

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/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Uršič, M., 2016. Raziskava stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata v brezpilotnem letalnem sistemu in njihov vpliv na položajno točnost izdelkov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentorja Grigillo, D., Bone, M.): 51 str.

Datum arhiviranja: 09-09-2016

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 original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Uršič, M., 2016. Raziskava stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata v brezpilotnem letalnem sistemu in njihov vpliv na položajno točnost izdelkov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisors Grigillo, D., Bone, M.): 51 pp.

Archiving Date: 09-09-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GEODEZIJA  
SMER PROSTORSKA  
INFORMATIKA

Kandidat:

**MATIJA URŠIČ**

**RAZISKAVA STABILNOSTI PARAMETROV  
NOTRANJE ORIENTACIJE FOTOAPARATA V  
BREZPILOTNEM LETALNEM SISTEMU IN NJIHOV  
VPLIV NA POLOŽAJNO TOČNOST IZDELKOV**

Diplomska naloga št.: 989/PI

**EXPLORING THE STABILITY OF PARAMETERS OF  
CAMERAS INTERNAL ORIENTATION IN AN  
UNMANNED AERIAL SYSTEM AND THEIR INPATC  
ON POSITIONAL ACCURACY OF PRODUCTS**

Graduation thesis No.: 989/PI

**Mentorica:**

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Somentor:**

asist. dr. Dejan Grigillo  
Matej Bone, univ. dipl. inž. geod.

Ljubljana, 05. 09. 2016

## **ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

»Ta stran je namenoma prazna.«

## IZJAVE

Spodaj podpisani študent **Matija Uršič**,

vpisna številka **26203105**, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom:

**Raziskava stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata v brezpilotnem letalnem sistemu, in njihov vpliv na položajno točnost izdelkov**

### IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programske opreme za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta:

\_\_\_\_\_

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>528.7:629.735(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Matija Uršič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Mojca Kosmatin Fras</b>
<b>Somentorja:</b>	<b>asist. Dr. Gejan Grigillo, univ. dipl. inž. geod. Matej Bone</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Raziskava stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata v brezpilotnem letalnem sistemu in njihov vpliv na položajno točnost izdelkov</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomsko delo</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>str. 51, pregl. 6, sl. 23, graf. 17</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>brezpilotni letalnik, stabilnost notranje orientacije, Agisoft Photoscan Pro, Bramor rTK</b>

### **Izvleček**

Ob vse pogostejši uporabi brezpilotnih letalnih sistemov v geodeziji, postajajo ti vse bolj izpopolnjeni. Tako se pri želji po doseganju visoke točnosti fotogrametričnih izdelkov, ki so rezultat kompleksne izravnave bloka posnetkov in postopkov večslikovnega ujemanja, pojavi vprašanje stabilnosti parametrov notranje orientacije digitalnega fotoaparata v letalniku, ter njihov vpliv na končni izdelek. V nalogi smo uporabljali letalnik Bramor rTK, podjetja C-ASTRAL, za obdelavo posnetkov pa program Agisoft PhotoScan. Na bencinskem servisu Petrol v Vipavi je bila stabilizirana geodetska mreža 20-ih točk, ki nam je služila za kalibracijsko polje. Mrežo smo s polarno metodo izmere zgostili, da smo dobili več kontrolnih točk. Za ugotavljanje stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata, smo nad kalibracijskim poljem izvajali lete ob treh različnih terminih; vsakič dva leta, vsak na različni višini nad tlemi, vedno po istem načrtu letenja. Pridobljene posnetke smo vnesli v Agisoft PhotoScan, kjer smo z izravnavo bloka posnetkov izračunali parametre notranje in zunanje orientacije fotoaparata. Spreminjanje parametrov notranje orientacije fotoaparata smo analizirali na podlagi rezultatov izravnave posameznih testnih blokov posnetkov. Vpliv parametrov notranje orientacije fotoaparata na položajno točnost izdelkov – ortofotov in oblakov točk, smo ocenili na podlagi odstopanj na kontrolnih točkah, ki smo jih na izdelkih izmerili v programu Autocad Civil 3D. Opazovali smo tudi odstopanja izdelkov na kontrolnih točkah ob uporabi različnega števila oslonilnih točk.

»Ta stran je namenoma prazna.«



## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALIST INFORMATION**

**UDC:** 528.7:629.735(043.2)  
**Author:** Matija Uršič  
**Supervisor:** assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.  
**Co–advisors:** assist. Dejan Grigillo, Ph.D.  
Matej Bone univ. dipl. inž. geod.  
**Title:** Exploring the stability of parameters of camera’s internal orientation in an unmanned aerial system and their impact on positional accuracy of products  
**Document type:** Graduation thesis  
**Scope and tools:** p. 51, tab. 6, fig. 23, graph. 17  
**Key words:** unmanned aerial vehicle, inner orientation stability, Agisoft Photoscan Pro, Bramor rTK

### **Abstract**

Unmanned aerial systems are increasingly used in geodesy and thus more and more advanced. The wish to achieve higher accuracy of photogrammetric products, which result from complex bundle block adjustments and multi-image matching, raises the question of stability of parameters of the digital camera’s internal orientation in the aerial vehicle and their impact on the final product. The Bramor rTK aerial vehicle by the company C-ASTRAL and the Agisoft PhotoScan photo processing software were used for the purpose of this thesis. A geodetic network consisting of 20 stabilised points was established at the Petrol petrol station in Vipava to provide a calibration field. The network was condensed with a polar method to obtain more control points. To determine the stability of parameters of the camera’s internal orientation, we conducted flights above the calibration field on three occasions. On every occasion, we carried out two flights, each at a different altitude, following the same flight plan. The acquired pictures were loaded to the Agisoft PhotoScan software, where internal and external camera orientation parameters were calculated through bundle block adjustments. The changing internal orientation parameters were analysed based on tests performed on different test blocks. The impact of the said parameters on the accuracy of photogrammetric products, i.e. orthophotos and point clouds, were assessed in line with control point discrepancies that were measured on the products using the Autocad Civil 3D software. Moreover, the discrepancies of the products on control points using different numbers of Ground Control Points were also observed.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## **ZAHVALA**

Za pomoč, nasvete in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras in somentorjema asist. dr. Dejanu Grigillo ter Mateju Bonetu univ. inž. geod.

Hvala podjetju C-ASTRAL, ki je omogočilo uporabo letalnika. Zahvala gre tudi vsem sodelujočim pri projektu vzpostavitve geodetske mreže.

Hvala staršem za podporo in potrpežljivost skozi študijska leta.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO VSEBINE

