smo uporabili v geometričnem modelu, ki je deloval s 100 iteracijami algoritma RANSAC in Kleinovo metodo za robustno oceno, ki je pri opravljenih poskusih delovala zelo robustno in je dosegala najboljše rezultate. RANSAC smo ponavljali, dokler v novonastalem nizu ni ostalo vsaj 90 % točk prvotnega niza, torej dokler ni bilo izločenih manj kot 10 % prvotnih točk. Prag je bil določen glede na rezultate ocene

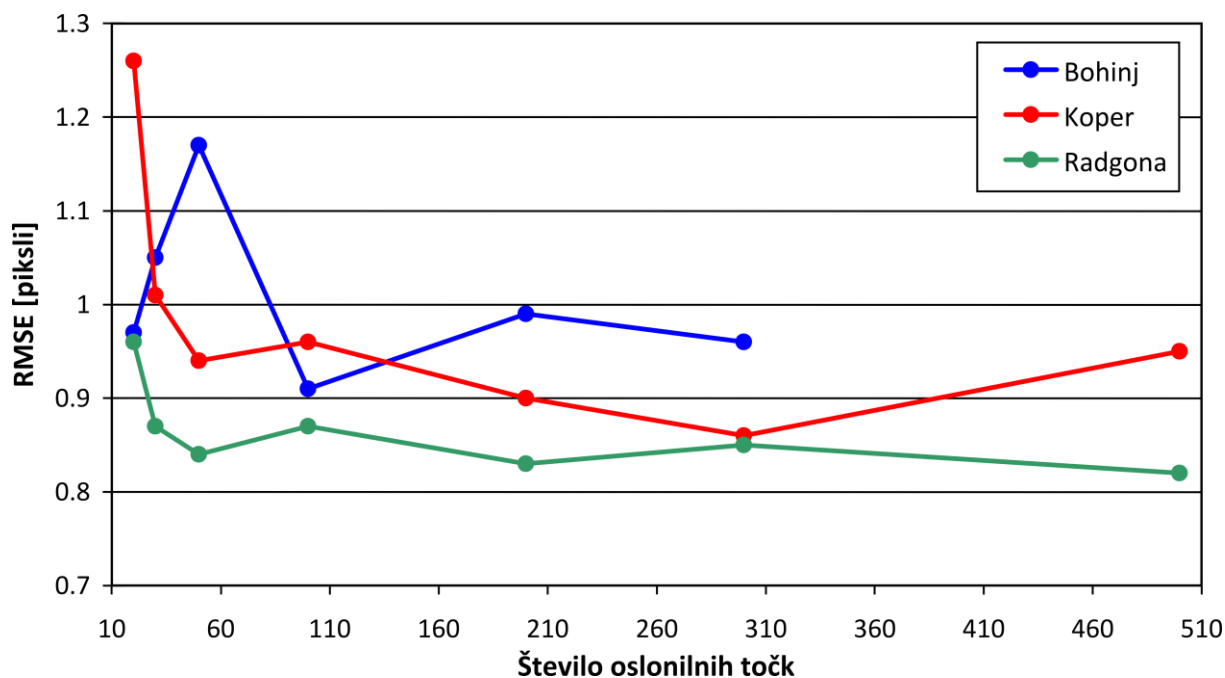
točnosti določevanja točk (glej podpoglavje 8.1.1). Če je bilo v nizu več grobih napak, je njihov vpliv na rezultate zmanjšala metoda robustne ocene.

Rezultati za vse posnetke so prikazani v preglednici 8. Iz preglednice je razvidno, da RANSAC običajno izloči okoli 10 % točk ne glede na število začetnih točk. Neizločene točke naj ne bi imele grobih napak oz. so te majhne. Preostale točke se uporabijo v izravnavi z robustno oceno. Končna točnost rezultatov, ki jo podaja RMSE na ročno merjenih kontrolnih točkah, je skoraj v vseh primerih manj kot piksel, ne glede na število uporabljenih OT (slika 19). Napaka RMSE je v primeru manjšega števila točk večja, vendar je razlika majhna. Rezultati kažejo na uspešno delovanje modela tudi z majhnim številom OT. Kljub temu v večini primerov večje število točk (100 in več) zagotavlja boljše rezultate, zato se v geometričnem modelu priporoča uporaba večjega števila OT. Ker je določanje točk samodejno, je določitev več sto točk hitro in enostavno ter pri izračunu parametrov občutno večje število točk geometričnega modela ne upočasni.

Preglednica 8: Točnost rezultatov izravnave, ki so bile dobljene z različnim številom oslonilnih točk za posnetke RapidEye.

Table 8: Accuracy of the adjustment results obtained with different numbers of GCPs for RapidEye images.

Posnetek	Število oslonilnih točk	Število uporabljenih oslonilnih točk	Število kontrolnih točk	RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]
Radgona	501	460	22	0,59	0,82
	303	273	22	0,62	0,85
	207	196	22	0,58	0,83
	96	87	22	0,65	0,87
	50	46	22	0,59	0,84
	32	32	22	0,82	0,87
	16	15	22	0,77	0,96
Koper	467	433	26	0,67	0,95
	295	276	26	0,70	0,86
	202	187	26	0,73	0,90
	98	92	26	0,71	0,96
	56	53	26	0,72	0,94
	32	31	26	0,69	1,01
	15	14	26	0,88	1,26
Bohinj	325	297	27	1,01	0,96
	203	184	27	1,01	0,99
	101	91	27	0,95	0,91
	53	48	27	0,94	1,17
	29	27	27	0,85	1,05
	16	15	27	0,80	0,97



Slika 19: RMSE KT za vsak točkovni niz za posnetke RapidEye.

Figure 19: RMS error at ICPs for every point set for RapidEye images.

8.1.3 Metode za robustno oceno

Primerjavo metod za robustno oceno smo izvedli z nizom OT, ki je dosegel najboljše rezultate v prejšnjem poskusu. Uporabili smo 100 iteracij algoritma RANSAC; kot že omenjeno, smo jih ponavljali, dokler v novonastalem nizu ni ostalo vsaj 90 % točk prvotnega niza.

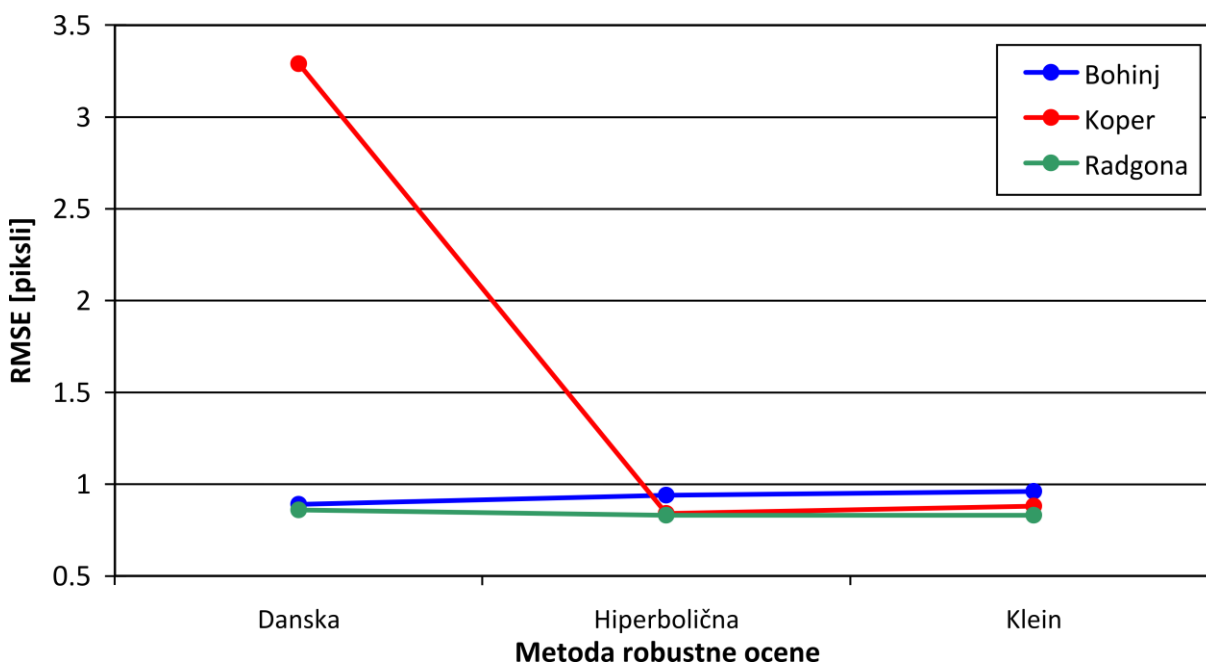
V preglednici 9 so prikazane napake RMSE na oslonilnih in kontrolnih točkah po izravnavi z algoritmom RANSAC in po izravnavi z metodami robustne ocene, ki naj bi omejile vpliv preostalih OT z napakami. Iz rezultatov je razvidno, da robustna ocena le redko izboljša rezultate izravnave z algoritmom RANSAC. Rezultati večinoma ostanejo nespremenjeni, kar kaže na dobro delovanje iterativne metode RANSAC in na manjše število grobih napak, ki ne presegajo 10 % točk prvotnega niza. Robustna ocena bi prišla do izraza v primeru večjega števila grobih napak. Pri primerjanju metod robustne ocene (slika 20) najbolj izstopa slabše delovanje Danske metode, ki uporablja eksponentno utežno funkcijo. Metoda iz neznanih razlogov v nekaterih primerih ni zanesljiva, saj privede do velikih napak. Delovanje ostalih metod, ki uporabljajo hiperbolično funkcijo, je uspešno in zanesljivo.

Preglednica 9: Primerjava metod za robustno oceno na posnetkih RapidEye.

Table 9: Comparison between the robust estimation methods for RapidEye images.

Posnetek	RANSAC		Metoda	Robustna ocena	
	RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]		RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]
Radgona	0,76	0,82	Danska	0,85	0,86
	0,66	0,83	Hiperbolična	0,66	0,83
	0,76	0,82	Klein	0,77	0,83
Koper	0,81	0,93	Danska	2,64	3,29
	0,75	0,87	Hiperbolična	0,71	0,84
	0,75	0,88	Klein	0,74	0,88
Bohinj	1,01	0,98	Danska	0,98	0,89
	0,97	0,94	Hiperbolična	0,97	0,94
	0,98	0,96	Klein	0,98	0,96

Izbira najboljše metode za robustno oceno ni trivialna, saj lahko nekatere metode celo poslabšajo rezultate. Metode, ki uporabljajo hiperbolično funkcijo, so se v primeru posnetkov RapidEye izkazale za bolj zanesljive in robustne. Kljub temu so se rezultati izboljšali le v nekaterih primerih. Med mnogimi ponavljanji poskusov smo ugotovili, da je uporaba robustne ocene smiselna v primerih, ko je po izravnavi z algoritmom RANSAC med točkami prisotnih vsaj nekaj grobih napak. Zaradi tega je priporočljivo odstraniti največ 10 % OT, tudi če je med opazovanji prisotnih še več grobih napak.



Slika 20: Obnašanje preizkušenih metod robustne ocene za posnetke RapidEye.

Figure 20: Behaviour of the tested robust estimation methods for RapidEye images.

8.1.4 Detekcija in izločanje grobih napak

Pri preizkušanju izločanja grobih napak smo uporabili enake začetne nastavitve in metode kot pri prejšnjih poskusih.

Rezultati izravnave so prikazani v preglednicah 10 in 11. Pri posnetku Radgona je RANSAC v večjem nizu izločil 13 OT, med njimi sedem točk z umetno dodanimi napakami od štirih do desetih pikselov. Le tri točke z najmanjšimi dodanimi napakami so ostale v nizu, ki je bil nato uporabljen v izravnavi z robustno oceno. Natančnost končnih rezultatov je primerljiva z natančnostjo rezultatov brez dodanih napak (preglednica 8). Iz rezultatov lahko sklepamo, da robustna ocena v večini primerov popravi natančnost rezultatov izravnave (slika 21). Preglednica 11 prikazuje odstopanja točk z napakami, ki so ostale v nizu uporabljenih točk do konca geometričnega modela. Vrednosti so zelo podobne dodanim napakam, kar pomeni, da jih je geometrični model prepoznal in omejil njihov vpliv na rezultate. Uspešno izločanje je predvsem posledica večjega števila točk in robustne ocene, ki je zmanjšala vpliv točk z napakami. Podobne zaključke lahko postavimo tudi pri manjšem nizu.

Preglednica 10: Rezultati izravnave s številom prisotnih in izločenih oslonilnih točk z dodanimi napakami, številom vseh in uporabljenih oslonilnih točk ter RMSE po izravnavi z algoritmom RANSAC in na koncu postopka (robustna ocena) za posnetke RapidEye.

Table 10: Adjustment results with the number of present and removed erroneous GCPs, number of all and used GCPs and RMS errors after the RANSAC adjustment and at the end (Robust estimation) for RapidEye images.

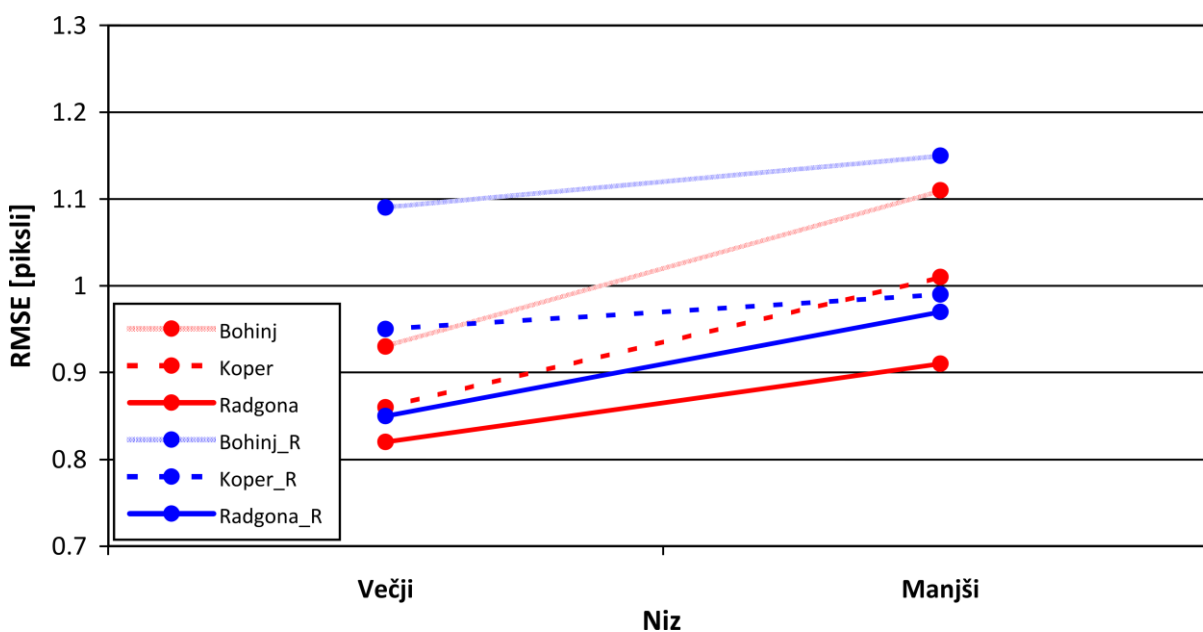
Posnetek	Niz	Vse točke/ Uporabljene točke	Meja izločanja [%]	Izločene napake/ Prisotne napake	RANSAC		Robustna ocena	
					RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]	RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]
Radgona	Več.	207/194	90	7/10	0,75	0,85	0,76	0,82
	Man.	50/46	90	2/5	0,94	0,97	0,95	0,91
Koper	Več.	202/187	90	6/10	0,95	0,95	0,88	0,86
	Man.	56/52	90	3/5	0,92	0,99	0,85	1,01
Bohinj	Več.	101/94	90	5/10	1,38	1,09	1,21	0,93
	Man.	29/25	80	3/5	0,94	1,15	0,94	1,11

Pri posnetku Koper je RANSAC v večjem nizu odstranil šest točk, pri manjšem pa tri točke z napakami (slika 22). Med izločenimi točkami ni nobene od tistih, ki smo jih dobili s podatki OpenStreetMap, kar kaže, da lahko tudi s temi podatki dobimo kakovostne OT. Podobne ugotovitve veljajo tudi za druga dva posnetka (priloga B). Tudi v tem primeru na končno natančnost rezultatov dodane napake ne vplivajo in odstopanja pokvarjenih točk odražajo dodane grobe napake.

Preglednica 11: Velikost odstopanj oslonilnih točk z dodanimi napakami, ki so ostale po izravnavi z algoritmom RANSAC za večji in manjši niz točk posnetkov RapidEye.

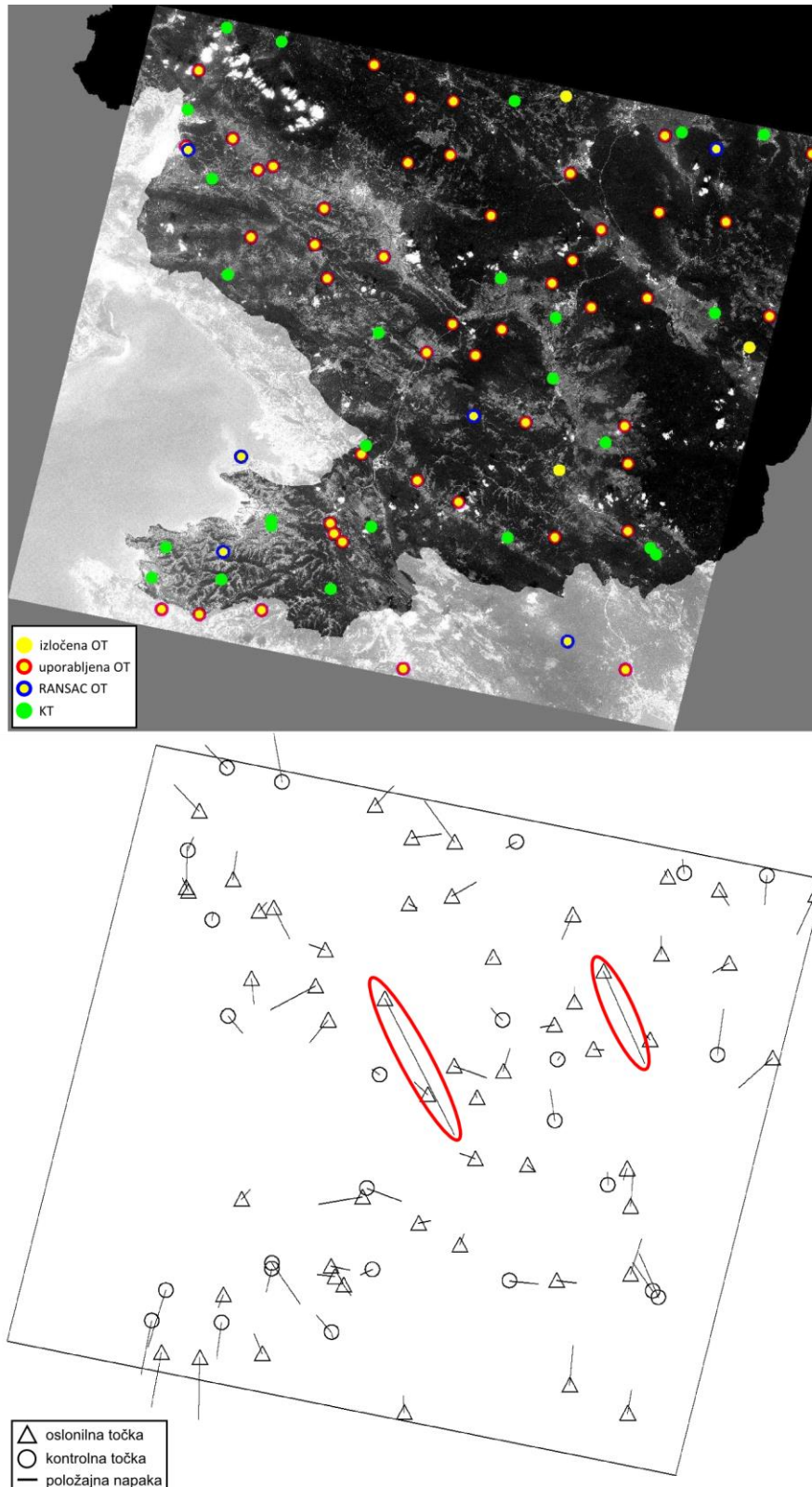
Table 11: Residuals of the erroneous GCPs that remained after the RANSAC adjustment for the large and small point sets of RapidEye images.