Izjave	III
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	V
Bibliographic-documentalistic information and abstract	VII
Zahvala	IX
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Cilji .....	1
1.2 Struktura naloge.....	2
<b>2 TEORETIČNE OSNOVE.....</b>	<b>3</b>
2.1 Brezpilotni letalni sistemi.....	3
2.2 Centralna projekcija .....	3
2.3 Metode kalibracije fotoaparata .....	4
2.4 Računalniški vid .....	5
2.5 Pregled sorodnih del.....	5
<b>3 UPORABLJENA OPREMA IN PROGRAMSKO ORODJE .....</b>	<b>7</b>
3.1 Brezpilotni letalni sistem Bramor rTK.....	7
3.2 Agisoft Photoscan Pro.....	9
3.3 Ostala oprema in programsko orodje .....	9
<b>4 METODOLOGIJA .....</b>	<b>11</b>
<b>5 OPIS TESTNEGA OBMOČJA IN VZPOSTAVITEV KALIBRACIJSKEGA POLJA ....</b>	<b>13</b>
5.1 Opis testnega območja .....	13
5.2 Opis in vzpostavitev kalibracijskega polja .....	14
5.3 Terestrična izmera detajla.....	16
<b>6 ZAJEM POSNETKOV Z LETALNIKA IN PRIPRAVA BLOKOV POSNETKOV.....</b>	<b>18</b>
6.1 Zajem posnetkov z letalnika .....	18
6.1.1 Ponovitveni leti .....	19
6.2 Izbor posnetkov .....	20
6.3 Sestava blokov posnetkov .....	22
<b>7 OBDELAVA PODATKOV, REZULTATI IN ANALIZE.....</b>	<b>23</b>
7.1 Raziskava stabilnosti parametrov notranje orientacije .....	23
7.1.1 Rezultati in analize.....	27
7.2 Raziskava vpliva števila oslonilnih točk na položajno točnost izdelka .....	33
7.2.1 Rezultati in analiza.....	35
7.3 Raziskava vpliva uporabe različnih parametrov notranje orientacije.....	40
7.3.1 Raziskava vpliva različnih predhodno izračunanih parametrov notranje orientacije na točnost izdelkov .....	40
7.3.1.1 Rezultati in analize .....	41
7.3.2 Raziskava vpliva uporabe enega primera parametrov notranje orientacije na različnih blokih posnetkov.....	43
7.3.2.1 Rezultati in analize .....	44
<b>8 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>47</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>49</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Podatki o prvem terminu snemanja, dne 1. 4. 2015.....	19
Preglednica 2: Podatki o drugem terminu snemanja, dne 27. 10. 2015.....	20
Preglednica 3: Podatki o tretjem terminu snemanja, dne 27. 11. 2015.....	20
Preglednica 4: Število izbranih posnetkov za nadaljnje obdelave.....	21
Preglednica 5: Uporabljeni parametri notranje orientacije, izračunani iz različnih konfiguracij blokov, kot vhodni podatek pri obdelavi bloka 2_70A in izdelavi oblaka točk ter ortofota.....	41
Preglednica 6: Bloki posnetkov, obdelani z uporabo parametrov p_2_70AB in p_2_70AB_120AB.....	43

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Vrednosti goriščne razdalje v smeri osi x.....	28
Grafikon 2: Vrednosti goriščne razdalje v smeri osi y.....	28
Grafikon 3: Položaj glavne točke v x-smeri.....	29
Grafikon 4: Položaj glavne točke v y-smeri.....	29
Grafikon 5: Vrednosti koeficienta radialne distorzije K1.....	30
Grafikon 6: Vrednosti koeficienta radialne distorzije K2.....	31
Grafikon 7: Vrednosti koeficienta tangencialne distorzije P1.....	32
Grafikon 8: Vrednosti koeficienta tangencialne distorzije P2.....	32
Grafikon 9: Vrednosti parametra poševnosti.....	33
Grafikon 10: Srednji kvadratni pogreški horizontalnega položaja in višine, na kontrolnih točkah, izmerjenih na izdelkih v odvisnosti od uporabljenega števila OT za orientacijo bloka; uporabljene KT iz kalibracijskega polja in dodatnih 10 detajlnih točk (točke so bile izmerjene ročno).....	38
Grafikon 11: Srednji kvadratni pogreški horizontalnega položaja in višine izdelka, na avtomatsko izmerjenih kontrolnih točkah kalibracijskega polja, v odvisnosti od uporabljenega števila OT za orientacijo bloka; uporabljene samo KT iz kalibracijskega polja (točke so bile izmerjene avtomatsko).....	38
Grafikon 12: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja, izračunani iz terenskih meritev in izmerjenih koordinat KT na ortofotih iz bloka 2_70A, ob uporabi različnih vhodnih parametrov notranje orientacije.....	41
Grafikon 13: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov višin, izračunani iz terenskih meritev in izmerjenih koordinat KT na oblakih točk iz bloka 2_70A, ob uporabi različnih vhodnih parametrov notranje orientacije.....	42
Grafikon 14: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na ortofotih iz blokov, obdelanih s parametri p_2_70AB.....	44
Grafikon 15: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na ortofotih iz blokov, obdelanih s parametri p_2_70AB_120AB.....	44
Grafikon 16: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov višine, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na oblakih točk iz blokov, obdelanih s parametri p_2_70AB.....	45
Grafikon 17: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov višine, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na oblakih točk iz blokov, obdelanih s parametri p_2_70AB_120AB.....	45

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Povezava med objektom na posnetku in v prostoru (Bric, Grigillo, Kosmatin Fras, 2010) .....	3
Slika 2: Priprava letalnika na vzlet .....	7
Slika 3: Načrtovanje poti letenja na višini 70 m v programu GeoPilot.....	8
Slika 4: Spremljanje izvedbe načrta letenja v programu Virtual Cockpit .....	8
Slika 5: Shema poteka raziskovalne naloge .....	11
Slika 6: Geografska lega testnega polja in vzletišča (Portal Geopedia, 2016) .....	13
Slika 7: Prikaz območja kalibracijskega polja.....	14
Slika 8: Primer signalizacije pri prvem terminu snemanja.....	15
Slika 9: Primer signalizacije pri drugem in tretjem terminu snemanja .....	16
Slika 10: Prikaz položaja točk mreže (rdeče) in detajla (modro) .....	17
Slika 11: Primer posnetega detajla na aeroposnetku z višine 70 m (levo) in ob terestrični izmeri (desno).....	17
Slika 12: Prikaz smeri preletov A in B .....	18
Slika 13: Snemalni pasovi smeri A in B na primeru 2_120 (prikaz iz programa Agisoft Photoscan Pro).....	21
Slika 14: Shema postopka izračuna parametrov NO .....	23
Slika 15: Pogovorno okno <i>Rereference Settings</i> .....	24
Slika 16: Pogovorno okno <i>Camera Calibration</i> .....	25
Slika 17: Položaj zastavice po avtomatskem pozicioniranju (levo) in ročno popravljen položaj (desno).....	26
Slika 18: Pogovorno okno <i>Optimize Camera Alignment</i> .....	27
Slika 19: Prikaz izbranih razporeditev OT .....	34
Slika 20: Shema postopka obdelave podatkov .....	35
Slika 21: Primer izmejenega položaja KT na ortofotu (rdeč križ) in položaja uvožene koordinate iste KT (bel križ).....	36
Slika 22: Primer digitalizacije točk z višinami na oblaku točk .....	36
Slika 23: Poligon območja med tremi OT .....	39



## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

3D	Tri-razsežen
BLS	Brezpilotni letalni sistem
D96/TM	Geodetski datum, realiziran leta 1996 / transverzalna Mercatorjeva projekcija – državni koordinatni sistem, v veljavi od 01.01.2008
DMP	Digitalni model površja
GCP	angl. Ground Control Point
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistem
INS	Inercialni navigacijski sistem
KT	Kontrolna točka
NO	Notranja orientacija
OT	Oslonilna točka
SfM	angl. Structure from Motion
SIFT	angl. Scale-Invariant Feature Transform
SURF	angl. Speed up Robust Features
UAS	angl. Unmanned Aerial System
UAV	angl. Unmanned Aerial Vehicle

**OPIS POMENA NEKATERIH STROKOVNIH IZRAZOV**

Konfiguracija bloka	Razporeditev in orientacija posnetkov v bloku.
Posnetek	Fotografija, zajeta s fotoaparatom na letalniku med letom.
Snemanje	Zajemanje posnetkov (fotografiranje) z letalnika.
Avtomatsko poročilo	Poročilo programa Agisoft Photoscan Pro, v katerem so predstavljene osnovne lastnosti projekta, med drugim tudi koreni srednjih kvadratnih pogreškov položaja na kontrolnih točkah. Slikovne koordinate kontrolnih točk so izmerjene po enakem postopku, kot slikovne koordinate oslonilnih točk (avtomatska določitev približnega položaja in ročna določitev natančnega položaja). Primerjajo se objektne koordinate kontrolnih točk, izračunane v postopku izravnave in orientacije bloka posnetkov (na osnovi redkega oblaka točk), in na terenu izmerjene kontrolne točke.

## SEZNAM PRILOG

Priloga A: Koordinate uporabljenih točk .....	A1
Priloga B: Rezultati kalibracij .....	B1
Priloga C: Rezultati horizontalnih in višinskih pogreškov .....	C1



## 1 UVOD

Brezpilotni letalni sistemi so zadnja leta vse bolj dostopni in njihova uporaba se širi na najrazličnejša področja civilne in vojaške rabe. S tehničnim napredkom in razvojem sodobnih fotogrametričnih programskih rešitev je mogoče na relativno enostaven in avtomatiziran način priti do izdelkov, kot sta ortofoto in fotogrametrični oblak točk. Ob strmenju k večji položajni natančnosti in točnosti izdelkov se srečamo z različnimi vplivi, ki na področju brezpilotnih letalnih sistemov, v nasprotju s klasičnimi fotogrametričnimi rešitvami, še niso dobro raziskani.

Mali brezpilotni letalniki so podvrženi številnim zunanjim dejavnikom, kot so sunki med vzletanjem in pristajanjem ter pogost transport, med katerim se letalnike do neke mere razstavi. Med samim letom prihaja do vibracij zaradi motorja, sprememb v temperaturi in tlaku, podvrženi so tudi sunkom vetra, zaradi katerih prihaja do rahlih variacij med orientacijami posnetkov. V letalnike niso vgrajene klasične merske fotogrametrične kamere pač pa nemerski digitalni fotoaparati višjega cenovnega razreda, ki so uporabljeni zaradi kompaktnosti in nizke teže. Stabilnost parametrov notranje orientacije in njihov vpliv na fotogrametrični izdelek je pri teh fotoaparatih v takšnih pogojih slabo raziskan.

Za potrebe naloge smo uporabili brezpilotni letalni sistem Bramor rTK, podjetja C-ASTRAL, Proizvodnja zračnih in vesoljskih plovil d.o.o., z digitalnim fotoaparatom Sony Alpha 6000. Ker se parametri notranje orientacije fotoaparata, ki jih določimo z laboratorijsko kalibracijo, zaradi naštetih dejavnikov s časom lahko spremenijo, smo se odločili za kalibracijo na kalibracijskem polju, vzpostavljenim na bencinskem servisu Petrol v Vipavi. Tega je predstavljala v ta namen stabilizirana in signalizirana geodetska mreža. Nad testnim poljem smo zajeli posnetke z letalnikom ob treh časovnih terminih.

### 1.1 Cilji

V programu Agisoft Photoscan Pro smo izračunali parametre notranje orientacije fotoaparata, pridobljene na podlagi blokov posnetkov z različnimi konfiguracijami, in sicer za tri časovne termine. Z uporabo različnih parametrov notranje orientacije (NO) fotoaparata in različnega števila oslonilnih točk smo analizirali njihov vpliv na horizontalno in vertikalno točnost fotogrametričnih izdelkov.

Glavni cilji naloge so:

- analiza časovne stabilnosti parametrov NO,
- analiza vpliva konfiguracije bloka posnetkov na izračun parametrov NO,
- ugotovitev vpliva različnih vrednosti parametrov NO, ki smo jih določili iz različnih vhodnih podatkov, na kakovost izdelkov,

- ugotovitev vpliva števila in razporeditve oslonilnih točk na kakovost izdelkov.

## 1.2 Struktura naloge

V uvodnem poglavju je predstavljen motiv za izvedbo naloge in njeni cilji. Sledi poglavje o teoretičnih osnovah. V njem na kratko obrazložimo pojem brezpilotni letalni sistem, predstavimo osnove centralne projekcije, metode kalibracije fotoaparatorov in področje računalniškega vida. Poglavje zaključimo s pregledom sorodnih del. Tretje poglavje je namenjeno opisu uporabljene opreme in programskih orodij. Podrobneje sta predstavljena brezpilotni letalni sistem Bramor-rTK in program Agisoft Photoscan Pro. V četrtem poglavju opišemo metodologijo raziskovalnega dela naloge. Predstavimo faze terenskega dela in raziskav. Sledi peto poglavje z opisom testnega območja in osnovnih značilnosti kalibracijskega polja. V tem poglavju je tudi opis terenske izmere dodatnih kontrolnih točk. V šestem poglavju se posvetimo predstavitvi zajema posnetkov z letalnikom. Podani so osnovni podatki vsakega od treh terminov snemanja, opisan je način razporejanja zajetih posnetkov v bloke. Sledi sedmo poglavje, v katerem so predstavljene obdelave podatkov in analize rezultatov. V treh podpoglavjih predstavimo postopke, rezultate in analize raziskav stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata, vpliv števila oslonilnih točk na položajno točnost izdelka, ter vpliv uporabe različnih parametrov notranje orientacije fotoaparata na položajno točnost izdelkov. V drugem podpoglavju opišemo tudi metodo merjenja in izračuna horizontalne in višinske točnosti izdelkov na kontrolnih točkah. V zaključnem poglavju povzamemo rezultate in ugotovitve.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Brezpilotni letalni sistemi

Brepilotni letalni sistemi (BLS) (angl. Unmanned areal system, UAS) so skupek več sistemov, ki jih v osnovi predstavljajo trije podsistemi (Colomina, Molina, 2014):

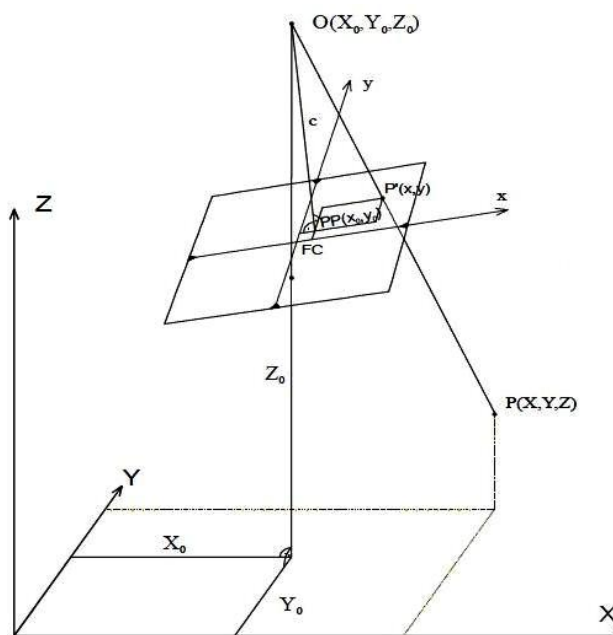
- brezpilotni letalnik (angl. Unmanned areal vehicle, UAV),
- zemeljska postaja (angl. Ground control station) za nadzor letalnika in obdelavo podatkov,
- brezžični sistem (angl. Communication data link) za prenos podatkov in komunikacijo z letalnikom.

Ob teh so ključni deli BLS še avtopilot, senzorji za navigacijo in senzorji za zajem podatkov.

Zaradi hitrega razvoja tehnologije na tem področju in širokega spektra uporabe poznamo več vrst brezpilotnih letalnih sistemov (Eisenbeiss, 2009). Manjše letalnike delimo na letala in kopterje, na katere so lahko nameščeni različni senzorji (Bitenc, 2014).

### 2.2 Centralna projekcija

Osnovne geometrične zakone, zaradi katerih je možno, na osnovi fotografij, rekonstruirati položaj in obliko objekta v prostoru, opisujemo s centralno projekcijo (Kraus, 1993).