Posnetek	Groba napaka [piksel]	Večji niz		Manjši niz	
		dx [piksel]	dy [piksel]	dx [piksel]	dy [piksel]
Radgona	1	0,05	1,07	-1,48	0,68
	2	-2,24	1,73	-1,96	1,49
	3	-3,34	2,98	-2,72	2,24
Koper	1	-1,11	1,09	-0,86	0,52
	2	-2,52	1,60	-2,52	1,09
	3	-3,91	2,39	-	-
	4	-3,52	3,29	-	-
Bohinj	1	-0,32	0,59	-1,69	1,07
	2	-2,07	2,28	-	-
	3	-2,78	2,44	-2,01	1,10
	4	-4,63	2,96	-	-
	5	-4,56	3,15	-	-



Slika 21: Rezultati izravnave (RMSE KT) po izravnavi z algoritmom RANSAC (črtkana črta) in na koncu postopka (polna črta) za večji in manjši niz točk posnetkov RapidEye. Iz slike je razvidno, da v splošnem robustna ocena izboljša natančnost rezultatov izravnave.

Figure 21: Adjustment results (RMS error at ICPs) after RANSAC adjustment (dashed line) and at the end (solid line) for the large and small point sets of RapidEye images. It can be noted that robust estimation generally improves the accuracy of the adjustment results.



Slika 22: Porazdelitev in odstopanja oslonilnih in kontrolnih točk. Na zgornji sliki je prikazan posnetek Koper (RapidEye). Oslonilne točke so prikazane z rumeno barvo, kontrolne pa z zeleno. Na spodnji sliki sta neodstranjeni točki z dodanimi napakami označeni z rdečima elipsama.

Figure 22: GCP and ICP distribution and residuals. In the image above the Koper scene (RapidEye) is shown. Ground control points are represented in yellow colour and check points in green. In the image below two unremoved GCPs with artificial errors are marked with red ellipses.

Rezultati za posnetek Bohinj so podobni prejšnjim primerom, vendar so opazne nekatere razlike. Po izločanju v večjem nizu, ki je na začetku imel 101 točko, je ostalo pet OT z napakami. Njihova končna odstopanja odražajo dodane napake z nekaj manjšimi odkloni. Nepričakovani rezultati so se pojavili v manjšem nizu, kjer samo točki z enim in tremi piksli dodanih napak nista bili izločeni v prvem delu izravnave. Poleg tega imata točki manjša odstopanja od pričakovanih. Razlog za tako obnašanje modela je verjetno v manjšem številu točk v nizu (29) in zelo razgiban teren, ki otežuje enakomerno razporeditev OT. Kljub temu je natančnost rezultatov po izravnavi še vedno primerljiva z natančnostjo rezultatov brez dodanih napak.

8.1.5 Ocena položajne točnosti ortoposnetkov

Ortoposnetke RapidEye smo izdelali s parametri zunanje orientacije, ki smo jih dobili pri najnatančnejši rešitvi modela, in z DMR-jem z ločljivostjo 12,5 m. Ortorektificiran posnetek Koper je prikazan na sliki 23 (glej tudi prilogo C). Točnost ortoposnetkov smo ocenili z ročno izmerjenimi kontrolnimi točkami. Na vsakem ortoposnetku smo izbrali 30 enakomerno porazdeljenih točk, ki so ležale na križiščih cest. Iz letalskega ortofota z ločljivostjo 0,5 m in ocenjeno točnostjo pod 1 m smo pridobili položajne koordinate istih lokacij. Točnost (RMSE) ortorektificiranih posnetkov smo dobili s primerjavo obeh nizov koordinat.



Slika 23: Ortorektificiran posnetek Koper (RapidEye).

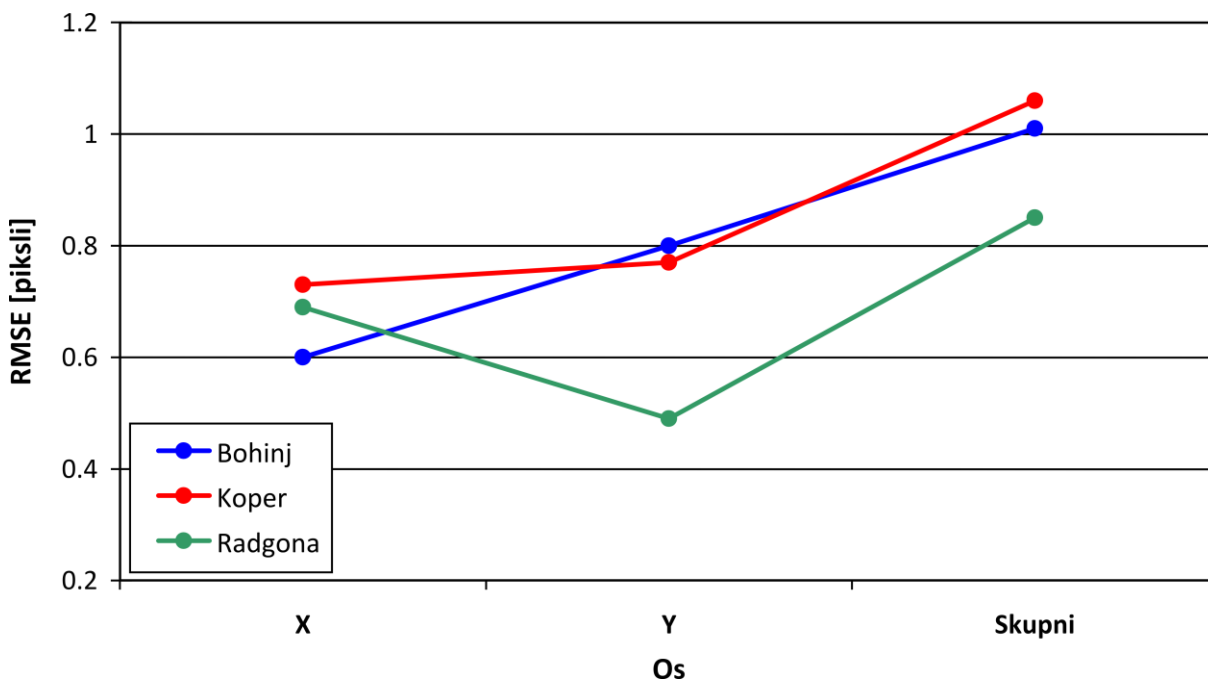
Figure 23: Orthorectified Koper image (RapidEye).

Preglednica 12 prikazuje položajno točnost (RMSE) ortoposnetkov. Dobljene napake RMSE (slika 24) kažejo na visoko podobnost z rezultati, dobljenimi z geometričnim modelom na kontrolnih točkah (preglednica 8). Posnetek Radgona, ki prikazuje večinoma ravninski teren, je dosegel najboljšo natančnost (0,85 piksela), medtem ko je RMSE preostalih posnetkov okoli piksela oz. 6,5 m. Izračunana natančnost je sicer odraz le izmerjenih točk z dobro vidnih križišč, ki pa se večinoma nahajajo na nižjem, ravninskem terenu. Zaradi tega položajne natančnosti gorskih območij (sredinski del posnetka Bohinj) nismo mogli ustrezno oceniti. Točnost takih območij bi lahko ocenili s postavljanjem točk na gorske grebene, kar pa je težko zaradi prisotnosti snega in slabše točnosti DMR-ja na gorskih območjih.

Preglednica 12: Točnost izdelanih ortoposnetkov RapidEye glede na državni ortofoto, ki je bil uporabljen kot referenca.

Table 12: Accuracy of the generated RapidEye orthoimages compared to national orthophoto used as reference.

Posnetek	Število kontrolnih točk	RMSE [piksel]		
		X	Y	Skupni
Radgona	30	0,69	0,49	0,85
Koper	30	0,73	0,77	1,06
Bohinj	30	0,60	0,80	1,01



Slika 24: RMSE na 30 ročno določenih kontrolnih točkah za posnetke RapidEye.

Figure 24: RMS errors at 30 manually selected check points for RapidEye images.

8.1.6 Povzetek in zaključki poglavja 8.1

V poglavju smo predstavili rezultate poskusov s posnetki RapidEye. Ovrednotili smo točnost samodejno določenih točk, preizkusili delovanje geometričnega modela z različnimi nizi točk, primerjali metode robustne ocene, preverjali robustnost pri izločanju grobih napak in točnost izdelanih ortoposnetkov. Rezultati testov so dokazali, da lahko postopek samodejno izdelava ortoposnetke s položajno točnostjo (RMSE) boljše od piksla, tudi če je med podatki prisotnih več grobih napak. Natančnost glede na kontrolne točke je bila boljše kot piksel tudi v primeru uporabe manj kot 20 OT. Točnost rezultatov in robustnost obdelave je odvisna od izbrane metode za robustno oceno. V primeru posnetkov RapidEye so se metode s hiperbolično funkcijo izkazale za boljše in bolj stabilne kot metode z eksponentno funkcijo. Poskusi kažejo, da je priporočljivo izločiti največ 10 % OT z napakami tudi v primeru, ko je prisotnih več kot toliko napak. Vpliv preostalih napak je bolje zmanjšati z metodo robustne ocene.

Za skoraj vse aplikacije je pomemben tudi čas poteka celotnega postopka. Obdelava posameznega posnetka RapidEye (5 kanalov) traja približno eno uro (odvisno od velikosti posnetka) s povprečnim osebnim računalnikom, ki vsebuje procesor Xeon Quad-Core s hitrostjo 2,5 GHz in 8 GB RAM-a. Korak branja metapodatkov traja le trenutek, medtem ko določanje OT poteka približno 38 % celotnega časa. Za posnetke RapidEye je izračun parametrov geometričnega modela ponavadi zelo hiter in traja le 1 %-2 % časa. Zadnji korak, ortorektifikacija, je računsko najbolj zahteven in zajema preostalih 60 %.

8.2 Poskusi s posnetki WorldView-2

8.2.1 Ocena točnosti samodejno določenih oslonilnih točk

Zaradi zelo visoke ločljivosti posnetkov WorldView-2 so bile oslonilne točke pridobljene v dveh korakih (glej poglavje 3.1). Njihovo točnost pa smo ocenili z enakim postopkom, kot pri posnetkih RapidEye. Ocene točnosti koeficientov RPC z ročno določenimi točkami, ki smo jih v izravnavi uporabili kot kontrolne točke, so prikazane v preglednici 13. Če upoštevamo napako merjenja točk, je iz rezultatov razvidno, da so koeficienti RPC zelo točni, najbolj za posnetka Jesenice in Ljubljana. Koeficienti posnetka Jesenice so bili preverjeni samo na spodnji polovici posnetka, ki leži v Sloveniji. RPC-ji posnetka Bled so nekoliko slabši, se pa glede na RMSE bistveno ne razlikujejo od ostalih dveh posnetkov. Nekoliko slabša točnost koeficientov RPC tega posnetka se kaže tudi v vrednosti največje napake in odstotku napak nad 2σ .

Preglednica 13: Točnost ročno določenih OT glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke WorldView-2.

Table 13: Accuracy of the manual GCPs compared to coordinates computed from RPCs for WorldView-2 images.

Posnetek	Število oslonilnih točk	Največja napaka [piksel]	Napake nad 2σ [%]	RMSE X [piksel]	RMSE Y [piksel]	Skupni RMSE [piksel]
Jesenice	24	1,41	4,2	0,56	0,29	0,63
Bled	30	1,93	6,7	0,70	0,63	0,94
Ljubljana	30	1,64	3,3	0,52	0,55	0,76

Zaradi manjšega števila cest oz. križišč na posnetkih, lege (nekateri deli posnetkov so izven Slovenije) in razgibanega terena, je bilo na posnetkih WorldView-2 samodejno določenih manj točk. Posledično je bilo na voljo tudi manj nizov za nadaljnje poskuse. Samodejno določene točke smo najprej preverili s koeficienti RPC. Za vsak posnetek smo izbrali dva niza oslonilnih točk, pri čemer je prvi vseboval vse točke (večji niz), drugi pa okoli 50 oz. 30 točk (manjši niz). Točke v manjšem nizu smo izbrali glede na njihovo natančnost in razporejenost po posnetku. Preglednica 14 prikazuje dobljene RMSE samodejno določenih OT. Točnosti glede na ročno določene točke so nekoliko slabše, posebno za posnetka Jesenice in Ljubljana, v vseh primerih pa nekoliko presegajo velikost enega piksla. Najslabši rezultati so v primeru posnetka Jesenice, kjer smo (predvsem zaradi lege posnetka) dobili najmanj točk.

Preglednica 14: Točnost samodejno določenih OT glede na koordinate izračunane iz koeficientov RPC za posnetke WorldView-2.

Table 14: Accuracy of the automatically extracted GCPs compared to coordinates computed from RPCs for WorldView-2 images.

Posnetek	Niz	Število oslonilnih točk	Največja napaka [piksel]	Napake nad 2σ [%]	RMSE X [piksel]	RMSE Y [piksel]	Skupni RMSE [piksel]
Jesenice	Večji	75	5,05	2,67	0,87	0,90	1,25
	Manjši	31	4,82	3,23	0,86	1,19	1,47
Bled	Večji	158	3,73	4,43	0,83	0,74	1,11
	Manjši	50	3,52	6,0	0,88	0,91	1,26
Ljubljana	Večji	206	5,25	3,88	0,76	0,86	1,15
	Manjši	48	2,17	6,25	0,84	0,63	1,05

Če primerjamo nize točk, ugotovimo, da v dveh primerih manjši niz vsebuje slabše točke, kar tudi pri tem senzorju kaže na nezanesljivost podatka o točnosti točk, ki ga dobimo v procesu določanja. Tudi pri ohranjanju optimalne razporeditve točk se v nizu obdržijo točke z večjimi napakami. Čeprav lahko iz preglednice 14 sklepamo, da so v vseh nizih prisotne večje grobe napake, je njihov odstotek majhen

in le redko preseže 6 %. Kljub temu je točnost določanja nekoliko slabša kot v primeru posnetkov RapidEye in zaradi tega lahko pričakujemo tudi slabše rezultate geometričnega modela.

8.2.2 Vpliv števila oslonilnih točk na izračun parametrov geometričnega modela

Za vsak posnetek smo izdelali več nizov OT, ki so vsebovali od okrog 15 do okrog 200 točk. Vsak niz smo uporabili v geometričnem modelu, ki je zaradi nekoliko slabše točnosti točk deloval s 300 iteracijami algoritma RANSAC in Kleinovo metodo za robustno oceno. RANSAC smo ponavljali, dokler v novonastalem nizu ni ostalo vsaj 90 % točk prvotnega niza.

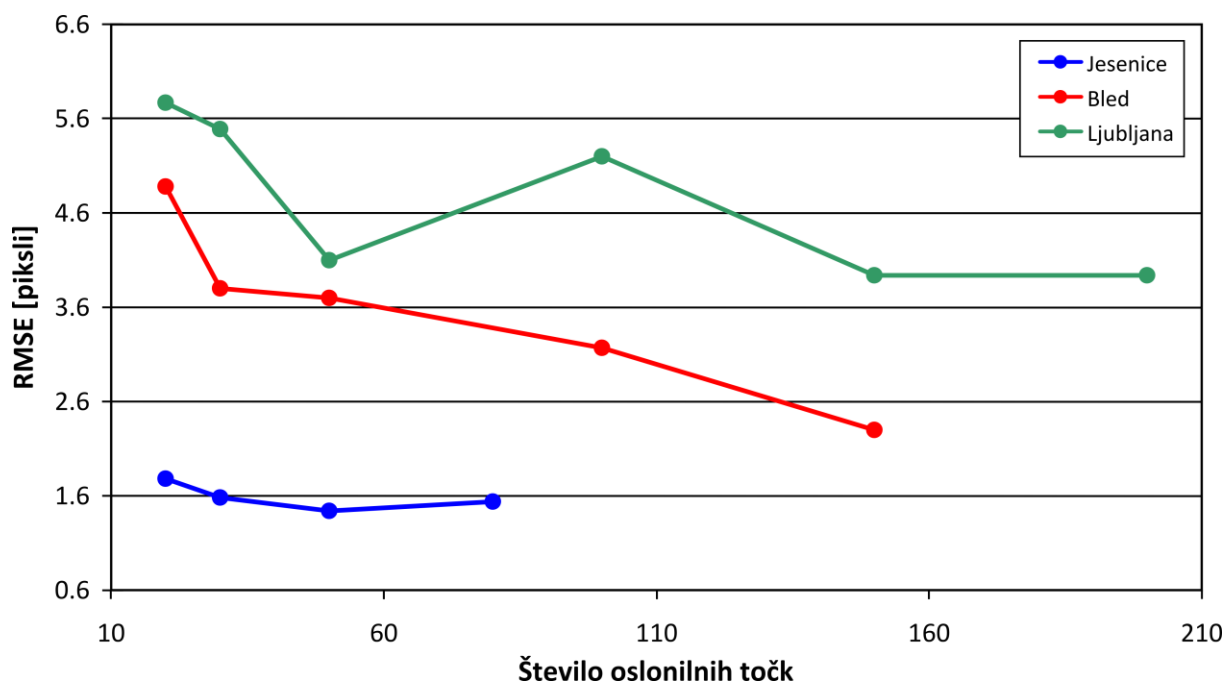
Rezultati za vse posnetke so prikazani v preglednici 15, iz katere je razvidno, da tudi v teh primerih RANSAC večkrat izloči okoli 10 % točk ne glede na število začetnih točk. Končna točnost rezultatov, ki jo podaja RMSE na ročno merjenih KT, je v vseh primerih nad velikostjo enega piksla (slika 25), na posnetku Ljubljana doseže celo vrednost nad velikostjo petih pikslov. Najboljše rezultate smo dobili s posnetkom Jesenice, ki pa je zelo specifičen glede razporeditve točk. Pri tem posnetku so tako oslonilne kot kontrolne točke prisotne samo v spodnjem delu posnetka, ki leži znotraj Slovenije (priloga B). Zaradi tega je točnost severnega dela posnetka neznana. Vrednosti RMSE KT so v rangi vrednosti RMSE glede na RPC-je (preglednica 14), kar kaže na dobro delovanje geometričnega modela. Na dober model kažejo tudi RMSE OT. Do podobnih zaključkov lahko pridemo tudi pri posnetku Bled. Model se je dobro prilagodil točkam (majhen RMSE OT), večje napake na KT pa so nastale zaradi slabe razporeditve OT po posnetku (slika 28). Zaradi pomanjkanja točk v hribovju (predvsem južni in zahodni del posnetka) imajo KT na tem delu večja odstopanja. Najslabše in nepričakovane rezultate smo dobili pri posnetku Ljubljana. Kljub temu, da je bila razporejenost in natančnost točk dobra, je model dosegal zelo slabo notranjo natančnost (RMSE OT), kar je imelo za posledico tudi slabe rezultate na KT. Pravega vzroka za slabše delovanje modela v tem primeru ne poznamo, sklepamo pa lahko, da je posledica načina snemanja (asinhrono, usmerjeno proti severu ipd.) in obdelave posnetka po snemanju, ki ju geometrični model trenutno še ne upošteva. Zaradi manjšega števila razpoložljivih posnetkov za preizkušanje je trenutno težko bolj natančno določiti vzroke slabših rezultatov.