Slika 1: Povezava med objektom na posnetku in v prostoru (Bric, Grigillo, Kosmatin Fras, 2010)

Na sliki 1 je prikazana povezava med slikovnimi koordinatami objekta na sliki (točka P') in prostorskimi koordinatami objekta v naravi (točka P), ki je matematično definirana z enačbami centralne projekcije (Kraus 1993):

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

kjer so:

$x_0, y_0$ : slikovni koordinati glavne točke,

$c$ : goriščna razdalja,

$r_{ij}$ : elementi rotacijske matrike slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem,

$X_0, Y_0, Z_0$ : koordinate projekcijskega centra v objektnem koordinatnem sistemu,

$X, Y, Z$ : prostorske koordinate objekta.

### 2.3 Metode kalibracije fotoaparata

V postopku kalibracije fotoaparata se poleg velikosti goriščne razdalje in položaja glavne točke izračunajo tudi parametri, ki omogočajo popravo slikovnih koordinat t.j. koeficienti distorzije, poševnost in ne-enotno merilo vzdolž osi.

Popravki slikovnih koordinat se izračunajo po enačbah (Agisoft, 2016a):

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1 xy)(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4), \quad (4)$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy)(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4), \quad (5)$$

$$u = c_x + x' f_x + y' skew, \quad (6)$$

$$v = c_y + y' f_y, \quad (7)$$

kjer so:

$u, v$ : pikselske koordinate,

$x, y$ : normalizirane slikovne koordinate,

$x', y'$ : normalizirane slikovne koordinate, obremenjene z distorzijo,

$f_x, f_y$ : velikost goriščne razdalje v smeri osi  $x$  ( $y$ ) v pikslih,

$c_x, c_y$ : pikselske koordinate glavne točke,

$skew$ : koeficient poševnosti,



Ki: koeficienti radialne distorzije,

Pi: koeficienti tangencialne distorzije.

Poznamo več metod kalibracije (Tang, 2013):

- **Laboratorijska kalibracija** (angl. laboratory calibration); uporablja se za merske kamere.
- **Kalibracija s testnim poljem z znanimi prostorskimi koordinatami** (angl. test field calibration); v sklopu izravnave bloka snopov se na podlagi znanih koordinat signaliziranih točk testnega polja izračunajo parametri notranje orientacije.
- **Kalibracija na podlagi vzporednih linij** (angl. plumb-line calibration); testno polje predstavljajo ravne linije. Metoda izkorišča dejstvo, da se morajo ravne linije preslikati kot ravne linije ter da je vsaka razlika posledica distorzije objektiva.
- **Samokalibracija** (angl. Self.calibration); predstavlja metodo določitve parametrov notranje orientacije iz notranje geometrije bloka brez uporabe oslonilnih točk (OT).
- **Kalibracija ob delu** (angl. on-the-job calibration); predstavlja kombinacijo kalibracije na testnem polju ter samokalibracije in je praviloma uporabljena na področju računalniškega vida.

## 2.4 Računalniški vid

Področje računalniške interpretacije slik, ki prikazujejo 3D okolje, imenujemo računalniški vid (angl. computer vision). V fotogrametriji je pogosto uporabljen postopek »Structure from Motion« (SfM), ki se nanaša na modeliranje 3D objektov iz fotografij (Wikipedia, 2016).

Identifikacija identičnih (homolognih) točk na različnih fotografijah se izvaja z uporabo naprednih algoritmov. Najpogosteje uporabljana sta SURF (angl. Speed up Robust Features) (Bay, Tuytelaars, Gool, 2006) in SIFT (angl. Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004).

## 2.5 Pregled sorodnih del

V diplomski nalogi (Kvaternik, 2007) je avtor opisal postopek kalibracije na testnem polju in analiziral spreminjanje parametrov notranje orientacije in njihove vplive na izdelek.

Avtorja Hastedt in Luhmann (2015) sta opisala več primerov kalibracije na laboratorijskem testnem polju in razlike v pridobljenih parametrih. Prav tako je ovrednoten njihov vpliv na končni izdelek.

Kalibracija letalskih fotogrametričnih sistemov je raziskovalno boljše razdelana od kalibracije fotaparata v BLS. Bistvo je zbrano v članku avtorjev Honkavaare in drugih (2006). Priporočajo

---

izravnavo celovitega bloka iz vzdolžnih in prečnih snemalnih pasov na dveh različnih višinah nad kalibracijskim poljem. Podan je opis kalibracijskega polja s signaliziranimi točkami. V nalogi smo sledili priporočilom iz tega članka, tako da smo velikost polja zmanjšali in prilagodili število pasov posnetkov v blokih.

### 3 UPORABLJENA OPREMA IN PROGRAMSKO ORODJE

#### 3.1 Brezpilotni letalni sistem Bramor rTK

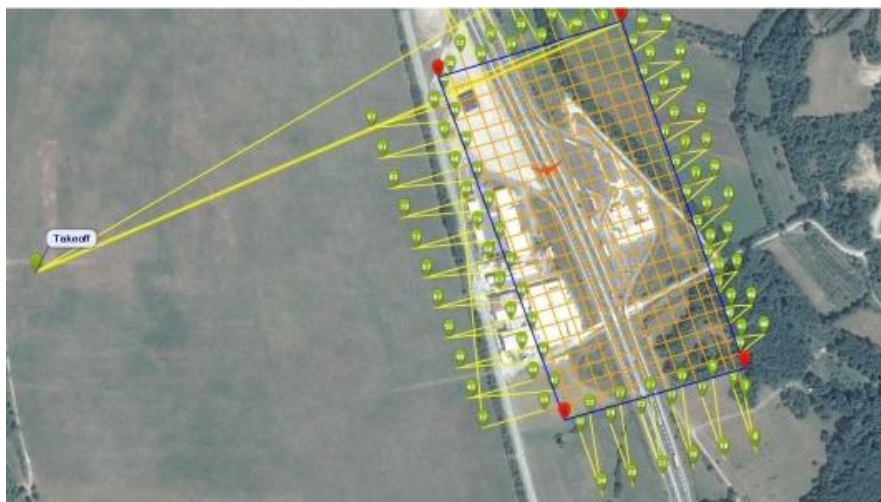
Letalnik je izdelek ajdovskega podjetja C-ASTRAL, Proizvodnja zračnih in vesoljskih plovil d.o.o., ki je eno vodilnih v svetovnem merilu na področju razvoja in izdelave brezpilotnih letalnih sistemov na osnovi platforme letečega krila. Značilnosti njihovih letalnikov so velik doseg, avtonomija in nosilnost, kar omogoča vgradnjo različnih senzorjev. Uporabljajo se tako za civilne kot tudi vojaške namene.

Uporabljen sistem Bramor rTK sestavlja brezpilotni letalnik ki ima vgrajen digitalni fotoaparata Sony Alpha 6000, inercialni navigacijski sistem (INS), GNSS sprejemnik in podatkovno povezavo, zemeljsko kontrolno postajo s programsko opremo in vzletni katapult (Slika 2). Opcijsko je lahko del sistema tudi GNSS sprejemnik kot bazna postaja, kar omogoča pridobivanje točnih položajev letalnika med letom z metodo PPK (angl. post processing kinematic) (C-Astral, 2016).



Slika 2: Priprava letalnika na vzlet

Del sistema je programska oprema GeoPilot (Slika 3), ki z letalnikom komunicira prek podatkovne povezave. Gre za C-ASTRAL-ov program za pripravo načrta letenja. Določi se območja zajema, višina leta in preklap med posnetki. Ta podatek se skupaj s podatkom o hitrosti letenja upošteva pri nastavitvi intervala proženja fotoaparata. Program omogoča spreminjanje misije med letom.



Slika 3: Načrtovanje poti letenja na višini 70 m v programu GeoPilot

Poleg tega uporabimo še program Virtual Cockpit (Slika 4) ameriškega podjetja Lockheed Martin, ki upravlja letalnik med letom in omogoča tako avtonomno izvedbo misije, pripravljene v programu GeoPilot, kot tudi interaktivno upravljanje z letalnikom. V program so vključeni varnostni mehanizmi, ki ob nepredvidenih dogodkih, kot sta naprimer izguba komunikacije ali močan veter, sprožijo postopek vrnitve letalnika na prej določeno varno mesto, oziroma, v najslabšem primeru, avtomatsko sprožitev pristajalnega padala.



Slika 4: Spremljanje izvedbe načrta letenja v programu Virtual Cockpit

### 3.2 Agisoft Photoscan Pro

Gre za izdelek ruskega proizvajalca Agisoft LLC. Na podlagi vnešenega bloka posnetkov, z naprednimi tehnikami računalniškega vida in georeferenciranjem na podlagi koordinat OT (angl. ground control points, GCP), omogoča program izdelavo različnih fotogrametričnih izdelkov, kot so (Agisoft, 2016c):

- oblaki točk,
- nepravilne trikotniške mreže,
- digitalni ortofoto,
- digitalni modeli površja,
- sferične panorame.

Pri aerotriangulaciji program izračuna, po metodi izravnave bloka snopov, parametre notranje in zunanje orientacije fotoaparata po metodi samokalibracije. Po merjenju OT se izravnava izvede še enkrat. Ob tem se po metodi kalibracije ob delu, z upoštevanjem koordinat OT, optimizirajo rezultati prve izravnave.

Program omogoča izdelavo avtomatskega poročila v formatu PDF, v katerem so predstavljeni osnovni parametri projekta, vključno s koreni srednjih kvadratnih pogreškov (RMSE) horizontalnega položaja in višine izdelka na kontrolnih točkah (KT).

Na tržišču je več podobnih programskih paketov (Dougan, 2015, 11 str.):

- »Pix4Dmapper (Pix4D, <https://pix4d.com/> ),
- Photoscan (Agisoft, <http://www.agisoft.com/> ),
- 3Dsurvey (Modri planet, <http://www.modriplanet.si/> ),
- DroneMapper (DroneMapper, <https://dronemapper.com/> ),
- APS (Menci, <http://www.menci.com/> ),
- EnsoMOSAIC (MosaicMill, <http://www.mosaicmill.com/> ),
- VisualSFM + CMVS (odprtokodna rešitev, <http://ccwu.me/vsfm/>; <http://www.di.ens.fr/cmvs/>).«

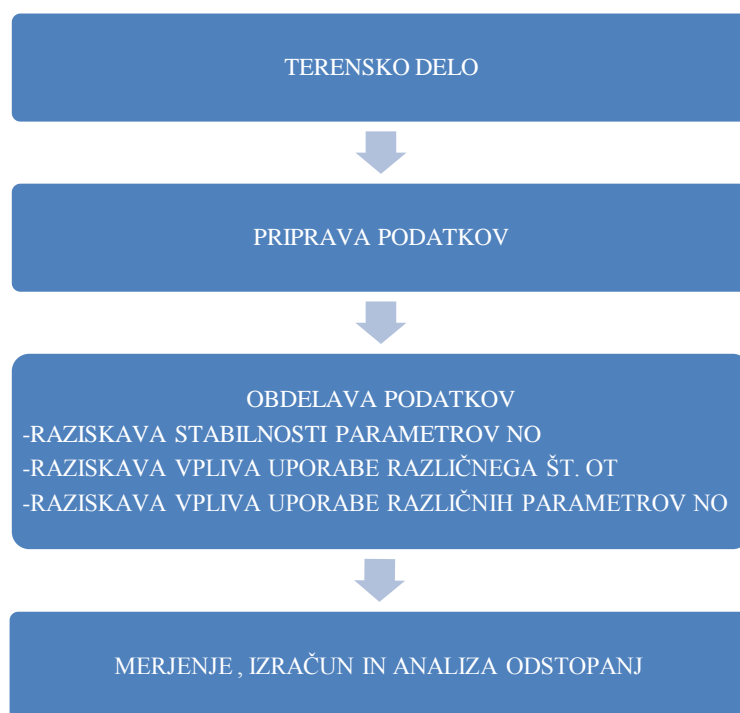
### 3.3 Ostala oprema in programsko orodje

- Autodesk Autocad Civil 3D; program smo uporabili za meritve horizontalnega položaja KT na ortofotih in višine KT na oblakih točk.

- 
- Geos 8; s programom smo izračunali koordinate dodatnih kontrolnih točk, posnetih s klasično terensko izmero.
  - Namizni računalnik; za obdelavo podatkov smo uporabili namizni računalnik z naslednjo strojno opremo:
    - procesor Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz,
    - pomnilnik (RAM) 32 GB,
    - grafična kartica NVIDIA GeForce GTX 960.

## 4 METODOLOGIJA

V shematskem prikazu (Slika 5) so predstavljene posamezne faze raziskovalne naloge.



Slika 5: Shema poteka raziskovalne naloge

Na terenu smo zajeli podatke:

- z BLS ob treh časovnih terminih, vsakič na dveh višinah (70 m in 120 m), po predhodno pripravljenih načrtih letenja,
- s klasično terestrično polarno izmero, s katero smo pridobili podatke o položaju dodatnih KT.

Pridobljene podatke smo uredili in pripravili za nadaljnje obdelave:

- iz vseh posnetkov smo izbrali le tiste, ki prikazujejo dele kalibracijskega polja,
- izbrane posnetke smo razvrstili v 8 blokov z različno konfiguracijo, za vsak termin letenja,
- izračunali smo koordinate dodatnih KT.

V programu Agisoft Photoscan Pro smo izvedli različne obdelave za namene več raziskav:

- raziskava stabilnosti parametrov NO; primerjali smo parametre, izračunane na podlagi različnih blokov, zajetih ob treh časovnih terminih, po metodi kalibracije ob delu.

- 
- Raziskava vpliva uporabe različnega števila OT na položajno točnost izdelka; na enem bloku smo izvedli obdelave z uporabo 3, 4, 5, 10 in 20 OT. V vseh primerih smo izvedli kalibracijo ob delu.
  - Raziskava vpliva uporabe različnih parametrov NO na položajno točnost izdelka. Raziskavo smo izvedli v dveh sklopih:
    - obdelave enega bloka z uporabo več primerov fiksnih parametrov NO, izračunanih v raziskavi stabilnosti parametrov NO,
    - obdelave različnih blokov z uporabo enega primera fiksnih parametrov NO, izračunanih v raziskavi stabilnosti parametrov NO.