Če upoštevamo število OT, ugotovimo, da je RMSE večja v primeru manjšega števila točk in v vseh primerih narašča do najmanjšega niza, kar je v skladu s pričakovanji. Model sicer uspešno deluje tudi z majhnim številom OT, vendar so v nekaterih primerih točnosti z manjšimi nizi točk precej slabše. Tudi zaradi slabše določitve točk je zelo priporočljiva uporaba večjega števila OT. Kot kažejo rezultati, je zelo pomembna enakomerna razporeditev točk, ki pa jo na nekaterih območjih, kjer ni cest oz. jih je malo ali so slabo vidne, težko dosežemo.

Preglednica 15: Točnost rezultatov izravnave, ki so bile dobljene z različnim številom OT za posnetke WorldView-2.

Table 15: Accuracy of the adjustment results obtained with different numbers of GCPs for WorldView-2 images.

Posnetek	Število oslonilnih točk	Število uporabljenih oslonilnih točk	Število kontrolnih točk	RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]
Jesenice	75	70	24	0,92	1,54
	50	48	24	1,17	1,44
	31	28	24	0,98	1,58
	15	14	24	0,74	1,78
Bled	158	149	30	0,99	2,30
	102	97	30	1,11	3,17
	50	47	30	1,15	3,70
	30	29	30	1,35	3,80
	15	14	30	0,88	4,88
Ljubljana	206	191	30	2,61	3,94
	152	145	30	2,85	3,94
	101	92	30	3,05	5,20
	48	45	30	3,06	4,10
	31	29	30	3,33	5,49
	16	15	30	2,97	5,77



Slika 25: RMSE KT za vsak točkovni niz posnetkov WorldView-2.

Figure 25: RMS error at ICPs for every point set of WorldView-2 images.

8.2.3 Metode za robustno oceno

Primerjavo metod za robustno oceno smo izvedli z nizom OT, ki je dosegel najboljše rezultate v prejšnjem poskusu. Druge začetne nastavitve so ostale enake kot pri prejšnjem poskusu.

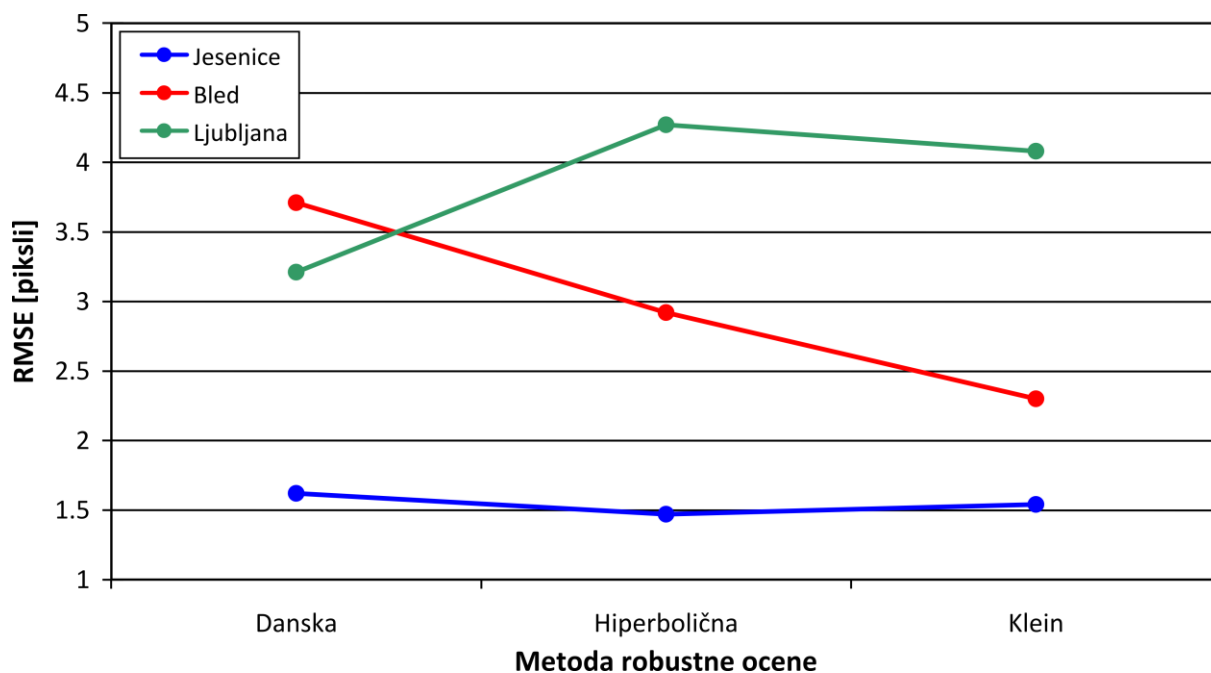
V preglednici 16 so prikazane napake RMSE na oslonilnih in kontrolnih točkah po izravnavi z algoritmom RANSAC in na koncu, po izravnavi z metodami robustne ocene. Tudi pri tem poskusu so bili rezultati metod zelo različni po posnetkih (slika 26). Pri posnetkih Jesenice in Bled so vse metode dosegale približno enake rezultate. Nekoliko slabše je delovala le Danska metoda, ki pa je imela tudi najslabše natančnosti točk po izravnavi z algoritmom RANSAC. Iz preglednice je razvidno, da je popravek robustne ocene opazen le v primeru slabših rezultatov izravnave z algoritmom RANSAC, kar vendarle dokazuje primerno delovanje vseh metod. Zaradi slabega delovanja modela pri posnetku Ljubljana je bila v tem primeru ocena in primerjava metod robustne ocene težavna. Metode so imele precejšnje težave pri izračunu parametrov, Danska metoda je npr. le enkrat dosegla smiselne rezultate (v drugih primerih so obveljali rezultati po izravnavi z algoritmom RANSAC). Najbolj robustno je delovala Kleinova metoda.

Preglednica 16: Primerjava metod za robustno oceno na posnetkih WorldView-2.

Table 16: Comparison between the robust estimation methods for WorldView-2 images.

Posnetek	RANSAC		Metoda	Robustna ocena	
	RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]		RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]
Jesenice	1,69	2,30	Danska	0,97	1,62
	0,89	1,44	Hiperbolična	0,90	1,47
	0,87	1,33	Klein	0,92	1,54
Bled	2,01	4,71	Danska	1,03	3,71
	1,45	4,09	Hiperbolična	1,01	2,92
	1,02	1,89	Klein	0,99	2,30
Ljubljana	2,43	3,11	Danska	2,51	3,21
	1,95	2,26	Hiperbolična	3,08	4,27
	2,74	4,57	Klein	2,70	4,08

Tudi v primeru posnetkov WorldView-2 se je najboljše izkazala uporaba hiperbolične funkcije. Čeprav je v večini primerov tudi eksponentna funkcija dobro delovala, je njena zanesljivost v taki obliki vprašljiva. Tudi pri teh primerih se je pokazalo, da je uporaba robustne ocene smiselna le, ko je po izravnavi z algoritmom RANSAC med točkami prisotnih vsaj nekaj grobih napak. Zaradi tega je priporočljivo odstraniti manjše število OT, tudi če je med opazovanji prisotnih še več grobih napak.



Slika 26: Lastnosti preizkušenih metod robustne ocene za posnetke WorldView-2.

Figure 26: Characteristics of the tested robust estimation methods for WorldView-2 images.

8.2.4 Detekcija in izločanje grobih napak

Pri preizkušanju izločanja grobih napak smo uporabili enake začetne nastavitve in metode kot pri prejšnjih poskusih.

Rezultati izravnave so prikazani v preglednicah 17 in 18. Zaradi nezanesljivega delovanja geometričnega modela pri posnetku Ljubljana smo poskus izločanja grobih napak izvajali samo na posnetkih Jesenice in Bled. Ker je bilo za posnetek Jesenice na voljo manj točk, smo v večjem nizu dodali napake šestim točkam, v manjšem pa trem. S tem smo lahko ohranili mejo izločanja točk pri 10 %. V obeh nizih je algoritem RANSAC pustil le točki z dodano napako enega in dveh pikslov. Čeprav je bila RMSE po izravnavi z algoritmom RANSAC nekoliko večja, so se natančnosti po izravnavi z robustno oceno izboljšale (slika 27) in se lahko primerjajo z natančnostjo rezultatov brez dodanih napak (preglednica 15). Postopek robustne ocene je torej v teh primerih nujen za doseg visoke točnosti. Preglednica 18 prikazuje odstopanja točk z napakami, ki so ostale v nizu uporabljenih točk do konca delovanja geometričnega modela. Vrednosti so precej podobne dodanim napakam, kar pomeni, da jih je geometrični model prepoznal in omejil njihov vpliv na rezultate. Uspešno prepoznavanje je predvsem posledica večjega števila točk in robustne ocene. Ugotovljeni zaključki veljajo tako za večji kot manjši niz.

Preglednica 17: Rezultati izravnave s številom prisotnih in izločenih oslonilnih točk z dodanimi napakami, številom vseh in uporabljenih oslonilnih točk ter RMSE po izravnavi z algoritmom RANSAC in na koncu postopka (robustna ocena) za posnetke WorldView-2. Zaradi slabega delovanja geometričnega modela poskusi s posnetkom Ljubljana niso bili izvedeni.

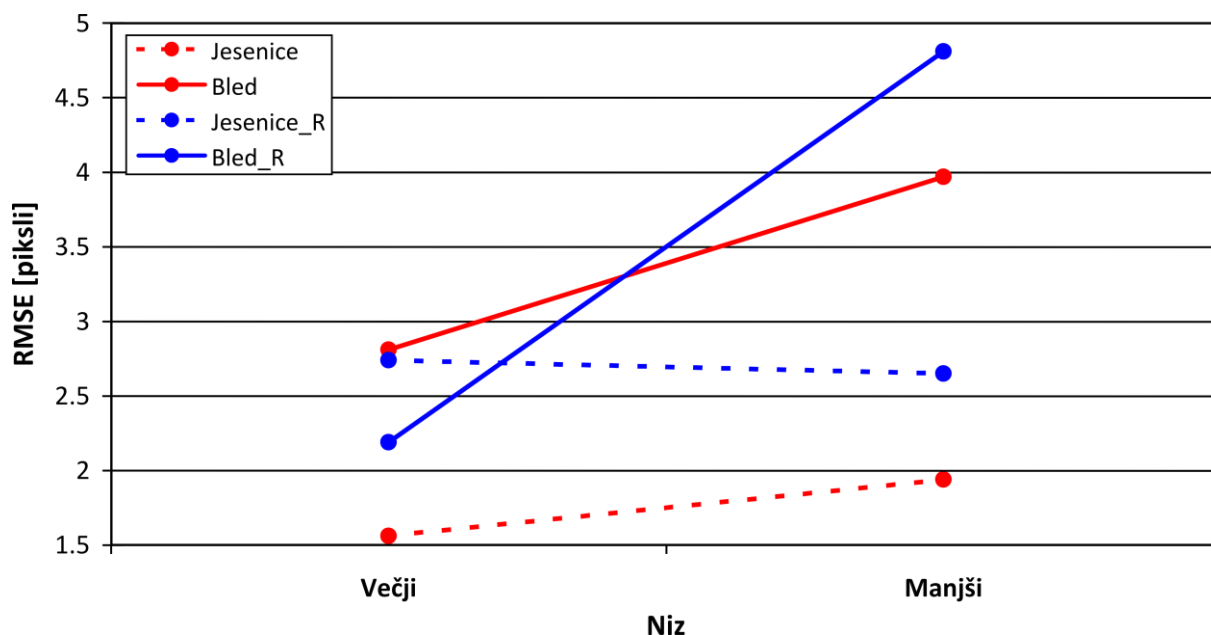
Table 17: Adjustment results with the number of present and removed erroneous GCPs, number of all and used GCPs and RMS errors after the RANSAC adjustment and at the end (Robust estimation) for WorldView-2 images. Due to poor results that were achieved with the geometric model the tests were not performed with the Ljubljana image.

Posnetek	Niz	Vse točke/ Uporabljene točke	Meja izločanja [%]	Izločene napake/ Prisotne napake	RANSAC		Robustna ocena	
					RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]	RMSE OT [piksel]	RMSE KT [piksel]
Jesenice	Več.	75/68	90	4/6	1,74	2,74	1,06	1,56
	Man.	30/28	90	1/3	1,58	2,65	1,18	1,94
Bled	Več.	158/145	90	7/10	1,25	2,19	1,10	2,81
	Man.	50/47	90	1/5	1,80	4,81	1,40	3,97
Ljubljana	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-

Preglednica 18: Velikost odstopanj oslonilnih točk z dodanimi napakami, ki so ostale po izravnavi z algoritmom RANSAC za večji in manjši niz točk posnetkov WorldView-2. Zaradi slabega delovanja geometričnega modela poskusi s posnetkom Ljubljana niso bili izvedeni.

Table 18: Residuals of the erroneous GCPs that remained after the RANSAC adjustment for the large and small point sets of WorldView-2 images. Due to poor results that were achieved with the geometric model the tests were not performed with the Ljubljana image.

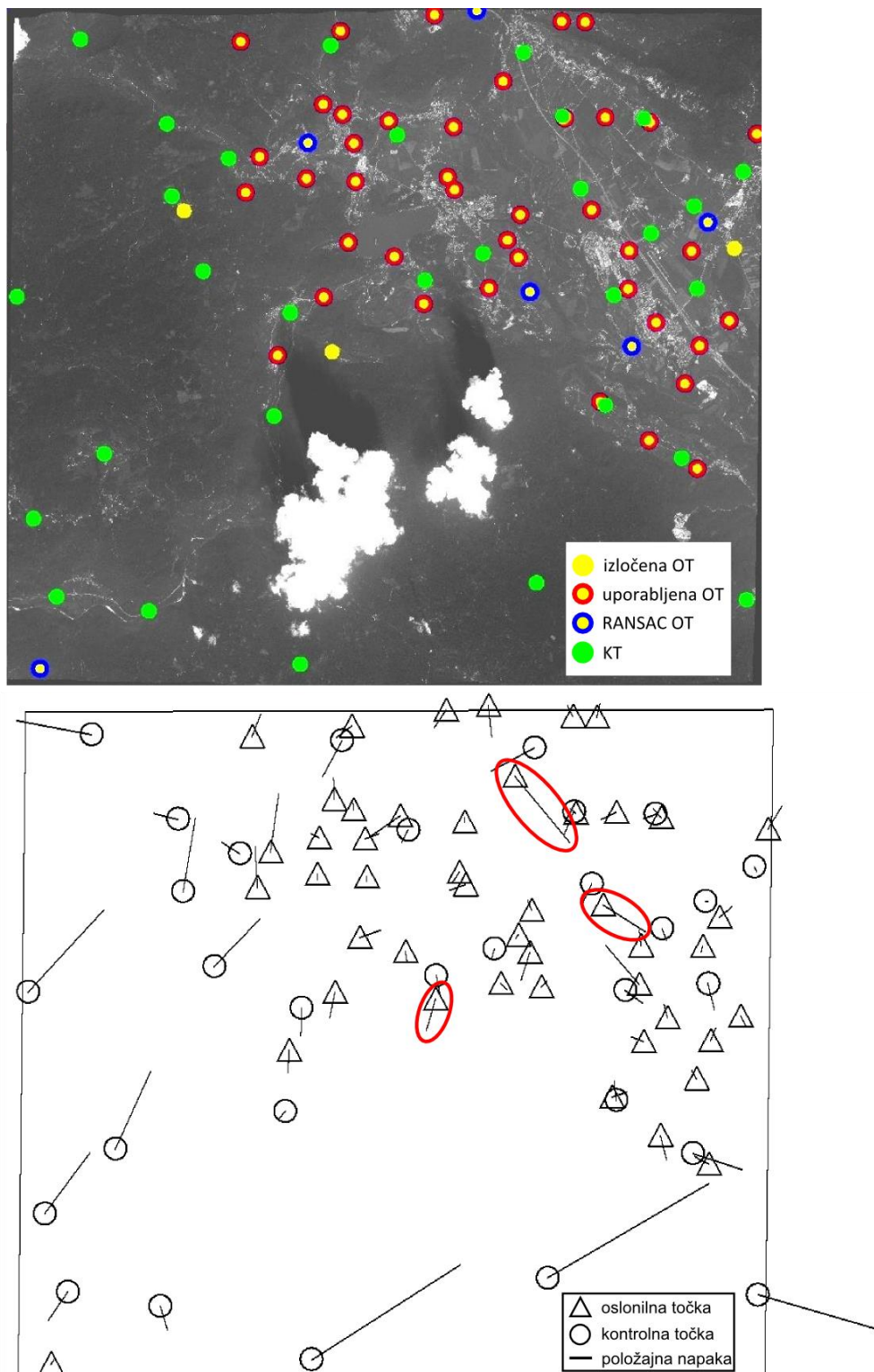
Posnetek	Groba napaka [piksel]	Večji niz		Manjši niz	
		dx [piksel]	dy [piksel]	dx [piksel]	dy [piksel]
Jesenice	1	-1,10	0,59	-0,66	-0,36
	2	-2,20	2,83	-1,91	1,13
Bled	1	-1,64	0,97	-0,99	-0,84
	2	-1,80	0,81	-1,59	2,35
	3	-3,57	1,44	-1,31	2,78
	4	-	-	-3,76	3,12
Ljubljana	-	-	-	-	-



Slika 27: Rezultati izravnave (RMSE KT) po izravnavi z algoritmom RANSAC (črtkana črta) in na koncu postopka (polna črta) za večji in manjši niz točk posnetkov WorldView-2. Iz slike je razvidno, da v splošnem robustna ocena izboljša natančnost rezultatov izravnave.

Figure 27: Adjustment results (RMS error at ICPs) after RANSAC adjustment (dashed line) and at the end (solid line) for the large and small point sets of WorldView-2 images. It can be noted that robust estimation generally improves the accuracy of the adjustment results.

Pri posnetku Bled smo imeli na voljo več točk in smo lahko večjemu nizu dodali napake desetim, manjšemu pa petim točkam. V obeh nizih je RANSAC v večini primerov izločil vse točke z napakami razen treh (slika 28). Pri manjšem nizu se je le enkrat zgodilo, da je bila izločena le ena točka z napakami, ostale so pa štiri. Tudi pri tem posnetku je robustna ocena dobro delovala in zmanjšala vpliv točk z dodanimi napakami. To je vidno tudi pri odstopanjih OT od končnega modela, ki odražajo velikost dodanih grobih napak. Manjši odkloni odstopanj od pričakovanih so posledica manjših napak določanja točk in vpliva ostalih točk z napakami. K napakam prispevata tudi razgiban teren in slabša razporeditev točk. Kljub temu je točnost rezultatov po izravnavi še vedno primerljiva s točnostjo rezultatov brez dodanih napak.

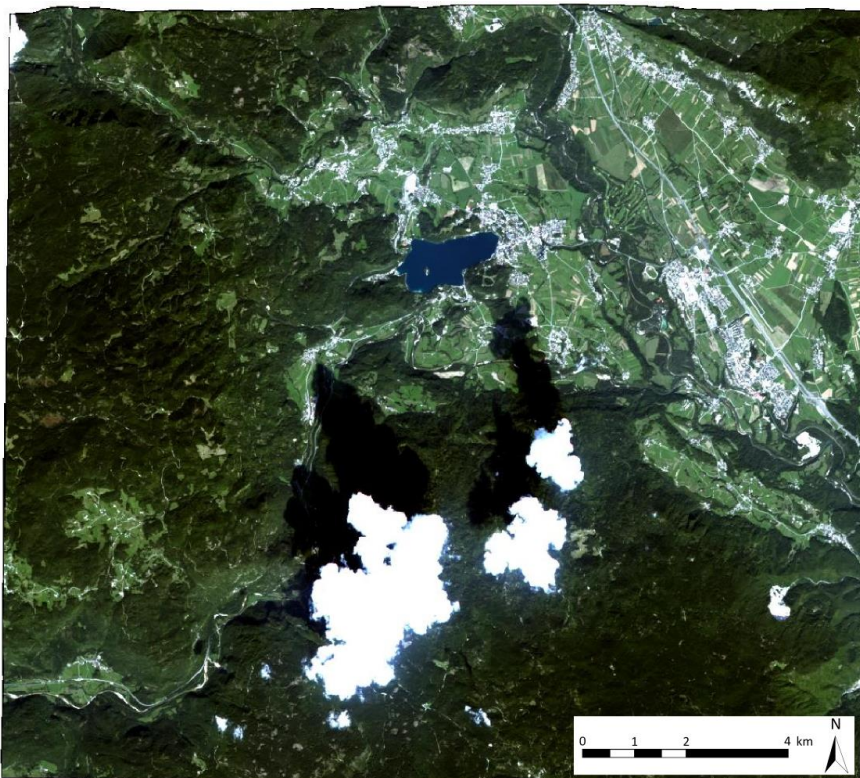


Slika 28: Porazdelitev in odstopanja oslonilnih in kontrolnih točk. Na zgornji sliki (posnetek Bled – WorldView-2) so oslonilne točke prikazane z rumeno barvo, kontrolne pa z zeleno. Na spodnji sliki so neodstranjene točke z dodanimi napakami označene z rdečimi elipsami.

Figure 28: GCP and ICP distribution and residuals. In the image above (Bled scene – WorldView-2) the ground control points are represented in yellow colour and independent check points in green. In the image below two unremoved GCPs with artificial errors are marked with red ellipses.

8.2.5 Ocena položajne točnosti ortoposnetkov

Ortoposnetke WorldView-2 smo izdelali s parametri zunanje orientacije, ki smo jih dobili pri najnatančnejši rešitvi modela, in z digitalnim modelom reliefa z ločljivostjo 12,5 m. Ortorektificiran posnetek Bled je prikazan na sliki 29 (glej tudi prilogo C). Natančnost ortoposnetkov smo preverili z ročno izmerjenimi kontrolnimi točkami. Na vsakem ortoposnetku smo izbrali približno 30 enakomerno porazdeljenih točk, ki so ležale na križiščih cest. Iz letalskega ortofota z ločljivostjo 0,5 m smo pridobili položajne koordinate istih lokacij. Položajno točnost (RMSE) ortorektificiranih posnetkov smo dobili s primerjavo obeh nizov koordinat.



Slika 29: Ortorektificiran posnetek Bled – WorldView-2.

Figure 29: Orthorectified Bled image – WorldView-2.

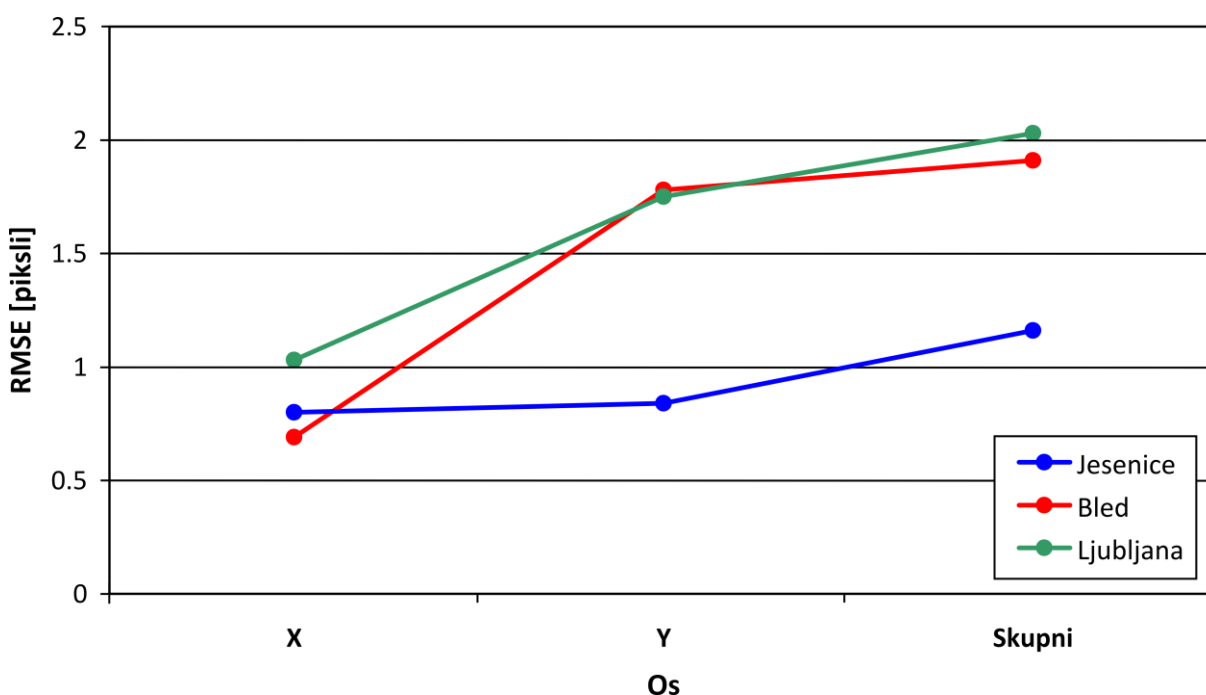
Preglednica 19 prikazuje položajno točnost (RMSE) ortoposnetkov. Dobljene napake RMSE (slika 30) so celo nižje od povprečnih vrednosti rezultatov, ki so bili dobljeni z geometričnim modelom na kontrolnih točkah (preglednica 15). Pri tem moramo upoštevati, da smo pri ortorektifikaciji uporabili najboljše rezultate izravnave in ne povprečja rezultatov. Pričakovano je najbolj točen posnetek Jesenice z RMSE 1,16 piksla. Ostala posnetka sta nekoliko slabše položajne točnosti in imata RMSE okoli 2 piksla. Točnost zelo visokoločljivih ortoposnetkov je odvisna tudi od ločljivosti in točnosti uporabljenega DMR-ja. Če bi imeli pri ortorektifikaciji na razpolago boljši DMR (npr. lidarski), bi

lahko dosegli še višjo točnost ortopodob. Točnost je sicer odraz le izmerjenih točk, ki smo jih postavili na dobro vidna križišča, ki pa se večinoma nahajajo na nižjem, ravninskem terenu. Zaradi delne lege zunaj Slovenije, kjer nismo imeli kontrolnih podatkov, je bila točnost posnetka Jesenice ocenjena samo za spodnji del posnetka.

Preglednica 19: Točnost izdelanih ortoposnetkov WorldView-2 glede na državni ortofoto, ki je bil uporabljen kot referenca.

Table 19: Accuracy of the generated WorldView-2 orthoimages compared to the national orthophoto used as reference.

Posnetek	Število kontrolnih točk	RMSE [piksel]		
		X	Y	Skupni
Jesenice	30	0,80	0,84	1,16
Bled	32	0,69	1,78	1,91
Ljubljana	32	1,03	1,75	2,03



Slika 30: RMSE na 30 ročno določenih kontrolnih točkah za posnetke WorldView-2.

Figure 30: RMS errors at 30 manually selected check points for WorldView-2 images.

V primeru zelo visokoločljivih posnetkov je položajna točnost ortoposnetkov tudi odraz točnosti referenčnih podatkov. Čeprav smo državni ortofoto uporabili za referenco pri določanju točk, lahko vsebuje naključne napake, ki so lahko velikosti 1 m ali več. Zaradi tega ima pri tako visoki ločljivosti, kjer je prisotno tudi veliko detajlov, geometrični model problem pri izračunu parametrov oz.

modeliranju točne geometrije snemanja. Dodatni problem je tudi način snemanja (npr. asinhrono), ki v modelu ni upoštevan. Pri ločljivosti 2 m je sicer vpliv referenčnih podatkov na točnost manjši kot pri pankromatskih posnetkih (0,5 m), kjer bi bila za oceno točnosti nujna primerjava s terensko izmerjenimi točkami (npr. izmera z GPS). Za primere naših poskusov lahko položajno točnost izdelanih ortoposnetkov generalno ocenimo okrog vrednosti dveh pikslov, kar je v skladu s pričakovanji oziroma našo hipotezo.

8.2.6 Povzetek in zaključki poglavja 8.2

V poglavju smo predstavili rezultate poskusov s posnetki WorldView-2. Ovrednotili smo natančnost samodejno določenih točk, preizkusili delovanje geometričnega modela z različnimi nizi točk, primerjali metode robustne ocene, preverjali robustnost pri izločanju grobih napak in točnost izdelanih ortoposnetkov. Rezultati kažejo na nekoliko slabšo samodejno določanje točk kot pri posnetkih RapidEye, kar vpliva na končne rezultate. Visoko točnost parametrov geometričnega modela dobimo le v primeru enakomerne razporeditve oslonilnih točk po celotnem posnetku. Nepojasnjeno je slabše delovanje modela na posnetku Ljubljana, čeprav je ocenjena končna točnost ortoposnetka okoli velikosti dveh pikslov. Če upoštevamo tudi točnost referenčnih podatkov, pa lahko ocenimo, da je položajna točnost še boljša, in sicer pod velikostjo dveh pikslov. V drugih dveh primerih je model pravilno izločal umetno dodane grobe napake in dosegal RMSE OT pod velikostjo enega piksla. V primeru uporabe več OT so bili rezultati izravnave pričakovano boljši. Izbira metode robustne ocene nima velikega vpliva na končne rezultate, je pa njena uporaba nujna v primeru, ko je v podatkih veliko grobih napak. Čeprav se vrednosti med seboj le malo razlikujejo, so metode s hiperbolično funkcijo dosegle malo boljše rezultate ter delujejo bolj robustno. V primeru uporabe DMR-ja z višjo ločljivostjo bi lahko dobili še boljše rezultate.

Ocenili smo tudi čas poteka celotnega postopka. Obdelava posameznega večspektralnega (8 kanalov) posnetka WorldView-2 velikosti 15 km × 17 km s povprečnim računalnikom, ki vsebuje procesor Xeon Quad-Core s frekvenco 2.5 GHz in 8 GB RAM-a, traja približno 70 minut (odvisno predvsem od števila samodejno določenih točk). Korak branja metapodatkov traja le trenutek, medtem ko določanje OT poteka približno 28 % celotnega časa v primeru določitve približno 200 točk. Za posnetke WorldView-2 se izračun parametrov geometričnega modela ponavadi konča v približno 7 % časa. Trajanje izračuna parametrov geometričnega modela je zaradi manj natančnih točk daljše kot v primeru posnetkov RapidEye. Ortorektifikacija je računsko najbolj zahteven del obdelave in zajema preostalih 65 % časa.

9 ZAKLJUČKI

V okviru doktorske disertacije smo razvili nov samodejen postopek za ortorektifikacijo optičnih satelitskih posnetkov ravni 1A. Postopek izdelava ortoposnetke v ortogonalni projekciji v približno eni uri in na povsem samodejen način, brez posredovanja operaterja. Ortorektificiran posnetek je v državnem koordinatnem sistemu in lahko služi za primerno podlago v prostorskih analizah in kot vir za kartiranje (npr. interpretacijo in vektorizacijo podatkov). Zaradi (običajno) večje spektralne in časovne ločljivosti lahko v določenih aplikacijah dopolnjuje ali celo nadomesti letalski ortofoto.

Večina dosedanjih postopkov ortorektifikacije je ročnih ali polsamodejnih, oziroma delujejo le za določen satelit ali le v določenih pogojih (glej poglavje 1.1.3). Naš izdelan postopek ortorektifikacije pa povezuje več različnih metod v enoten in robusten sistem za samodejno izdelavo ortoposnetkov tako iz posnetkov pridobljenih z vrstičnimi kot polnoslikovnimi senzorji. Celoten postopek je sestavljen iz štirih osnovnih modulov: modula za branje in pripravo metapodatkov, modula za samodejno določanje oslonilnih točk, modula za izračun parametrov geometričnega modela in modula za izvedbo ortorektifikacije. Modul za branje in pripravo metapodatkov prebere metapodatkovno datoteko in izbere tiste parametre, ki se kasneje uporabijo v postopku za določanje točk in ortorektifikacijo posnetka. Tako pridobi podatke o geometriji senzorja, lastnostih posnetka in začetne približke parametrov zunanje in notranje orientacije. Drugi korak modula služi za preračun prebranih podatkov v koordinatni sistem, ki se uporablja v geometričnem modelu in v katerem bo tudi končni ortoposnetek. Pridobljeni podatki vstopajo v model kot približne vrednosti iskanih parametrov (neznanke). Tudi modul za samodejno določanje oslonilnih točk je razdeljen na dva zaporedna koraka. Prvi korak za določitev točk uporablja digitalne podatke o cestah, ki so sestavljeni iz treh virov, in zaznane ceste iz surovega posnetka. Drugi korak položaj točk še izboljša s slikovno korelacijo med izseki surove podobe in izseki iz državnega ortofota. Pri visokoločljivih posnetkih že prvi korak poda zanesljive točke, medtem ko je za zelo visokoločljive posnetke potreben še drugi korak. Modul za izračun parametrov geometričnega modela je najbolj kompleksen del postopka. V njem izračunamo parametre notranje in zunanje orientacije, katerih natančnost določitve vpliva na končno položajno točnost ortoposnetka. Zaradi reševanja problema prisotnosti grobih napak, ki se jim v samodejnem postopku ne moremo izogniti, je postopek računanja parametrov geometričnega modela razdeljen na dva dela: prvi deluje z algoritmom RANSAC, drugi pa z robustno oceno. Zadnji modul izdeluje ortoposnetke z uporabo digitalnega modela reliefa z ločljivostjo 12,5 m. Pri tem uporabi indirektni model ortorektifikacije, ki je bil izbran zaradi zanesljivosti in hitrosti delovanja. Realizirani postopek ortorektifikacije je torej popolnoma samodejen, vključuje obdelavo tako vzdolžnih kot polnoslikovnih senzorjev in pri tem uporablja le dostopne državne podatke in prostodostopne podatke o cestah. Glede na našeta dejstva lahko prvo hipotezo v celoti potrdimo.

Glavni in osrednji del doktorske disertacije je postopek računanja parametrov geometričnega modela. Jedro modela je bilo izbrano iz že obstoječih modelov, ki so bili razviti za določene senzorje in so večinoma delovali v ročnih postopkih. V disertaciji smo jedro dodelali, dopolnili ter mu dodali funkcionalnosti za obdelavo podatkov v samodejnem postopku. Izdelali smo dve izvedbi modela: model vrstičnega senzorja in model polnoslikovnega senzorja. Izvedbi sta indirektni in splošni, kar pomeni, da delujeta le z oslonilnimi točkami in sta prilagojeni za modeliranje geometrije več snemalnih sistemov, s čimer lahko potrdimo tudi drugo hipotezo. Za dodajanje novih sistemov je potrebno prilagoditi le modul za branje in pripravo metapodatkov.

Zelo pomemben del postopka je tudi modul za samodejno določanje oslonilnih točk. Modul je bil sicer izdelan za uporabo v samodejnem postopku ortorektifikacije, ni pa bil v celoti razvit v okviru te naloge. Poleg uporabljene metode korelacije za določitev točk so pomembni tudi referenčni podatki, ki so bili v našem primeru sestavljeni iz podatkov o cestah (sestavljene iz treh virov) in letalskega ortofota. Raziskave so pokazale, da so državni digitalni podatki o cestah z visoko položajno točnostjo (večina pod 1 m, ostalo med 1-5 m) in digitalni podatki o cestah OpenStreetMap dovolj dobri za določevanje točk na visokoločljivih posnetkih (večinoma podpikselska točnost), ne zadoščajo pa za potrebe zelo visokoločljivih posnetkov. V teh primerih je nujna uporaba dodatnih virov, zato smo v našem primeru uporabili državni ortofoto z ločljivostjo 0,5 m, ki je sicer položajno dovolj točen za posnetke z ločljivostjo 2 m, problem pa je predvsem v različni radiometriji in časovni usklajenosti z vhodnim satelitskim posnetkom. Slikovna korelacija z ortofotom izboljša položajno točnost točk, zaradi omenjenih neskladij pa je odstopanje v nekaterih primerih še vedno večje od velikosti enega piksla. Zato lahko tretjo hipotezo le delno potrdimo, saj določanje točk na zelo visokoločljivih posnetkih, kljub dodatni uporabi ortofota, ne doseže zelene točnosti.

S poskusi na posnetkih RapidEye in WorldView-2 smo ovrednotili delovanje samodejnega postopka in ocenili položajno točnost ortoposnetkov. Z vsemi posnetki RapidEye smo dosegli zelo dobre rezultate. Rezultati testov so dokazali, da lahko postopek izdelava ortoposnetke s položajno točnostjo (RMSE) pod velikostjo enega piksla, tudi če je med podatki prisotnih več grobih napak. Točnost glede na kontrolne točke je bila manj kot piksel tudi v primeru uporabe manj kot 20 oslonilnih točk. Enake rezultate smo dobili tako za ortoposnetke kot za kontrolne točke v geometričnem modelu. Poskusi na posnetkih WorldView-2 kažejo na nekoliko slabšo samodejno določanje točk, kar je vplivalo tudi na končne rezultate. Pri zelo visokoločljivih posnetkih je geometrični model deloval dobro le v predelih z enakomerno razporeditvijo točk. Na območjih, kjer oslonilnih točk ni bilo, so bila odstopanja večja. Nepojasnjeno je slabše delovanje modela na enem posnetku, čeprav je končna točnost ortoposnetka malo nad velikostjo dveh pikslov. V drugih dveh primerih je model pravilno izločal umetno dodane grobe napake in dosegal RMSE ortoposnetkov pod velikostjo dveh pikslov. Ob upoštevanju položajne točnosti referenčnega vira, s katerim smo ocenjevali ortoposnetke, ki znaša 1 m (polovico velikosti piksla posnetkov), lahko tudi četrto hipotezo potrdimo. Rezultati izravnav so sicer nihali, boljši so

bili v primeru uporabe več točk. V kolikor bi imeli na razpolago DMR z višjo ločljivostjo, bi lahko dobili še boljše rezultate. Za robustno oceno so se za najboljše izkazale metode s hiperbolično utežno funkcijo. Čeprav se vrednosti med preizkušenimi metodami le malo razlikujejo, so metode s hiperbolično funkcijo dosegle boljše rezultate, predvsem pa delujejo bolj robustno. Izbira metode robustne ocene sicer nima velikega vpliva na končne rezultate, je pa njena uporaba nujna v primeru, ko je v podatkih veliko grobih napak.

Celoten razvit postopek ortorektifikacije je bil zapisan v programskem jeziku IDL. Izjema je prvi korak modula za določanje točk, ki je v jeziku C++. Uporaba razvitih algoritmov (programa) je mogoča na vsakem računalniku z zadostno količino bralno-pisalnega pomnilnika in povezavo do strežnika s pomožnimi podatki. Trenutno algoritmi delujejo le s slovenskim koordinatnim sistemom in podpirajo štiri vrstične senzorje (RapidEye, WorldView-2, Pleiades in SPOT 6) pri čemer dva (Pleiades in SPOT 6) zaradi pomanjkanja satelitskih posnetkov še nista bila temeljito preizkušena in tudi nista predstavljena v tej nalogi. Slabše delovanje postopka v primeru satelita WorldView-2 bi lahko bolje razumeli in izboljšali z dodatnimi posnetki. Za preizkus polnoslikovnega modela nismo uspeli pridobiti posnetkov kot tudi ne lidarskega modela reliefa za preverjanje vpliva DMR-jev različnih ločljivosti na ortorektifikacijo.