Merjenje, izračun in analiza odstopanj izdelkov:

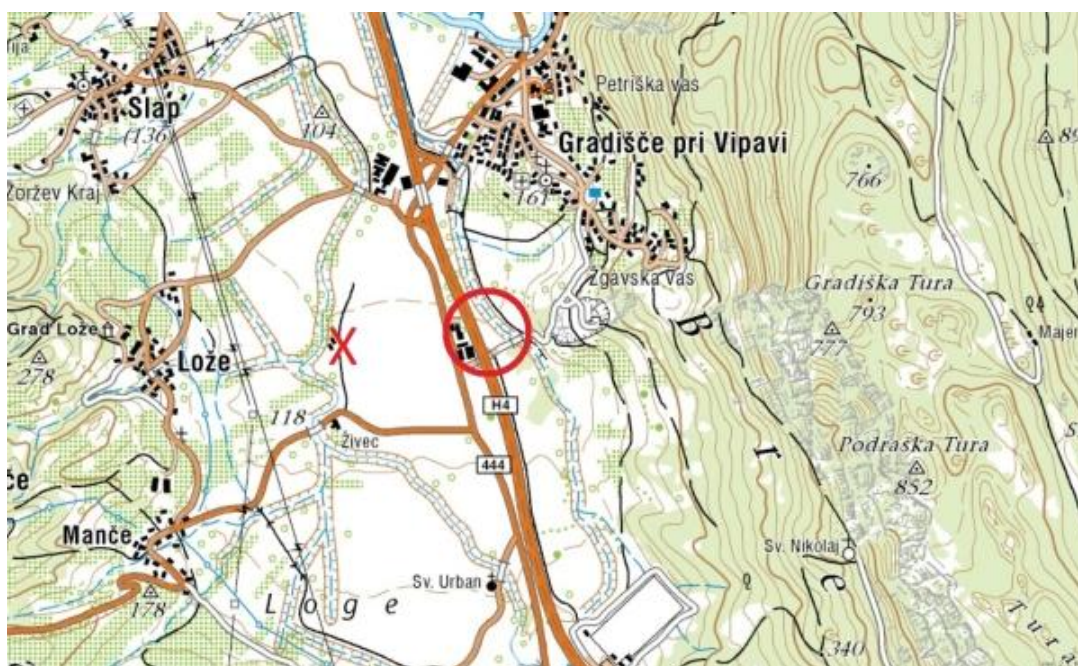
Iz koordinat kontrolnih točk, izmerjenih na terenu in na izdelkih, smo izračunali vrednosti korena srednjega horizontalnega oziroma višinskega kvadratnega pogreška. Podroben opis merjenja koordinat in izračuna odstopanj je v poglavju 7.2.1.



## 5 OPIS TESTNEGA OBMOČJA IN VZPOSTAVITEV KALIBRACIJSKEGA POLJA

### 5.1 Opis testnega območja

Za lokacijo kalibracijskega polja smo izbrali bencinski servis Petrol, ki je lociran ob hitri cesti Razdrto - Ajdovščina, v zgornji Vipavski dolini (Slika 6 - krog). Bencinski servis leži na vzhodnem robu doline. Tako ga z vzhodne strani obdajajo poraščena pobočja Gradiške Ture.



Slika 6: Geografska lega testnega polja in vzletišča (Portal Geopedia, 2016)

V ostale smeri se odpira ravninski, večinoma neporaščen prostor, izjeme so zasaditve ob vodotokih. Hitra cesta poteka ob zahodnem delu počivališča in je od njega ločena z nasipom in protivetrno ograjo. Na enak način je počivališče omejeno z jugovzhodne in vzhodne strani, severovzhodni in severni del pa omejuje ograja. Na tem delu tik za ograjo poteka servisna cesta, ob njej teče potok Močilnik, vzdolž katerega so zasajene topole. Edini ostali objekti v neposredni bližini so delavnice industrijske cone in cestna baza na zahodni strani hitre ceste. Območje počivališča sestavljata objekt bencinskega servisa in asfaltno parkirišče z obvozno potjo (Slika 7). Z južne strani vodi do počivališča servisna cesta, ki omogoča enostaven dostop za potrebe stabilizacije geodetske mreže, izvedbe terenskih meritev in signalizacije točk. Zaradi svoje oblike, velikosti in lege je počivališče primerno za vzpostavitev testnega polja.

Približno 700 metrov zahodno od počivališča se nahaja modelarsko letališče, ki je običajno v uporabi za testiranje C-ASTRAL-ovih letalnikov (Slika 6 - križ). Kot vzletišče in pristajališče je bilo uporabljeno tudi pri letih za potrebe te naloge.



Slika 7: Prikaz območja kalibracijskega polja

## 5.2 Opis in vzpostavitev kalibracijskega polja

Kalibracijsko polje predstavlja v ta namen stabilizirana geodetska mreža visoke točnosti. Vzpostavitev, izmera in izračuni koordinat geodetske mreže, so bili predmet diplomske naloge z naslovom Vzpostavitev, izmera in izračun kalibracijskega polja za kalibracijo fotoaparata (Grudnik, 2016).

V nadaljevanju so iz tega vira (Grudnik, 2016) povzete in dodatno opisane osnovne značilnosti kalibracijskega polja, ki so pomembne za naše raziskave.

**Velikost.** Polje je moralo biti primerne velikosti, da je bilo nad njim mogoče izvesti željene načrte letenja, z zadostnim številom in preklopom posnetkov. Točke so bile tako razporejene na območju, dolgem približno 180 m in širokem 70 m.

**Razporeditev in število OT.** Stabiliziranih je bilo 20 točk. Cilj je bil zagotoviti enakomerno razporeditev točk po testnem polju s takšno gostoto, da bi bilo na vsakem posnetku hkrati vidnih več točk. Oviro je predstavljal objekt bencinske črpalke, kjer jih ni bilo mogoče stabilizirati. Poleg tega je med izmero po območju potekal promet, zato je bilo nepraktično stabilizirati točke na vozne površine.

**Natančnost koordinat OT.** Točnost točk mreže je morala biti vsaj 3x boljša od možne točnosti določitve prostorskih koordinat iz posnetkov, ki jo ocenjujemo na desetinko velikosti piksla (v objektnem prostoru). Na posnetkih, zajetih z višine 70 m, to predstavlja približno milimeter. Uporabljene so bile koordinate točk mreže v koordinatnem sistemu D96/TM z elipsoidnimi višinami. Srednji pogrešek položaja je znašal 0,0001 m, srednji pogrešek višine pa od 0,0002 m do 0,0008 m (Preglednica A.1).

**Stabilizacija.** Cilj je bil zagotoviti dolgoročno in kvalitetno stabilizirano mrežo točk. Za stabilizacijo mreže so bili uporabljeni jekleni klini premera 5 cm, z luknjo premera 1mm na sredini vrhnje ploskve. S cementnim lepilom je bilo v robnike vgrajenih 19 klinov in en v asfalt.

**Vidnost, signalizacija.** Vse točke so morale biti na posnetkih dobro vidne, zato niso smele biti stabilizirane preblizu objekta. Pred vsakim letom smo s šablono in rdečim sprejem markirali vsak klin z obrobo in pravokotnima krakoma (Slika 8).



Slika 8: Primer signalizacije pri prvem terminu snemanja

Po prvem terminu snemanja smo opazili, da se srebrna površina klinov blešči. Posledično je prihajalo do slabše ostrine in zabrisanosti oslonilnih točk na posnetkih. Pri naslednjih dveh terminih snemanja smo skušali to težavo odpraviti tako, da smo na kline nalepili nalepke. Večja, črna, je pokrila celoten klin, center pa smo označili z belo, premera 1 cm, z luknjo premera 1 mm v sredini. Tako je bil center klina še vedno dobro definiran (Slika 9).



Slika 9: Primer signalizacije pri drugem in tretjem terminu snemanja

### 5.3 Terestrična izmera detajla

Da bi lahko opazovali položajna odstopanja na večjem številu KT, smo mrežo stabiliziranih točk dodatno zgostili s terensko polarno izmero. Tahimetrične podatke smo obdelali s programom Geos 8 in izračunali koordinate v koordinatnem sistemu D96/TM (Preglednica A.2).