Izdelan postopek za ortorektifikacijo deluje popolnoma samodejno od sprejetega surovega posnetka do končnega ortoposnetka, ki je umeščen v koordinatni sistem. Operater, razen po potrebi, vidi le končni izdelek s pripadajočimi podatki o obdelavi. Na proces ni mogoče interaktivno vplivati, kar lahko v določenih primerih da tudi slabše rezultate. Natančnost delovanja geometričnega modela se samodejno preverja samo na koncu izravnave na osnovi RMSE oslonilnih točk. Ta podaja le notranjo natančnost, ki ni pravi pokazatelj uspešnosti delovanja postopka. Absolutno kontrolo modela in ortoposnetkov lahko priskrbi le neodvisen postopek (neodvisno določene kontrolne točke), ki pa ga v samodejnih postopkih ni mogoče zagotoviti.

Samodejni postopek ortorektifikacije je del procesne verige STORM, ki je namenjena samodejni izdelavi izdelkov različnih ravni in kompleksnosti iz podatkov daljinskega zaznavanja. Veriga bo poleg posnetkov komercialnih satelitov podpirala tudi posnetke slovenskega satelita, katerega posnetki in izdelki bodo na voljo v skoraj realnem času. Pomembno vlogo pri obdelavi bo imel tudi algoritem za ortorektifikacijo, ki je že v trenutni različici dovolj zanesljiv in robusten. Kljub temu se lahko v prihodnje izdelan algoritem še dodatno izboljša in se mu doda druge funkcionalnosti. Možne izboljšave in nadgradnje so:

- razširitev postopka za samodejno podporo drugim vrstičnim in polnoslikovnim snemalnim sistemom,
- podpora tudi za posnetke z ločljivostjo 0,5 m oz. posnetke snemane v pankromatskem načinu,

- podpora univerzalno uporabljenim projekcijam (npr. UTM) oz. drugim specifičnim (državnim) projekcijam in koordinatnim sistemom (npr. ECEF),
- izboljšava algoritma za določanje točk na zelo visokoločljivih posnetkih, predvsem glede njihove razporeditve,
- dodatna pospešitev celotnega postopka s pametnim programiranjem in uporabo porazdeljene obdelave (angl. distributed computing),
- robustna in hitra implementacija direktne metode za ortorektifikacijo z lidarskim modelom reliefa ali modelom površja,
- izdelava geometričnega modela za obdelavo posnetkov geometrično že obdelanih stopenj (npr. ravni 1B),
- razvoj in izdelava empiričnega geometričnega modela RPC.

Poleg omenjenih izboljšav in nadgradenj je še veliko več možnosti razširitve postopka, ki jih ponujajo satelitski stereoposnetki (blokovna obdelava) in pa letalski posnetki oziroma posnetki brezpilotnih letalnikov (angl. unmanned aerial vehicles).

Izdelana samodejna ortorektifikacija omogoča hitro pripravo satelitskih ortoposnetkov, kar je pomembno tudi iz družbeno-ekonomskega vidika. V številnih aplikacijah, na primer pri opazovanju naravnih nesreč, nadzoruovanju aktivnosti na morju, spremljanju vegetacije in podobno, je hitro kartiranje nujnega pomena. Pravočasna dostava ortorektificiranih satelitskih posnetkov lahko v primeru naravnih nesreč s hitrim posredovanjem prepreči večjo gmotno škodo ter celo rešuje človeška življenja. Hitro kartiranje je zelo pomembno tudi pri spremljanju kmetijskih zemljišč in različnih (legalnih in nelegalnih) posegov v okolje, kjer je hitra odzivnost nujna za preprečitev nastanka nepopravljive škode. Za pospešitev celotnega procesa je torej nujno potrebna visoka stopnja avtomatizacije geometrične obdelave posnetkov, ki jo lahko zagotovimo z izdelanim postopkom ortorektifikacije.

10 POVZETEK

Z večanjem števila satelitov za opazovanje Zemlje se povečuje tudi količina satelitskih posnetkov, njihova uporaba pa je prisotna na vedno več področjih. Posnetki se dandanes uporabljajo pri številnih aplikacijah, na primer pri opazovanju naravnih nesreč, nadzorovanju aktivnosti na morju, spremljanju vegetacije in podobno. V večini primerov uporabniki zahtevajo že predobdelane podatke oz. posnetke brez geometričnih popačenj v izbranem koordinatnem sistemu. Poleg tega v nekaterih aplikacijah potrebujemo geometrično popravljene posnetke v skoraj realnem času. Dosedanje metode obdelave satelitskih posnetkov so temeljile na postopkih, ki so sicer precej samostojni, a nepovezani v celotni verigi od satelitskega snemanja do končnega rektificiranega posnetka. Želja tako raziskovalcev kot končnih uporabnikov satelitskih posnetkov je bila avtomatizirati in s tem pospešiti celoten proces izdelave kart. Med členi v verigi avtomatizacije je predvsem pomemben prav postopek ortorektifikacije posnetkov.

Namen doktorske disertacije je bil izdelati nov in popolnoma samodejen postopek za ortorektifikacijo optičnih satelitskih posnetkov. Postopek mora poleg hitrosti in samodejnosti zagotavljati tudi visoko točnost ortoposnetkov, ki jih lahko uporabljamo v različnih aplikacijah. Za visoko kakovost izdelkov postopka smo potrebovali tudi točne vire s katerimi smo ortoposnetek umestili v državni koordinatni sistem. Točni referenčni viri so namreč nujen pogoj za uspešnost celotnega postopka.

Izdelan postopek ortorektifikacije povezuje več različnih metod v enoten in robusten sistem, ki je v celoti samodejen in ne zahteva posredovanja operaterja. Postopek se sproži, ko procesni strežnik prejme vhodni (surovi) posnetek, in se konča z zapisom ortoposnetka v bazo podatkov. Doktorska disertacija natančno opiše celoten postopek samodejne ortorektifikacije, ki je sestavljena iz štirih osnovnih modulov: modula za branje in pripravo metapodatkov, modula za samodejno določanje oslonilnih točk, modula za izračun parametrov geometričnega modela in modula za izvedbo ortorektifikacije. Osrednji del disertacije je modul za izračun parametrov geometričnega modela, ki je tudi najbolj zapleten del postopka. Modul deluje iterativno na več ravneh in z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov ter dvema zaporednima metodama (RANSAC in robustna ocena), ki odstranita oziroma zmanjšata vpliv grobih napak pri izračunu parametrov notranje in zunanje orientacije posnetka.

Izdelani algoritmi so bili preizkušeni s šestimi optičnimi satelitskimi posnetki satelitov RapidEye in WorldView-2. Posnetki so bili posneti na različnih območjih Slovenije in obsegajo tako ravninska območja, kot gričevja, hribovja in gorovja. Poleg tega je na posnetkih prisotna tudi različna pokrovnost in deli sosednjih držav.

S poskusi s posnetki RapidEye in WorldView-2 smo ovrednotili delovanje samodejnega postopka in ocenili položajno točnost ortoposnetkov. Z vsemi posnetki RapidEye smo dosegli zelo dobre rezultate. Rezultati testov so dokazali, da lahko postopek izdelava ortoposnetke s položajno točnostjo (RMSE)

boljšo od velikosti piksla, tudi če je med podatki prisotnih več grobih napak. Točnost glede na kontrolne točke je bila boljša kot velikost piksla tudi v primeru uporabe manj kot 20 oslonilnih točk. Približno enake rezultate smo dobili tako za ortoposnetke kot za kontrolne točke v geometričnem modelu. V poskusih smo določali tudi delovanje metod robustne ocene. Za najboljše so se izkazale metode, ki delujejo s hiperbolično utežno funkcijo. Čeprav robustna ocena velikokrat ne popravi rezultatov, je njena implementacija smiselna v kolikor je v podatkih več grobih napak. Poskusi na posnetkih WorldView-2 kažejo na nekoliko slabšo samodejno določanje točk, kar je vplivalo tudi na končno točnost ortoposnetkov. Pri zelo visokoločljivih posnetkih je geometrični model deloval dobro le na območjih z enakomerno razporeditvijo oslonilnih točk. Na območjih, kjer oslonilnih točk ni bilo, so bila odstopanja večja. Nepojasnjeno je slabše delovanje modela na enem posnetku, čeprav je končna točnost ortoposnetka le malo nad velikostjo dveh pikslov. V drugih dveh primerih je model pravilno izločal umetno dodane grobe napake in dosegal RMSE ortoposnetkov pod velikostjo dveh pikslov. Rezultati izravnave so nihali, boljši so bili v primeru uporabe več oslonilnih točk. Za robustno oceno so se tudi v teh primerih za najboljše izkazale metode s hiperbolično utežno funkcijo, čeprav so bile razlike v rezultatih zelo majhne.

11 SUMMARY

The amount of acquired satellite imagery from a growing number of Earth observation satellites is rising rapidly and their use as a viable source of information is penetrating into new scientific fields. Nowadays the images are used routinely in many applications, for example, in monitoring of natural disasters and sea activities, observation of vegetation, etc. In most cases, users require data that have already been pre-processed, i.e. images that can be readily used in their favourite analytical tool. Therefore they have to be without geometric distortions and in the designated coordinate system. In addition, some applications need geometrically corrected images in near-real time. Previous satellite image processing methods were based on procedures that were quite independent and unrelated in the entire processing chain from satellite image acquisition to the final rectified image. The desire of both researchers and end-users of satellite images was to automate and thus speed up the whole map production process. In particular, among all the elements of the automatic chain, the process of image orthorectification is very important.

The aim of the doctoral dissertation was to develop a new and fully automated process for orthorectification of optical satellite imagery. In addition to the speed and automation, the process had to provide very accurate orthoimages that could be used in various applications. To obtain a high quality orthoimage in the national coordinate system we need accurate reference data. Accurate reference sources are essential for the successful performance of the whole process.

The developed orthorectification process connects several different methods into a unified, robust system that is fully automated and does not require any operator's intervention. The process is triggered when the process server detects a new input (raw) image and ends with the storage of the orthoimage in a database. The doctoral dissertation describes the entire process of automatic orthorectification in detail. The process is composed of four basic modules: a module for extracting and preparing the metadata, a module for automatic extraction of ground control points, a module for calculation of parameters of the geometric model, and a module for orthorectification. The central part of the dissertation is the module for the calculation of parameters of the geometric model, which is the most complicated part of the process. The module operates iteratively on several levels. It uses the least squares adjustment method and two consecutive methods (RANSAC, robust estimation) for removal and/or reduction of the impact of gross errors in the calculation of the interior and exterior orientation parameters of the image.

The developed algorithms were tested with six optical satellite images collected by RapidEye and WorldView-2 satellites. The images were acquired over different regions of Slovenia and include flat, hilly and mountainous areas. In addition, different land cover is present, and images include cross-border areas.

The tests with RapidEye and WorldView-2 images evaluate the performance of the automatic procedure and assess the positional accuracy of the orthoimages. We achieved very good results with all RapidEye images. The tests indicate that the procedure produces orthoimages with a positional accuracy (RMSE) that is better than the size of a pixel even if several gross errors are present in the extracted ground control points. The accuracy at the independent check points was better than the pixel size also when less than 20 ground control points were used. Almost the same accuracy was achieved for orthoimages and for the independent check points in the geometric model. In the tests we also assessed the performance of the robust estimation methods. The most effective proved to be the methods that work with the hyperbolic weight function. Although robust estimation rarely improves the results, it is still required when several gross errors are present in the extracted ground control points. Tests on WorldView-2 images indicate a slightly lower accuracy of automatically extracted points which also affected the accuracy of the final orthoimages. With very high-resolution imagery the geometric model performed well only in areas with an even distribution of ground control points. In areas where no ground control points were present, the residuals were much higher. The poor performance of the model on one image is still unexplained although the final orthoimage accuracy is just above the size of two pixels. In the other two cases the model correctly eliminated the artificially added gross errors and achieved a RMSE of less than two pixels. The adjustment results varied between processing cases but better accuracies were obtained with a higher number of ground control points. The robust estimation methods with the hyperbolic weight function were superior also in these cases, although the differences were very small.

VIRI

Allen, C.W. 1973. *Astrophysical Quantities*. London, The Athlone Press: 310 str.

Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L. 2008. SURF: Speeded up robust features. *Computer Vision and Image Understanding* 110, 3: 346–359.

Bigas, M., Cabruja, E., Forest, J., Salvi, J. 2006. Review of CMOS image sensors. *Microelectronics Journal* 37, 5: 433–451.

ASTRIUM. 2012. *Pleiades Imagery User Guide*.

<http://www.geo-airbusds.com/en/4572-pleiades-technical-documents.html> (Pridobljeno 12. 3. 2013.)

BlackBridge. 2015. *Satellite Imagery Product Specifications*.

http://blackbridge.com/rapideye/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf (Pridobljeno 11. 3. 2015.)

Borčić, B. 1976. *Gauss-Krügerova projekcija meridijanskih zona*. Zagreb, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu: 306 str.

Brown, L. G. 1992. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys* 24, 4: 326–376.

CEOS. 2015. *The Committee on Earth Observation Satellite's Earth Observation Handbook*.
<http://www.eohandbook.com> (Pridobljeno 1. 4. 2015.)

Chen, L. C., Lee, L. H. 1993. Rigorous generation of digital orthophotos from SPOT images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 59, 5: 655–661.

Devaraj, C., Shah, C. A. 2014. Automated geometric correction of multispectral images from High Resolution CCD Camera (HRCC) on-board CBERS-2 and CBERS-2B. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 89: 13–24.

DigitalGlobe. 2015a. *Geolocation accuracy of WorldView products*.

https://www.digitalglobe.com/sites/default/files/WorldView_Geolocation_Accuracy.pdf (Pridobljeno 12. 2. 2015.)

DigitalGlobe. 2015b. *Spletna stran podjetja DigitalGlobe*.

<https://www.digitalglobe.com/> (Pridobljeno 11. 3. 2015.)

Ebner, H., Kornus, W., Ohlhof, T. 1992. A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model. V: Proceedings of the 17th ISPRS Congress, Commission IV, Washington, ZDA, 2–14 Avgust 1992. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29, Part B4: 458–464.

e-GEOS. 2015. Price list.

<http://www.e-geos.it/products/pdf/prices.pdf> (Pridobljeno 12. 6. 2015.)

El-Manadili, Y., Novak, K. 1996. Precision rectification of SPOT imagery using the direct linear transformation model. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62, 1: 67–72.

eoPortal. 2015a. Sharing Earth Observation Resources, the eoPortal European Space Agency, Satellite Missions Database.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/rapideye> (Pridobljeno 21. 2. 2015.)

eoPortal. 2015b. Sharing Earth Observation Resources, the eoPortal European Space Agency, Satellite Missions Database.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2> (Pridobljeno 21. 2. 2015.)

Eugenio, F., Marques, F. 2003. Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 12: 2869–2880.

Exelis VIS. 2014. IDL Reference.

<http://www.exelisvis.com/docs/LINFIT.html> (Pridobljeno 12. 9. 2014.)

Fischler, M. A., Bolles, R. C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM 24, 6: 381–395.

Fonseca, L. M. G., Manjunath, B. S. 1996. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62, 9: 1049–1056.

Gianinetto, M., Scaioni, M. 2008. Automated geometric correction of high-resolution pushbroom satellite data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 74, 1: 107–116.

Grocott, S. C. O., Orr, N. G., Pranajaya, F. M., Zee, R. E., Rodič, T., Matko, D., Oštir, K., Peljhan, M., Urbas, A., Frölich, H., Blažič, S., Marsetič, A. 2013. The NEMO-HD spacecraft with breadboard instrument test results. V: Sandau, R. (ur.), Röser, H. P. (ur.), Valenzuela, A. (ur.). Small satellites for Earth observation: digest of the 9th International Symposium of the International Academy of Astronautics, Berlin, Nemčija, 8–12 April 2013. Berlin: Wissenschaft und Technik: str. 97–100.

Grodecki, J., Dial, G. 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69, 1: 59–68.

Gugan, D. J., Dowman, I. J. 1988. Topographic mapping from SPOT imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54, 10: 1409–1414.

GURS. 2015a. Centralna evidenca prostorskih podatkov.

<http://prostor3.gov.si/cepp/> (Pridobljeno 15. 2. 2014.)

GURS. 2015b. Topografski podatki merila 1 : 5.000 (DTK 5).

http://www.e-prostor.gov.si/si/zbirke_prostorskih_podatkov/topografski_in_kartografski_podatki/topografski_podatki_in_karte/topografski_podatki_merila_1_5000_dtk_5/ (Pridobljeno 31. 8. 2015.)

GURS. 2015c. Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture – izdaja podatkov.

http://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/struktura/GJI_izdaja_sifrant_in_struktura_2.pdf (Pridobljeno 15. 5. 2015.)

Gutman, G., Ignatov, A. 1997. Towards a Common Language in Satellite Data Management: A New Processing Level Nomenclature. V: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Singapur, 3–8 Avgust 1997. IGARSS'97*, 3: 1252–1254.

Huber, P. 1964. Robust estimation of a location parameters. *Annals of Mathematical Statistics* 35, 1: 73–101.

Inglada, J., Giros, A. 2004. On the possibility of automatic multisensor image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42, 10: 2104–2120.

Jovanovic, V. M., Lewicki, S. A., Smyth, M. M., Zong, J., Korechoff, R. P. 1999. MISR: Level 1 georectification and registration algorithm theoretical basis. Poročilo, šifra JPL D-11532, Rev. D. Pasadena, ZDA, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of technology: 138 f.

Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., Glassey, P. J. 2009. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography* 33, 2: 183–207.

Kim, T., Shin, D., Lee, Y. R. 2001. Development of a robust algorithm for transformation of a 3D object point onto a 2D image point for linear pushbroom imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 67, 4: 449–452.

Klein, H., Förstner, W. 1984. Realization of automatic error detection in the block adjustment program PAT-M43 using robust estimators. V: *Proceedings of the 15th ISPRS Congress, Commission III, Rio de Janeiro, Brazilija, 17–29 Junij 1984. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25, Part A3: 234–245.

- Konecny, G. 1979. Methods and possibilities for digital differential rectification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 45, 6: 727–734.
- Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H., Kruck, E. 1987. Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instrument. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 53, 9: 1223–1230.
- Kratky, V. 1989. Rigorous photogrammetric processing of SPOT images at CCM Canada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 44, 2: 53–71.
- Kraus, K. 2000. *Photogrammetry, Volume 1: Fundamentals and standard processes*. Bonn, Dümmler verlag: 397 str.
- Kraus, K. 2007. *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*. Berlin-New York, Walter de Gruyter: 459 str.
- Kruck, E. 2001. Combined IMU sensor calibration and bundle adjustment with BINGO-F. Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, Nemčija, September 2001.
http://bingo-atm.de/wp-content/uploads/2014/11/2001_Combined-IMU-Sensor-Calibration-OEEPE.pdf (Pridobljeno 15. 5. 2015.)
- Kubik, K., Merchant, D., Schenk, T. 1987. Robust estimation in photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53, 2: 167–169.
- Kuipers, J. B. 1999. *Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality*. Princeton, Princeton University Press: 400 str.
- Le Moigne, J., Campbell, W. J., Crompton, R. F. 2002. An automated parallel image registration technique based on the correlation of wavelet features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40, 8: 1849–1864.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F., Avouac, J. P. 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 6: 1529–1558.
- Liu, C., Chen, P. 2009. Automatic extraction of ground control regions and orthorectification of remote sensing imagery. *Optics Express* 17, 10: 7970–7984.
- Lowe, D. G. 1999. Object recognition from local scale-invariant features. V: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Grčija, 20–27 September 1999. *IEEE, ICCV*, 2: 1150–1157.
- Marsetič, A., Oštir, K. 2006. Uporaba satelitskih posnetkov SPOT za izdelavo ortopodob. *Geodetski vestnik* 51, 1: 69–84.

Michalis, P., Dowman, I. 2008. A generic model for along-track stereo sensors using rigorous orbit mechanics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74, 3: 303–309.

Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C. 2001. *Introduction to modern photogrammetry*. Chichester, Wiley & Sons: 496 str.

Montenbruck, O., Gill, E. 2005. *Satellite orbits – models, methods, and applications*. Berlin-Heidelberg, Springer Verlag: 369 str.

Netanyahu, N. S., Le Moigne, J., Masek, J. G. 2004. Georegistration of Landsat data via robust matching of multiresolution features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42, 7: 1586–1600.

Noerdlinger, P. D. 1999. Atmospheric refraction effects in Earth remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 5–6: 360–373.

NSSDC. 2015. The NASA Master Directory Held at the NASA Space Science Data Center. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp> (Pridobljeno 1. 4. 2015.)

Okamoto, A., Fraser, C. S., Hattori, S., Hasegawa, H., Ono, T. 1998. An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery. V: *Proceedings of the ISPRS Commission IV Symposium, Stuttgart, Nemčija, 7–10 September 1998. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32, Part 4: 457–462.

O'Neill, M. A., Dowman, I. J. 1988. The generation of epipolar synthetic stereo mates for SPOT images using a DEM. V: *Proceedings of the 16th ISPRS Congress, Commission III, Kyoto, Japonska, 1-10 Julij 1988. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27, Part B3: 587–598.

OpenStreetMap. 2015. Spletna stran organizacije OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/> (Pridobljeno 23. 3. 2015.)

Oštir, K. 2006. *Daljinsko zaznavanje*. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.

Oštir, K., Marsetič, A., Pehani, P., Perše, M., Zakšek, K., Zaletelj, J., Rodič, T. 2014. Procesna veriga za samodejno obdelavo optičnih satelitskih posnetkov v skoraj realnem času. V: Ciglič, R. (ur.), Perko, D. (ur.), Zorn, M. (ur.). *GIS v Sloveniji 12: Digitalni prostor*, Ljubljana, 30 September 2014. Ljubljana, Založba ZRC: str. 207–218.

Poli, D. 2005. *Modelling of spaceborne linear array sensors*. Doktorska disertacija. Zurich, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Institute of Geodesy and Photogrammetry: 216 f.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. 2007. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press: 1235 str.

Sandau, R. 2004. High resolution mapping with small satellites. V: Proceedings of the 20th ISPRS Congress, Commission I, Istanbul, Turčija, 12–23 Julij 2004. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35, Part B1: 108–113.

Schenk, T. 1999. Digital Photogrammetry, Volume I. Laurelville, TerraScience: 428 str.

Sheng, Y. 2004. Comparative evaluation of iterative and non-iterative methods to ground coordinate determination from single aerial images. Computers & Geosciences 30, 3: 267–279.

Sheng, Y. W., Alsdorf, D. E. 2005. Automated georeferencing and orthorectification of Amazon basin-wide SAR mosaics using SRTM DEM data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43, 8: 1929–1940.

Slonecker, E. T., Johnson, B., McMahon, J. 2009. Automated imagery orthorectification pilot. Journal of Applied Remote Sensing 3, 10: 33552–33568.

Smith, G. S. 1995. Digital Orthophotography and GIS. V: Esri International User Conference Proceedings, Palm Springs, ZDA, 1995.

<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc95/to150/p124.html> (Pridobljeno 20. 4. 2015.)

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. 2003. Error tracking in Ikonos geometric processing using a 3D parametric model. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 69, 1: 43–51.

Toutin, T. 2004. Review paper: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. International Journal of Remote Sensing 25, 10: 1893–1924.

Veljanovski, T., Pehani, P., Lamovec, P., Oštir, K. 2012. Uporabnost podatkov satelitskega in letalskega daljinskega zaznavanja za opazovanje in kartiranje vodnih površin. Geodetski vestnik 56, 4: 786–801.

Weser, T., Rottensteiner, F., Willneff, J., Poon, J., Fraser, C. S. 2008. Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. The Photogrammetric Record 23, 123: 255–274.

Westin, T. 1990. Precision rectification of SPOT imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 56, 2: 247–253.

Xiong, Z., Zhang, Y. 2009. A Novel Interest-Point-Matching Algorithm for High-Resolution Satellite Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47, 12: 4189–4200.

Zaletelj, J., Burnik, U., Tasič, J. F. 2013. Registration of satellite images based on road network map. V: *Proceedings of the 8th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2013)*, Trst, Italija, 4–6 September 2013. IEEE, SPS: 49–53.

Zhang, C. S., Fraser, C. S. 2007. Automated registration of high-resolution satellite images. *The Photogrammetric Record* 22, 117: 75–87.

Zhou, F., Cui, Y., Wang, Y., Liu, L., Gao, H. 2013. Accurate and robust estimation of camera parameters using RANSAC. *Optics and Lasers in Engineering* 51, 3: 197–212.

Zhou, G. Q. 2009. Near Real-Time Orthorectification and Mosaic of Small UAV Video Flow for Time-Critical Event Response. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47, 3: 739–747.

Zitova, B., Flusser, J. 2003. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing* 21, 11: 977–1000.

PRILOGE

PRILOGA A: ZAKLJUČNI DEL IZPISA IZ MODULA ZA IZRAČUN PARAMETROV GEOMETRIČNEGA MODELA

Izpis prikazuje dosežena odstopanja na OT (označene z GCP) in KT (označene s CHK) ter doseženo točnost (RMSE) po izračunu parametrov zunanje orientacije za posnetek Koper. Na primeru smo uporabili niz z 56 OT in 26 KT.

-----KONCNI REZULTATI-----

Iteracije RMSE: 1

Final RMSE: 0.72064078

----- ts in Xmod, Ymod, Z in dX, dY-----

T 0	s1	0.18359375		
		96699.258	396824.17	324.00000
		5.0234153	-3.5511813	
T 1	s1	0.43563988		
		88022.691	395366.42	77.000000
		6.9413779	3.2656089	
T 2	s1	0.44549851		
		87618.866	395629.99	78.000000
		1.9755032	1.9292320	
T 3	s1	0.46502976		
		85320.889	403609.66	108.00000
		1.2406460	3.0350858	
T 4	s1	0.38039435		
		88916.621	400706.12	60.000000
		4.8791849	2.4957970	
T 5	s1	0.44363839		
		85740.817	405308.02	164.00000
		1.9735219	-0.98351076	
T 6	s1	0.68582589		
		77626.409	402787.55	315.00000
		-5.2389815	2.4237852	
T 7	s2	0.93787202		
		35111.659	392594.79	113.00000
		-11.270453	-0.26821021	
T 8	s1	0.05245536		
		97343.240	416837.59	1016.0000
		4.4822542	-0.56969063	
T 9	s1	0.54613095		
		80924.852	411126.27	86.000000
		0.60225238	-1.7911551	
T 10	s1	0.66834077		
		76786.815	410068.38	246.00000
		-4.8807519	-6.7489347	
T 11	s1	0.76860119		
		72932.423	411490.88	302.00000
		-4.8504791	-2.1810056	
T 12	s2	0.39601935		
		52572.433	401677.14	0.00000000
		0.67104158	3.7996844	
T 13	s2	0.71354167		
		41684.224	399618.26	212.00000
		-3.5966526	0.22951675	
T 14	s2	0.92987351		

		34532.626	396897.68	23.000000
		-12.429038	0.68150602	
T 15	s2	0.87593006		
		35027.042	403984.24	391.00000
		2.0616493	-2.2309874	
T 16	s1	0.13374256		
		93626.941	420946.10	657.00000
		1.4726975	2.6602572	
T 17	s1	0.29334077		
		87025.764	425524.88	861.00000
		2.7642685	2.1624283	
T 18	s1	0.34542411		
		86145.208	420677.54	927.00000
		-0.65893134	-0.67751613	
T 19	s1	0.66313244		
		75394.145	417928.27	147.00000
		-1.7069023	-1.6975550	
T 20	s2	0.31082589		
		52848.903	415384.28	453.00000
		-2.0383395	-7.8468768	
T 21	s2	0.55301339		
		44943.015	411840.78	129.00000
		-1.7705895	3.6527636	
T 22	s2	0.60453869		
		42831.461	413223.66	137.00000
		-3.0076661	1.3434704	
T 23	s2	0.58389137		
		43760.357	412259.50	63.000000
		-0.75284888	-2.8430142	
T 24	s1	0.03050595		
		93729.211	438728.95	758.00000
		-3.7266554	-2.2689913	
T 25	s1	0.46186756		
		80094.642	430169.57	884.00000
		-0.93617169	-1.9565485	
T 26	s1	0.94270833		
		64459.800	422816.52	536.00000
		0.92845708	-2.2282430	
T 27	s1	0.81994048		
		67108.696	431381.81	576.00000
		2.8752573	1.2828346	
T 28	s1	0.83463542		
		67712.604	425768.40	664.00000
		-3.1851909	5.4901190	
T 29	s1	0.92057292		
		64126.898	428394.09	624.00000
		-0.37128967	-0.32033523	
T 30	s2	0.11625744		
		57201.587	428192.96	368.00000
		0.39146443	-2.7617331	
T 31	s2	0.40215774		
		47373.846	426457.87	541.00000
		0.97144868	-0.0041323101	
T 32	s2	0.35900298		
		49851.885	421767.63	513.00000
		-0.41570288	1.5349940	
T 33	s2	0.97247024		
		28344.543	420158.19	92.000000
		1.5470788	-1.8455744	
T 34	s1	0.43582589		
		78502.647	442723.40	447.00000

```

        -1.6498588      -1.6330342
T 35 s1  0.27585565
        84899.137      439222.52      489.00000
        -4.3398494      -2.1702415
T 36 s1  0.55264137
        75000.451      439452.68      705.00000
        1.8025582      0.083028793
T 37 s1  0.63950893
        72376.738      437127.27      535.00000
        -1.3795515      -2.0431660
T 38 s1  0.69159226
        69623.718      441599.61      724.00000
        -1.3215122      2.5181769
T 39 s2  0.23437500
        51034.707      437966.28      392.00000
        4.1058176      -1.9741580
T 40 s2  0.10305060
        56480.587      434121.21      436.00000
        -1.9047575      1.6774525
T 41 s1  0.09319196
        89236.383      450003.30      289.00000
        0.96093557      0.67298741
T 42 s1  0.10267857
        87720.637      455860.64      586.00000
        -3.2611362      3.7602936
T 43 s1  0.34319196
        80469.129      449343.66      600.00000
        2.3399163      1.2881344
T 44 s1  0.62593006
        70677.597      447991.80      599.00000
        0.42499997      0.32862655
T 45 s2  0.16982887
        51758.410      445792.49      685.00000
        4.6526142      1.5170223
T 46 s2  0.38616071
        44063.620      445777.49      426.00000
        4.5693253      3.3358242
T 47 s2  0.45349702
        43339.199      437448.41      561.00000
        -1.7655754      3.2826223
T 48 s2  0.77920387
        31456.868      438894.65      578.00000
        5.1788256      -0.41105281
T 49 s1  0.05691964
        87154.036      466798.51      316.00000
        -8.0579691      2.6083814
T 50 s1  0.33054315
        79389.797      456956.63      690.00000
        -2.8671156      0.0073691292
T 51 s2  0.83277530
        28223.233      445509.05      334.00000
        2.1689081      1.1139744
GCP: 52
-----GCP_povp-----m, px-----
        2.9690267      0.45677335
        2.0997659      0.32304090
-----
    
```

```

RMSE GCP:
RMSE_X=      0.59787377      RMSE_Y=      0.40233082
RMSE=      0.72064078
    
```



```

-----CHK_test-----
----- ts in Xmod, Ymod, Z in dX, dY----
T 0 s2 0.59914435
      -70.234433      76.073383      76.000000
      44653.257      405110.53      76.000000
      -5.2027020      -0.010918292
T 1 s2 0.84226190
      -280.84519      -4.2814528      0.00000000
      38738.261      391483.09      0.00000000
      -11.024253      0.71538212
T 2 s2 0.44270833
      709.64335      458.02726      439.00000
      41409.990      448969.19      439.00000
      5.9713753      -1.5506916
T 3 s1 0.63002232
      842.05266      504.72526      561.00000
      68983.324      455703.50      561.00000
      6.2132143      4.5972609
T 4 s1 0.02641369
      51.618984      268.29557      312.00000
      89342.748      461307.07      312.00000
      -5.7117712      3.5331994
T 5 s1 0.07161458
      380.11220      274.89319      289.00000
      89615.719      451938.38      289.00000
      2.2588804      1.3410440
T 6 s1 0.07849702
      708.16336      757.27250      722.00000
      93202.033      432850.12      722.00000
      -0.42697393      -4.4184388
T 7 s1 0.03757440
      831.44198      591.34280      569.00000
      99998.804      406265.29      569.00000
      10.344090      -3.7506648
T 8 s1 0.02771577
      797.03983      706.12907      675.00000
      101604.52      400014.50      675.00000
      5.0566732      -5.5386690
T 9 s1 0.31677827
      150.25501      76.287972      95.00000
      92210.283      395579.43      95.00000
      2.3229957      3.3858836
T 10 s1 0.52287946
      64.712587      31.160218      48.00000
      84315.639      398364.97      48.00000
      0.67859518      2.9265768
T 11 s1 0.82031250
      69.090021      141.45457      174.00000
      73370.842      400147.98      174.00000
      -4.1176687      5.4365982
T 12 s1 0.91034226
      359.31280      370.35207      365.00000
      66713.185      417337.22      365.00000
      -0.19081827      -0.74222255
T 13 s1 0.65680804
      601.85394      574.64704      556.00000
      72930.826      431302.30      556.00000
      1.3663064      -2.2373034
T 14 s2 0.42596726
      582.32476      456.11742      435.00000

```

```

        42134.747      448327.29      435.00000
        3.2871938      -1.7472111
T 15 s2  0.76357887
        313.57431      394.84614      389.00000
        37435.972      411898.75      389.00000
        -2.4884935      -0.79457236
T 16 s2  0.73604911
        -114.01197      185.95046      181.00000
        42195.833      393083.52      181.00000
        -11.517150      -0.82188495
T 17 s2  0.80338542
        70.636523      284.23467      282.00000
        38528.175      399409.99      282.00000
        -7.7892774      -0.34667025
T 18 s2  0.58147321
        -182.68601      11.097475      52.000000
        45278.327      405130.32      52.000000
        -8.3589873      6.0938423
T 19 s2  0.76339286
        444.41527      416.95955      389.00000
        37443.761      411892.92      389.00000
        1.8284271      -3.8004254
T 20 s2  0.53720238
        401.05360      484.23958      462.00000
        44563.769      416521.34      462.00000
        -1.9583589      -2.9274247
T 21 s2  0.48493304
        468.70351      490.71656      531.00000
        43300.958      432069.14      531.00000
        -1.7025181      4.3391767
T 22 s2  0.28069196
        381.47912      428.44967      471.00000
        53817.002      415903.43      471.00000
        -2.9557051      5.7883353
T 23 s1  0.74813988
        510.32448      518.07351      529.00000
        68429.482      437530.55      529.00000
        -0.51488816      1.1898392
T 24 s1  0.94475446
        704.83202      559.10386      558.00000
        61490.609      437236.95      558.00000
        3.9847186      -0.11782843
T 25 s2  0.11644345
        638.68551      580.11584      588.00000
        54172.007      443238.06      588.00000
        1.2552480      0.74860602
    
```

GCP: 52

CHK: 26

```

-----CHK_povp-----m, px-----
        4.1741263      0.64217327
        2.6500258      0.40769627
    
```

RMSE CHK:

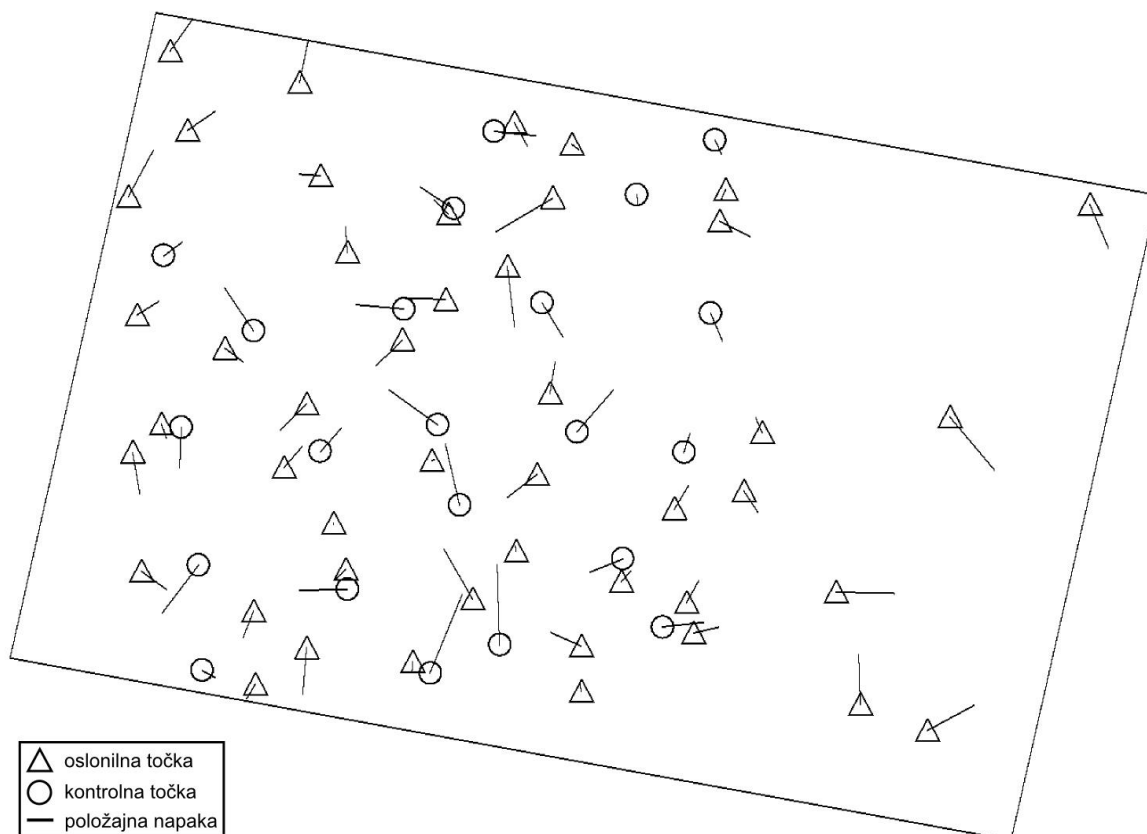
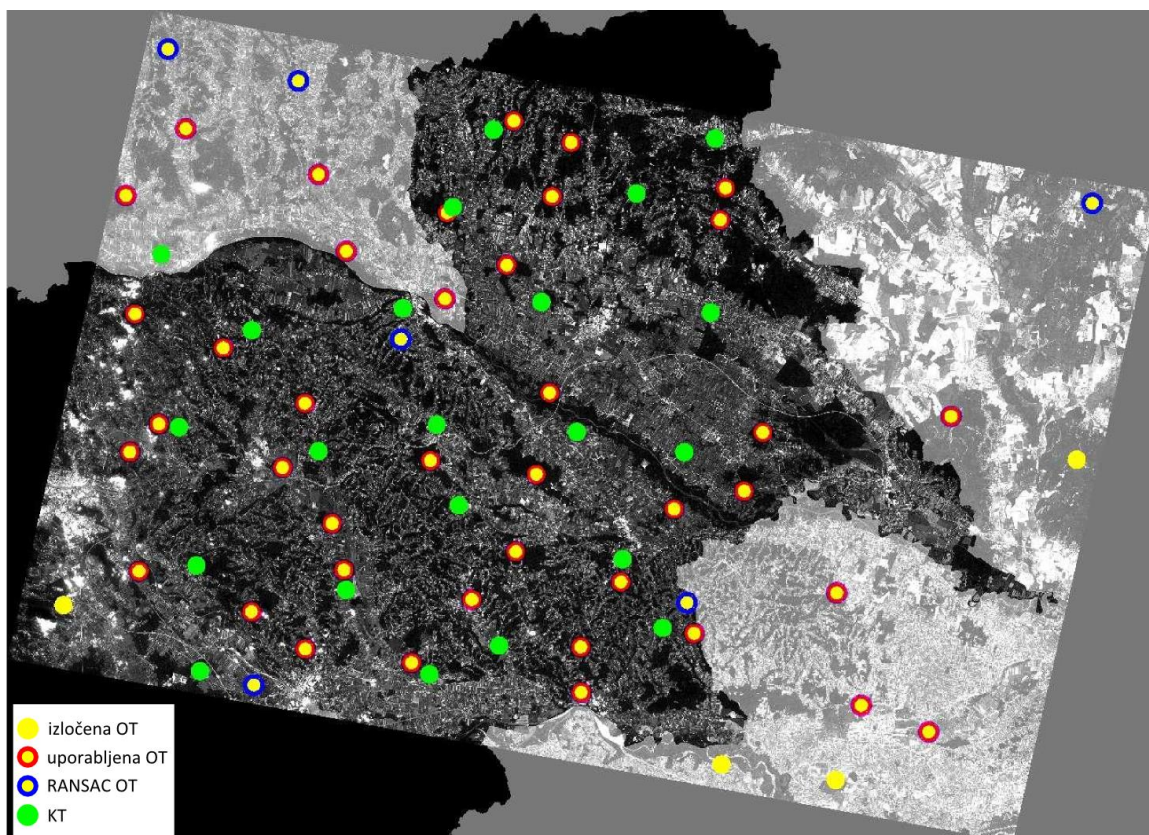
```

RMSE_X=      0.81785850      RMSE_Y=      0.50187930
RMSE=      0.95957040
    
```