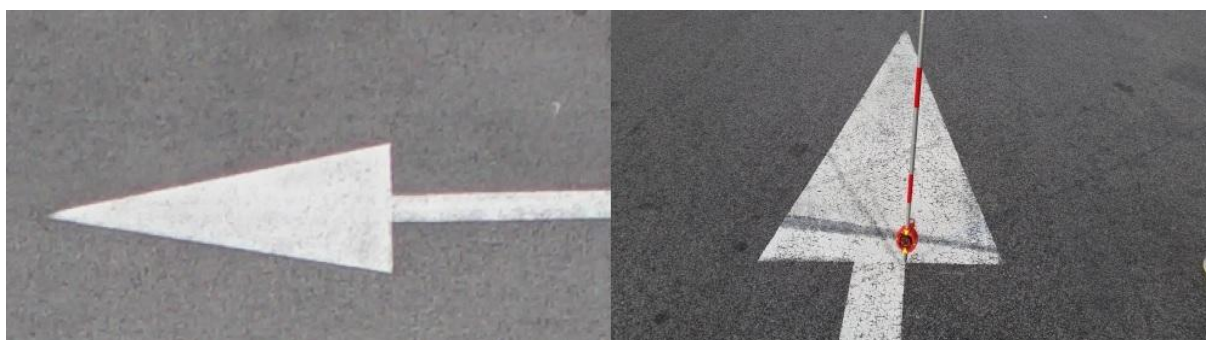
Uporabljen instrumentarij:

- tahimeter Leica Flexline TS06,
- podnožje,
- stativ,
- mini prizna GMP111-0,
- žepni merski trak.

Posneli smo 10 karakterističnih točk detajla (prikazane v modri barvi na Slika 10). Kot detajlne točke smo izbrali robove jaškov in označb na cestišču, katerih položaj je bilo mogoče nedvoumno določiti na posnetkih. Primer detajlne točke prikazuje Slika 11.



Slika 10: Prikaz položaja točk mreže (rdeče) in detajla (modro)



Slika 11: Primer posnetega detajla na aerosnetku z višine 70 m (levo) in ob terestrični izmeri (desno)

## 6 ZAJEM POSNETKOV Z LETALNIKA IN PRIPRAVA BLOKOV POSNETKOV

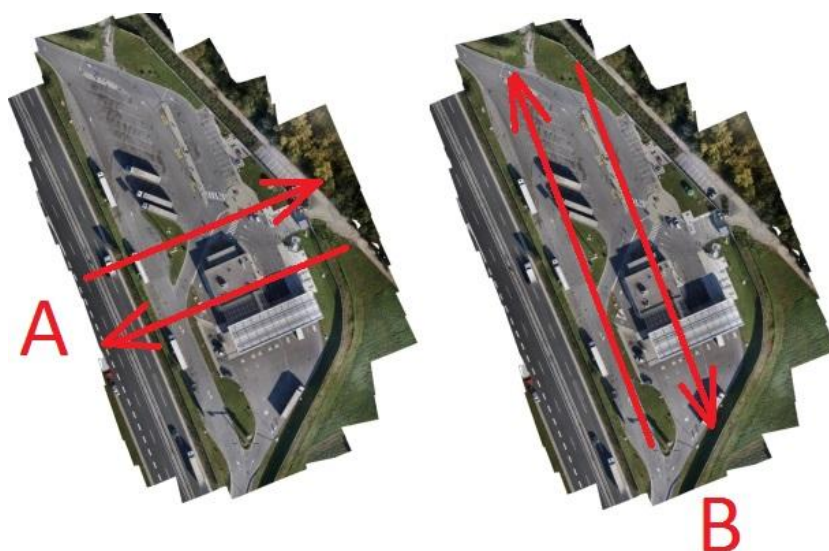
V raziskavah smo kot vhodne podatke uporabili posnetke, pridobljene z brezpilotnim letalnim sistemom, in koordinate točk kalibracijskega polja in detajla.

### 6.1 Zajem posnetkov z letalnika

Za analizo stabilnosti notranje orientacije v nekoliko daljšem časovnem obdobju smo se odločili za izvedbo meritev v treh časovnih terminih: 1. 4. 2015, 27. 10. 2015 in 27. 11. 2015. Pri načrtovanju leta smo upoštevali tri kriterije.

**Višina leta.** Odločili smo se za uporabo dveh snemalnih višin; 70 m in 120 m nad tlemi. Prostorska ločljivost posnetkov na 70 m je bila 0,95 cm, oziroma 1,16 cm na 120 m. Na teh višinah se tudi v praksi letalnik najpogosteje uporablja. Hkrati je bila 70 m spodnja meja višine letenja, kjer smo dosegli najkrajši možni časovni interval med zajemom dveh posnetkov, ob najnižji možni hitrosti letalnika. Ob izbiri nižje višine tako ne bi več dosegli zadostnega vzdolžnega preklopa med posnetki.

**Konfiguracija bloka.** Odločili smo se za uporabo oblike celovitega bloka (Honkavaara idr., 2006), sestavljenega iz posnetkov, zajetih z vzporednimi snemalnimi pasovi v dveh pravokotnih smereh; A in B (Slika 12).



Slika 12: Prikaz smeri preletov A in B

**Preklop med posnetki.** Določili smo 75% vzdolžnega in 65% prečnega preklopa med posnetki.

Pred prvim terminom snemanja smo pripravili načrta letenja; za vsako višino leta posebej, ki smo ju potem uporabili tudi za fotografiranje ob naslednjih dveh terminih. V programu GeoPilot smo določili območje zajema in pri tem označili območje kalibracijskega polja s širšo okolico (Slika 3). S tem smo zagotovili pravilne, ravne poti letenja preko zelenega območja, saj se je letalnik po obratu tako lahko pravočasno postavil na načrtano linijo. Poleg tega smo bili tako gotovi, da bo kalibracijsko polje zajeto v celoti.

### 6.1.1 Ponovitevni leti

Ob vsakem terminu snemanja smo izvedli dva ločena zaporedna leta; na 70 m in na 120 m. Po prvem pristanku smo:

- letalnik ponovno namestili na vzletni katapult,
- izpraznili spominsko kartico fotoaparata,
- v GeoPilot uvozili nov načrt letenja,
- v letalnik namestili zloženo padalo,
- preverili povezavo s terenskim računalnikom.

V preglednicah 1, 2 in 3 so podani podatki o snemanjih ob posameznih terminih.

Preglednica 1: Podatki o prvem terminu snemanja, dne 1. 4. 2015

<b>70 m</b>	<b>Ura vzleta</b>	10.30
	<b>Temperatura (°C)</b>	23
	<b>Svetlobni pogoji</b>	Delno jasno
	<b>Hitrost vetra (m/s)</b>	1-2
	<b>Število posnetkov smer</b>	883
<b>120 m</b>	<b>Ura vzleta</b>	14.40
	<b>Temperatura (°C)</b>	27
	<b>Svetlobni pogoji</b>	Delno jasno
	<b>Hitrost vetra (m/s)</b>	1-2
	<b>Število zajetih posnetkov</b>	289

Preglednica 2: Podatki o drugem terminu snemanja, dne 27. 10. 2015

<b>70 m</b>	<b>Ura vzleta</b>	9.15
	<b>Temperatura (°C)</b>	13
	<b>Svetlobni pogoji</b>	Jasno
	<b>Hitrost vetra (m/s)</b>	1-2
	<b>Število zajetih posnetkov</b>	953
<b>120 m</b>	<b>Ura vzleta</b>	10.05
	<b>Temperatura (°C)</b>	17
	<b>Svetlobni pogoji</b>	jasno
	<b>Hitrost vetra (m/s)</b>	1-2
	<b>Število zajetih posnetkov</b>	538

Preglednica 3: Podatki o tretjem terminu snemanja, dne 27. 11. 2015

<b>70 m</b>	<b>Ura vzleta</b>	9.30
	<b>Temperatura (°C)</b>	12
	<b>Svetlobni pogoji</b>	Jasno
	<b>Hitrost vetra (m/s)</b>	0.5
	<b>Število zajetih posnetkov</b>	909
<b>120 m</b>	<b>Ura vzleta</b>	10.20
	<b>Temperatura (°C)</b>	14
	<b>Svetlobni pogoji</b>	Jasno
	<b>Hitrost vetra (m/s)</b>	1-2
	<b>Število zajetih posnetkov</b>	545

Nizka teža letalnika pomeni večjo dovzetnost le tega za rahle spremembe v hitrosti vetra. Posledično se hitrost letenja rahlo spreminja, časovni interval med zajemom dveh posnetkov pa ostaja enak. Rezultat tega je različno število zajetih posnetkov ob posameznih terminih, kljub uporabi istih načrtov letenja.