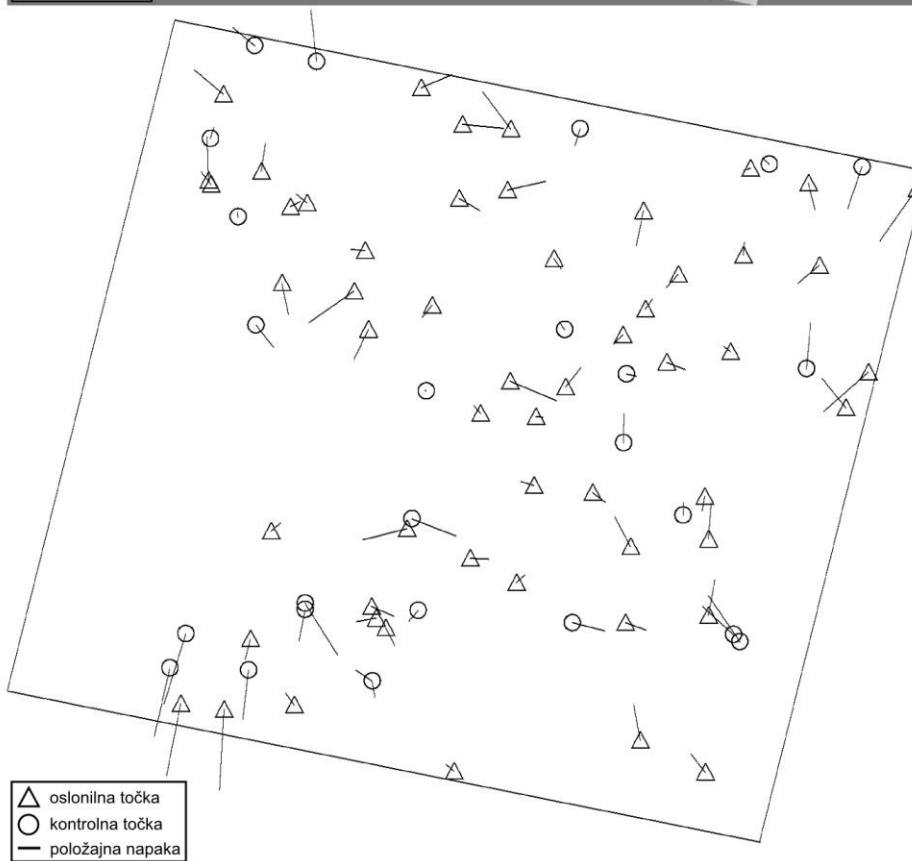
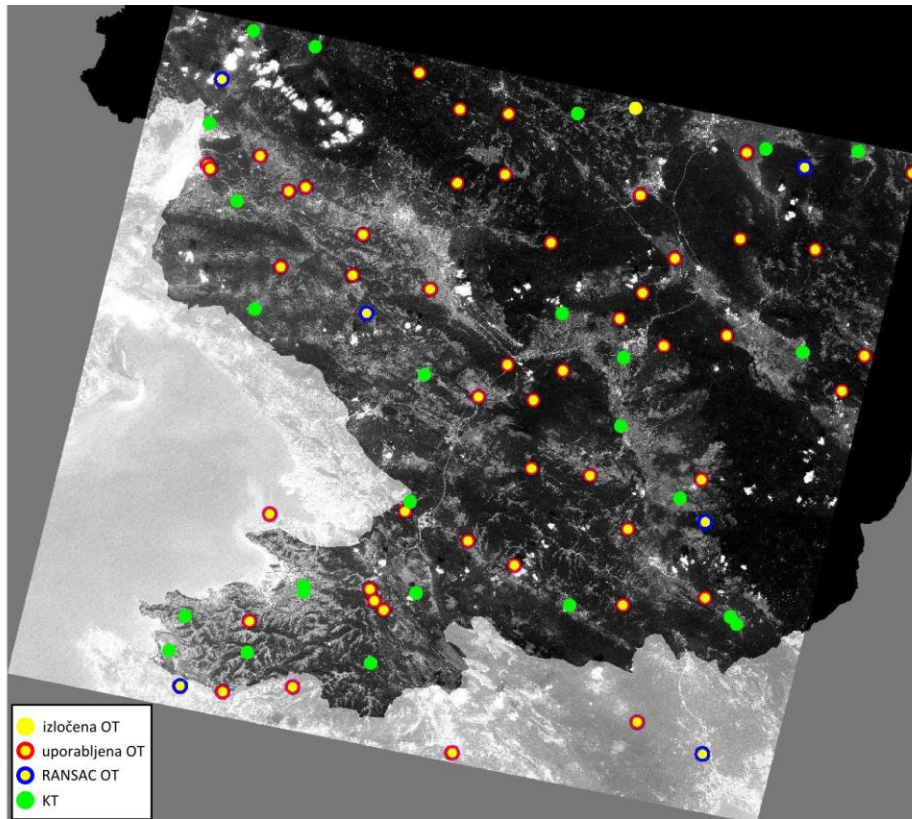
PRILOGA B: PORAZDELITEV IN ODPSTOPANJA OSLONILNIH IN KONTROLNIH TOČK

V prilogi se nahajajo posnetki z označenimi položaji točk in odstopanji za vse preizkušene posnetke z nizom s ~50 točkami. Na zgornjem delu slik so OT prikazane z rumeno barvo, KT pa z zeleno. OT, ki jih RANSAC ni izločil, imajo rdečo obrobo, začetne RANSAC točke pa modro. Na spodnjem delu slik so prikazana odstopanja (položajne napake) vseh točk.

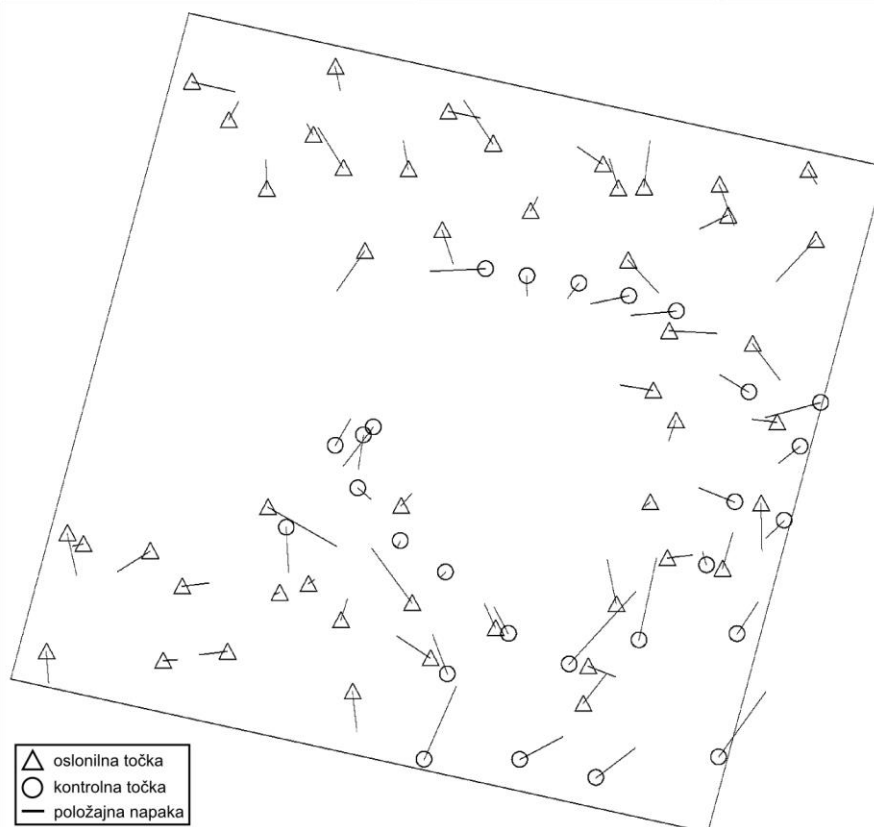
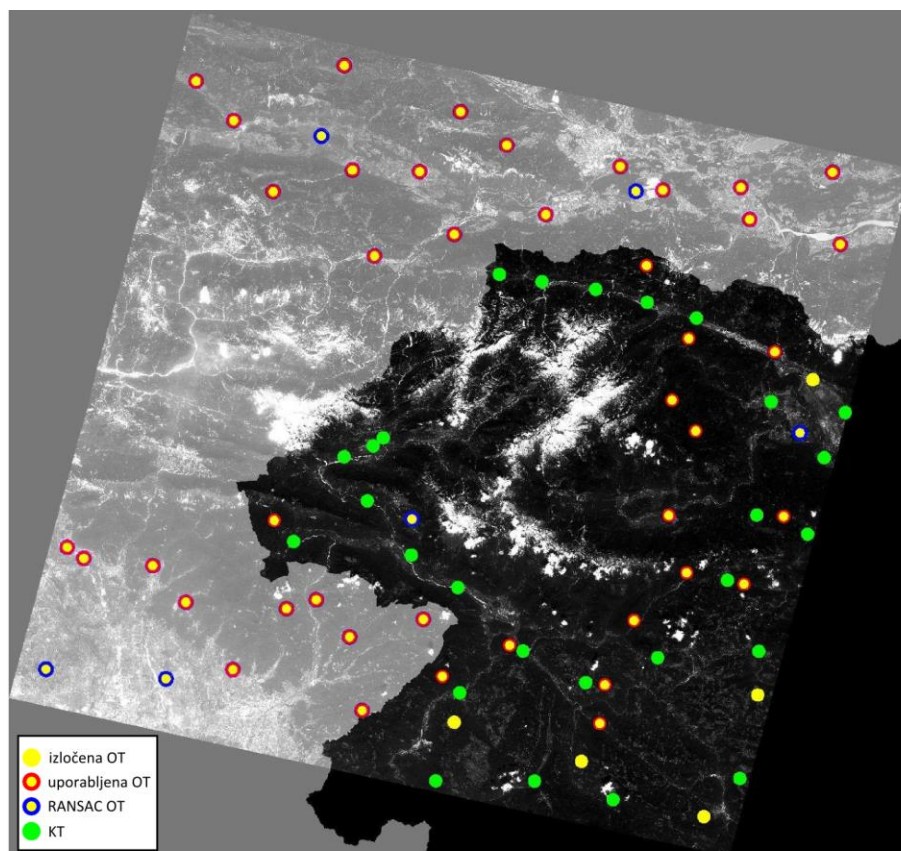
RapidEye Radgona



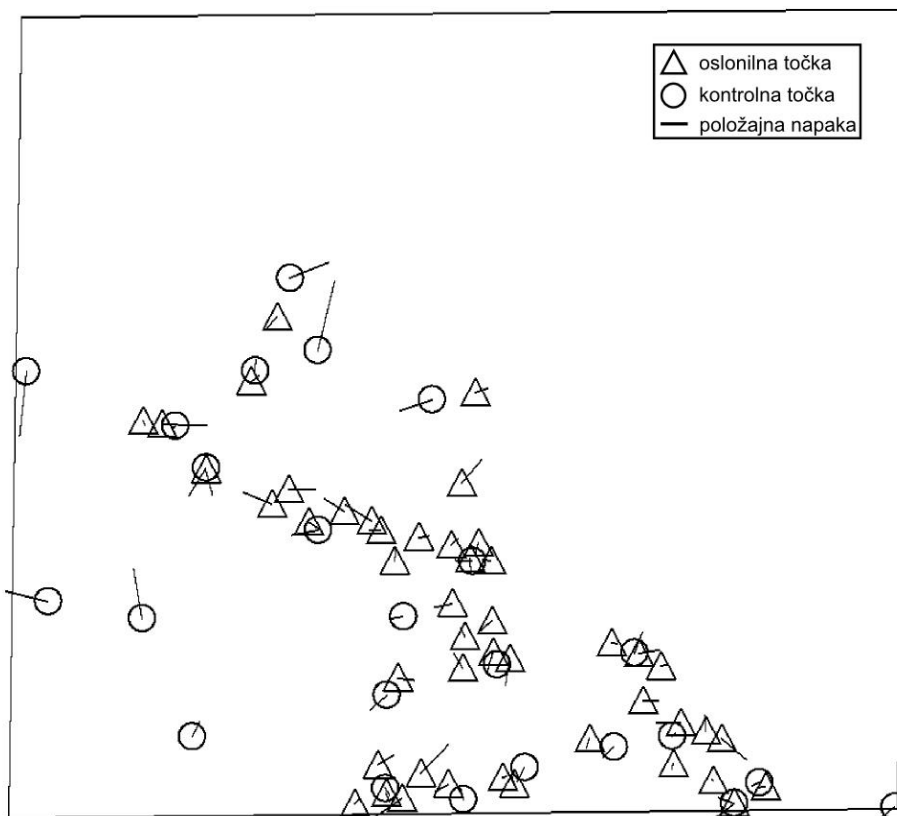
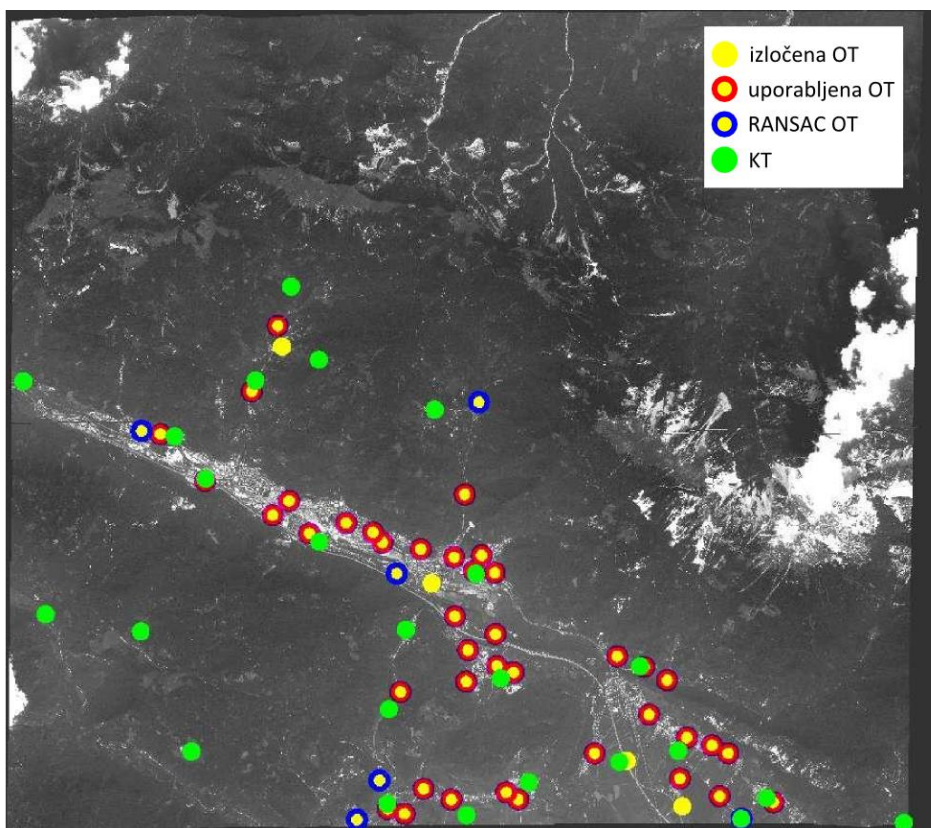
RapidEye Koper



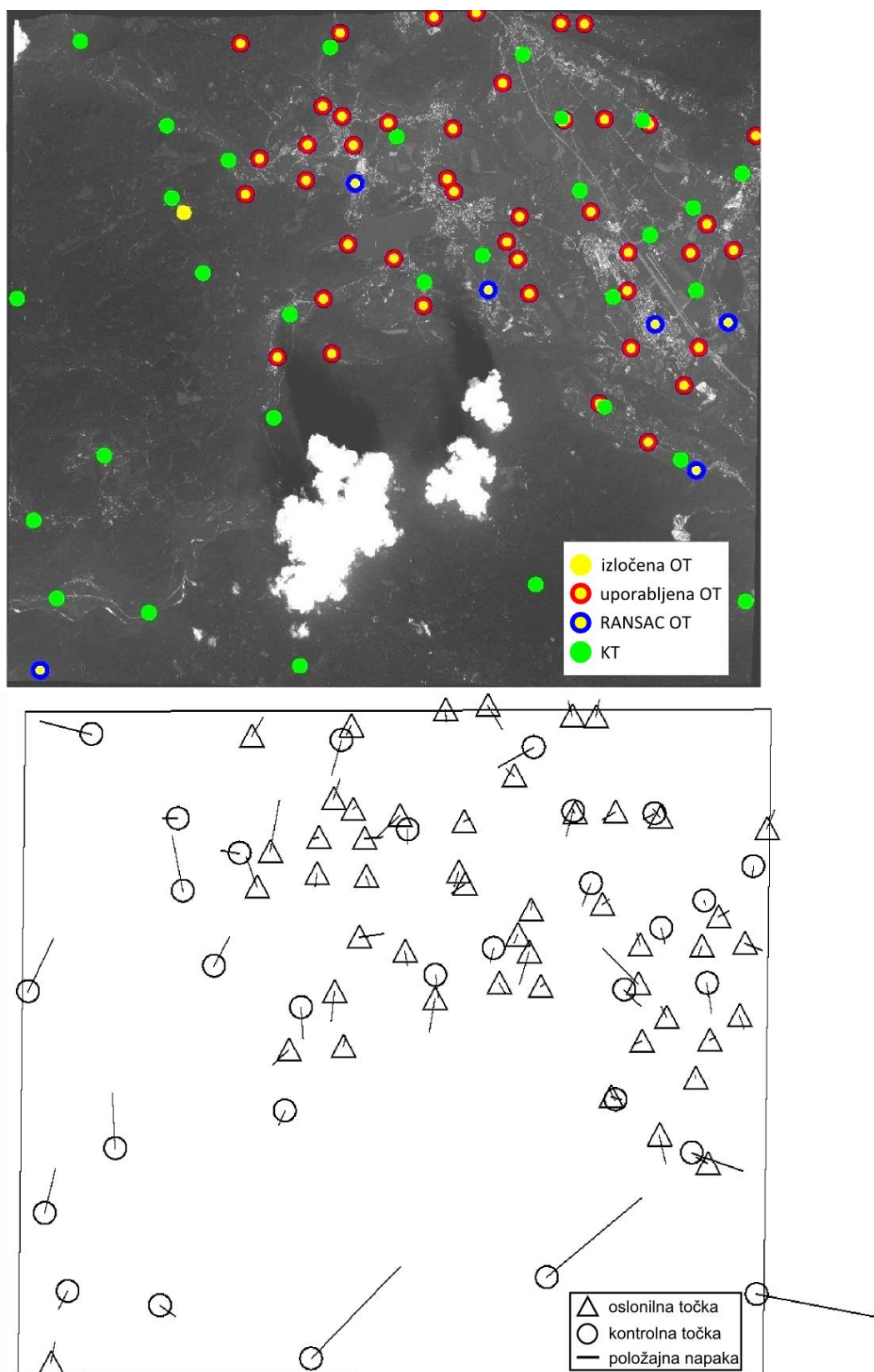
RapidEye Bohinj



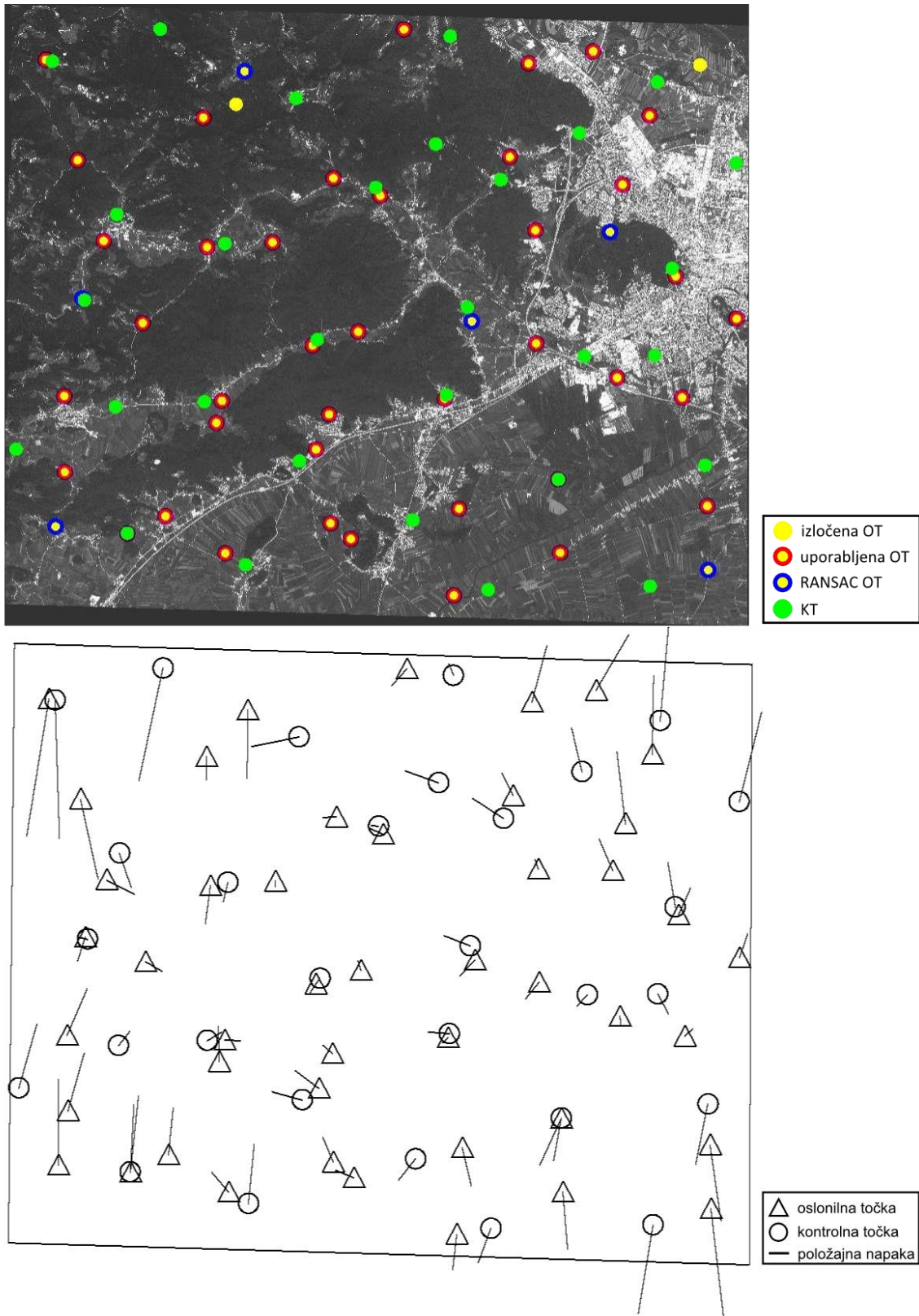
WorldView-2 Jesenice



WorldView-2 Bled



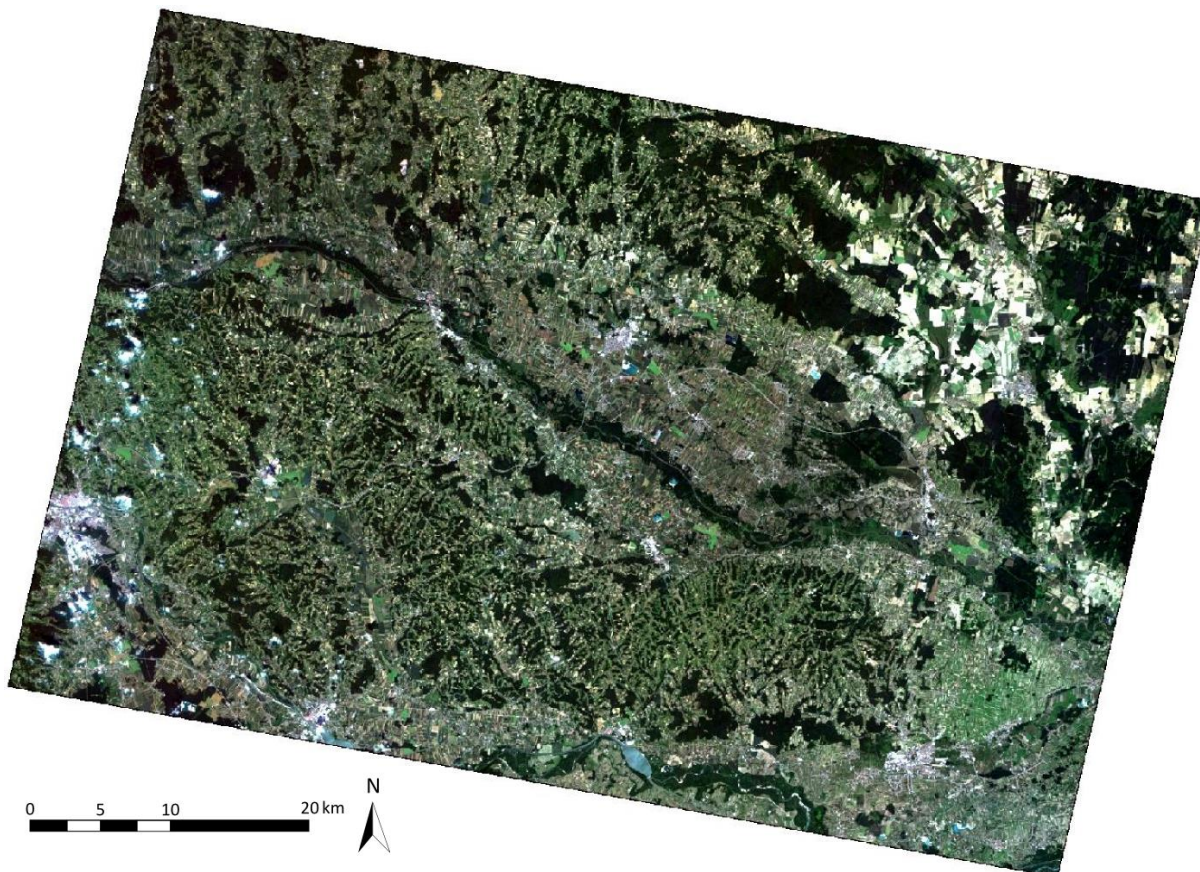
WorldView-2 Ljubljana



PRILOGA C: ORTOPOSNETKI

V prilogi so prikazani ortoposnetki vseh preizkušenih posnetkov.

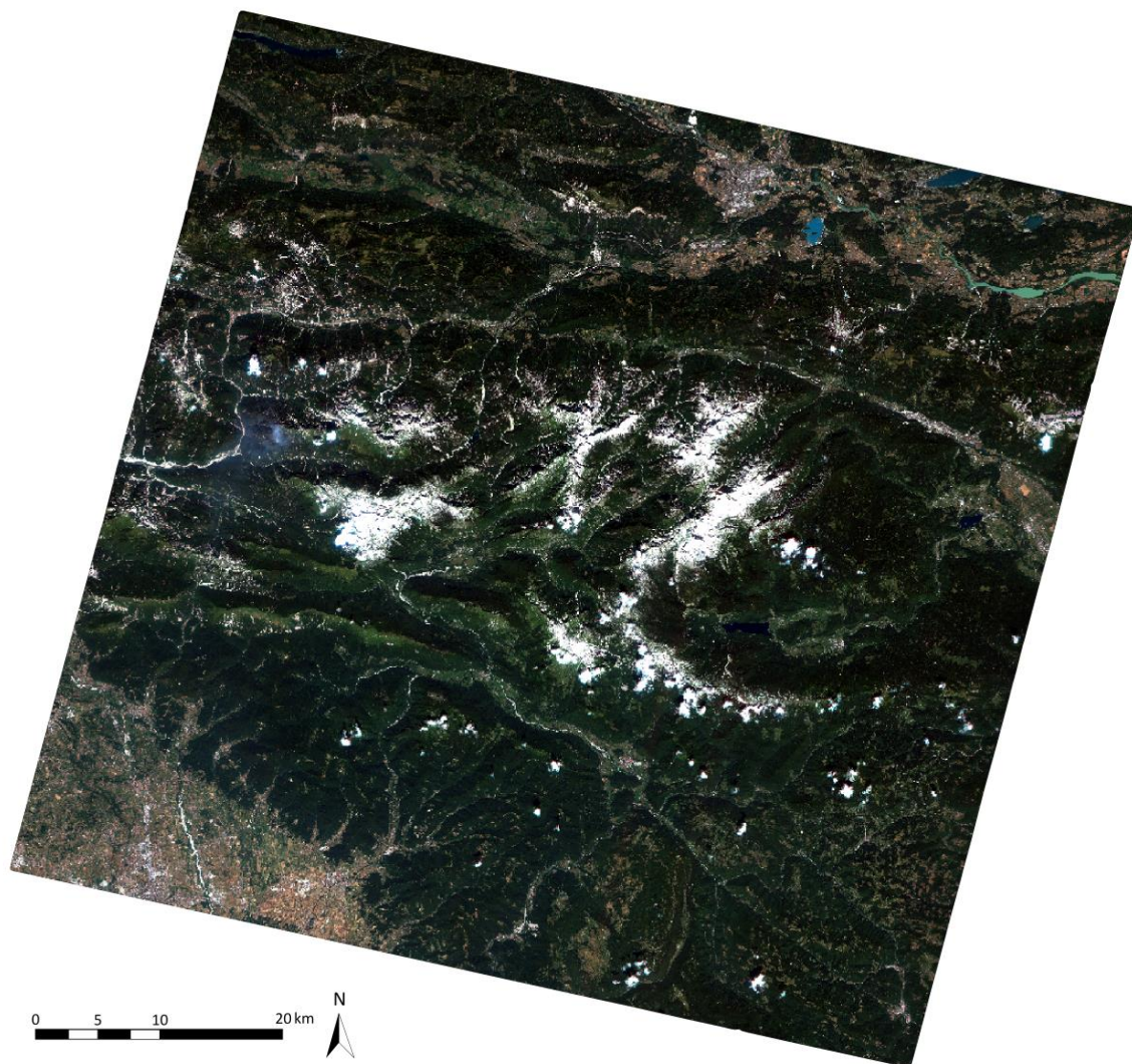
RapidEye Radgona



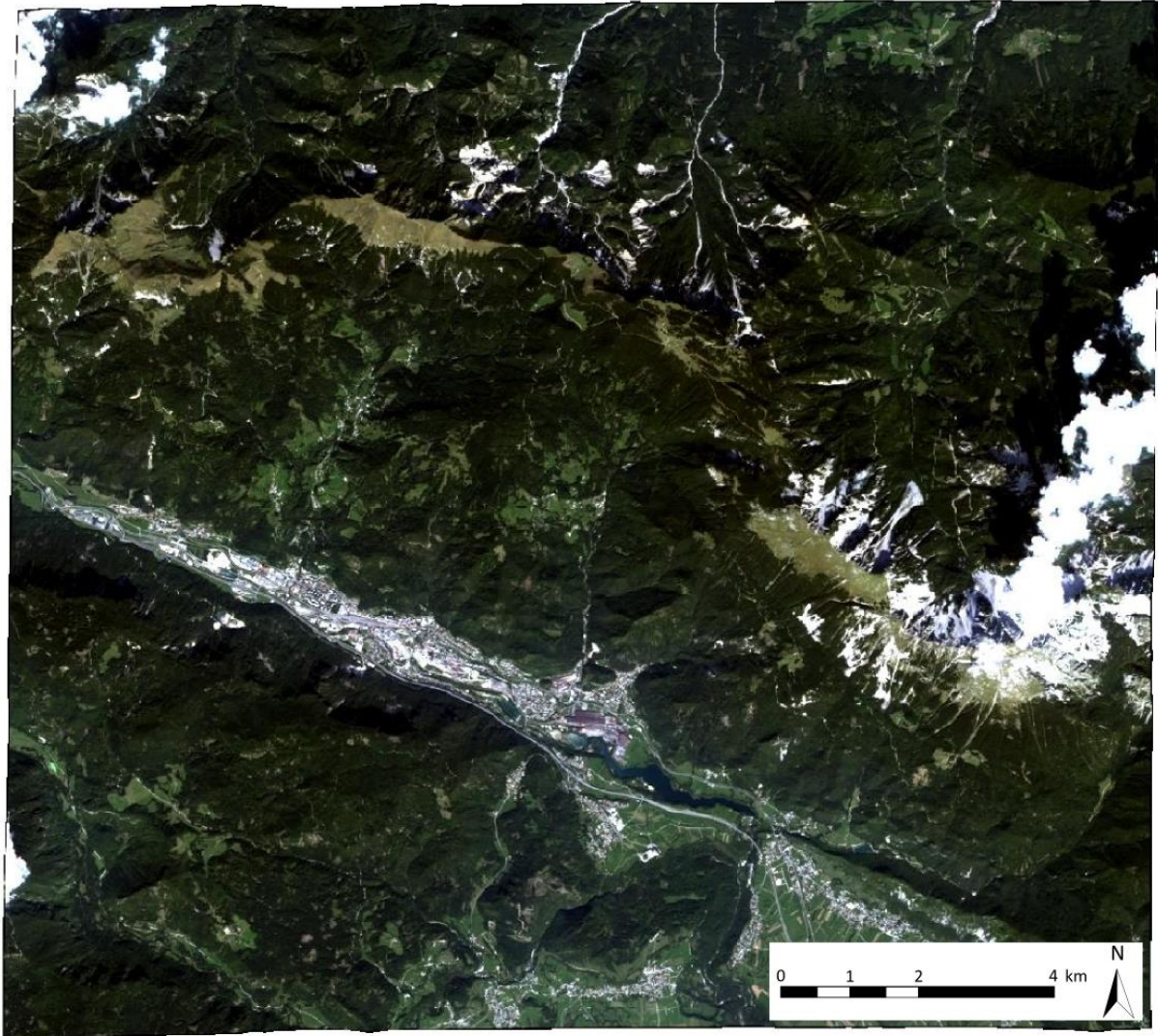
RapidEye Koper



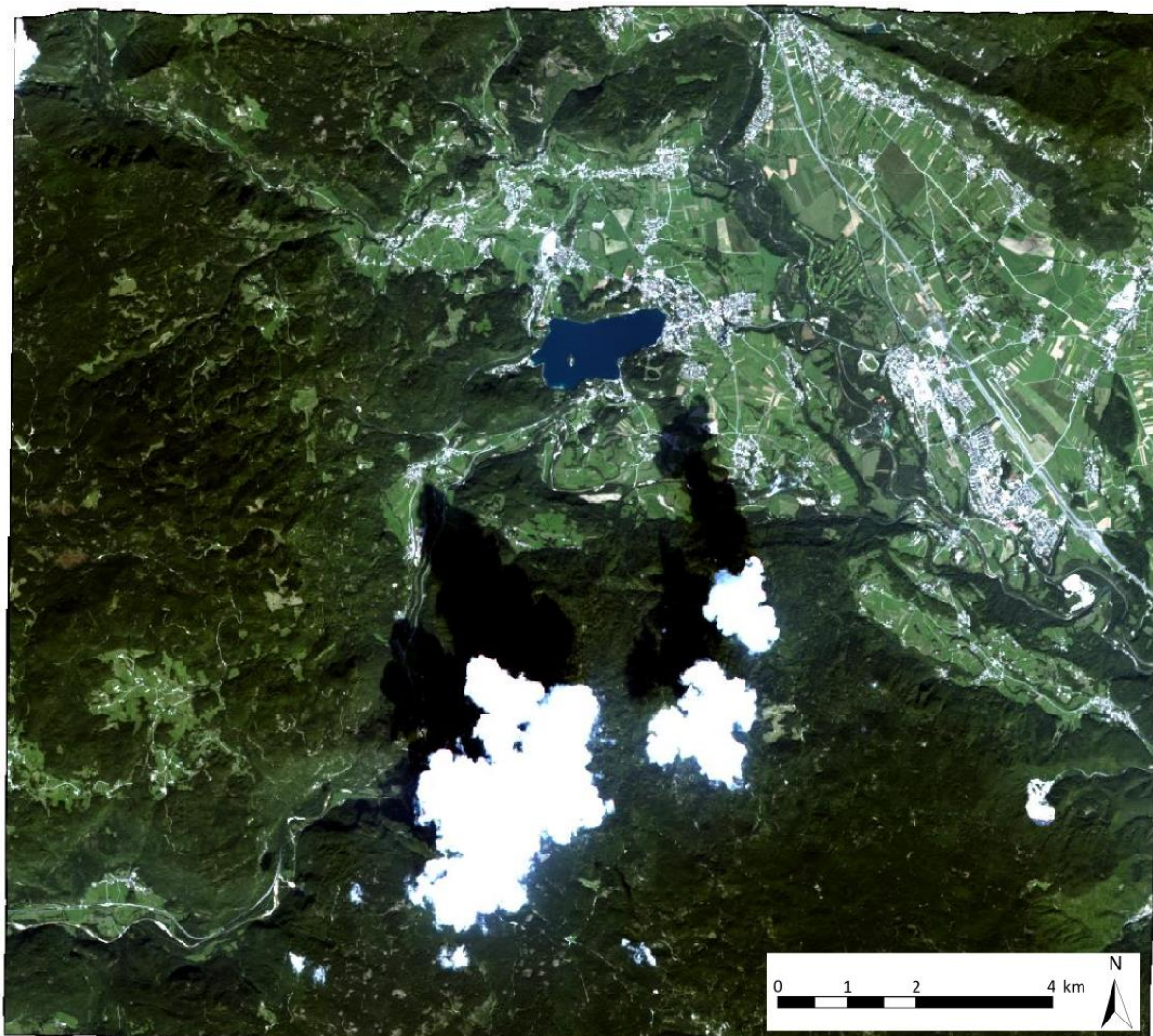
RapidEye Bohinj



WorldView-2 Jesenice



WorldView-2 Bled



WorldView-2 Ljubljana