Pri prvem terminu smo pri letu na 120 m dobili manjše število posnetkov kot smo pričakovali. Naknadno smo ugotovili, da je ob načrtovanju leta prišlo do napake. Interval proženja kamere ni bil pravilno usklajen s hitrostjo letalnika. Tako je bil vzdolžni preklap pri vseh posnetkih manjši od načrtovanega. Poleg tega snemalni pas v smeri A izven območja testnega polja ni bil zajet. Napaki smo opravili in pri naslednjih dveh terminih nista bili prisotni.

## 6.2 Izbor posnetkov

Rezultat zajema širšega območja je bilo veliko število odvečnih posnetkov, ki smo jih morali izločiti iz nadaljnjih obdelav. Za posnetke, zajete ob vsakem od treh terminov, smo naredili izbor v smereh A in B za vsako višino leta. Število posnetkov in vzporednih snemalnih pasov v posameznih izborih je



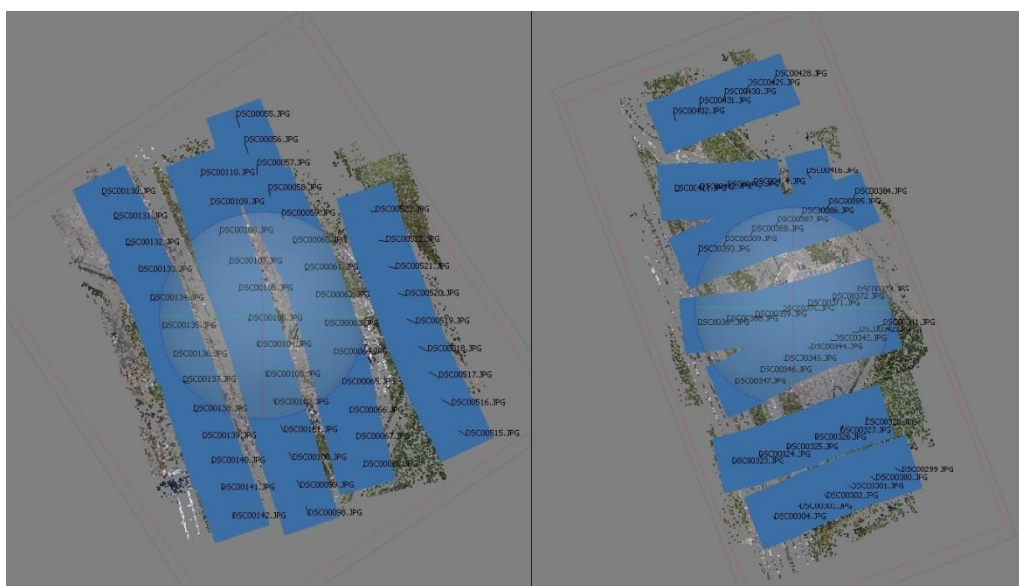
podano v preglednici 4. Kriterij, ki smo ga pri tem upoštevali, je bil vidnost vsake točke mreže na vsaj dveh posnetkih.

Preglednica 4: Število izbranih posnetkov za nadaljnje obdelave

Termin snemanja	Prvi termin				Drugi termin				Tretji termin			
Smer letenja	70A	70B	120A	120B	70A	70B	120A	120B	70A	70B	120A	120 B
Število posnetkov	76	65	36	26	65	53	49	45	52	61	45	38
Število snemalnih pasov	5	11	4	6	5	10	4	7	4	11	4	7

Zaradi vpliva vetra je prihajalo do rahlih variacij med potmi letenja in orientacijami posnetkov, posledično se je zajeto območje ob posameznih preletih rahlo razlikovalo. Zato, ob upoštevanju zgoraj navedenega pogoja, število izbranih posnetkov ni enako pri izboru za vsako smer letenja ob posameznih terminih.

Naše testno polje ni bilo idealne kvadratne oblike, da bi ga lahko zajeli z enakim številom snemalnih pasov enake dolžine v obeh pravokotnih smereh. Zato smo oblike blokov prilagodili obliki in velikosti testnega polja (Slika 13). S tem smo se skušali izogibati uporabi posnetkov, zajetih nad krošnjami dreves in poljem, kjer ni bilo oslonilnih oziroma kontrolnih točk.



Slika 13: Snemalni pasovi smeri A in B na primeru 2\_120 (prikaz iz programa Agisoft Photoscan Pro)

### 6.3 Sestava blokov posnetkov

Definirali smo sistem poimenovanja blokov in parametrov NO fotoaparata, pridobljenih na njihovi osnovi.

Primer: 1\_70AB

- številka 1 pomeni zajem ob prvem terminu snemanja,
- število 70 predstavlja višino letenja ob zajemu,
- črki AB pomenita, da blok vsebuje posnetke zajete v smereh A in B.

Poimenovanje parametrov sledi istim pravilom, le da se imena začnejo s črko p.

Primer: p\_1\_70AB

Izbrane posnetke (poglavje 6.2) smo uporabili za sestavo blokov, na katerih smo v nadaljevanju naloge izvajali obdelave. Iz posnetkov vsakega od treh terminov snemanja, v nadaljevanju predstavljenih s črko »i«, smo pripravili po 8 blokov:

- bloki sestavljeni iz posnetkov posameznih izborov (i\_70A, i\_70B, i\_120A, i\_120B),
- bloka vseh izbranih posnetkov za obe višini zajema (i\_70AB, i\_120AB),
- blok posnetkov iz izborov na dveh višinah (i\_70A\_120B),
- blok vseh izbranih posnetkov (i\_70AB\_120AB).

## 7 OBDELAVA PODATKOV, REZULTATI IN ANALIZE

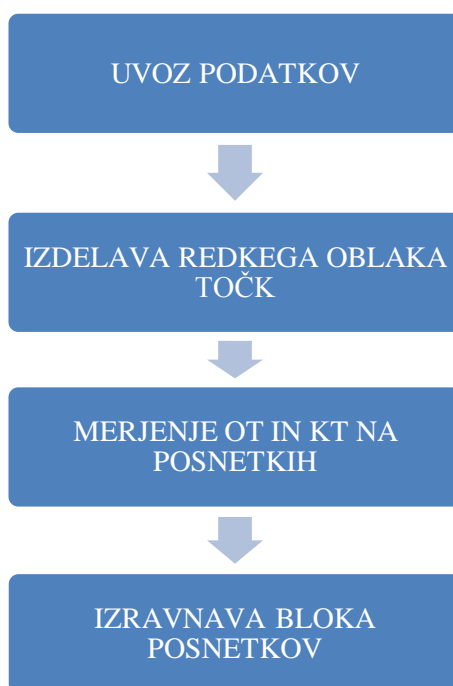
Vse obdelave v nadaljevanju naloge smo izvajali v programskem orodju Agisoft Photoscan Pro. Pri postopkih in njihovih opisih smo izhajali iz virov:

- splošna navodila za uporabo programa (Agisoft, 2016a),
- vodnik za izdelavo ortofota in digitalnega modela površja (DMP) (Agisoft, 2016b).

### 7.1 Raziskava stabilnosti parametrov notranje orientacije

Za vsakega izmed osmih blokov, opisanih v poglavju 6.3, za vse tri časovne termine, smo izračunali parametre notranje orientacije fotoaparata po metodi kalibracije ob delu.

V nadaljevanju so podrobneje predstavljeni postopki obdelave, prikazani na sliki 14.

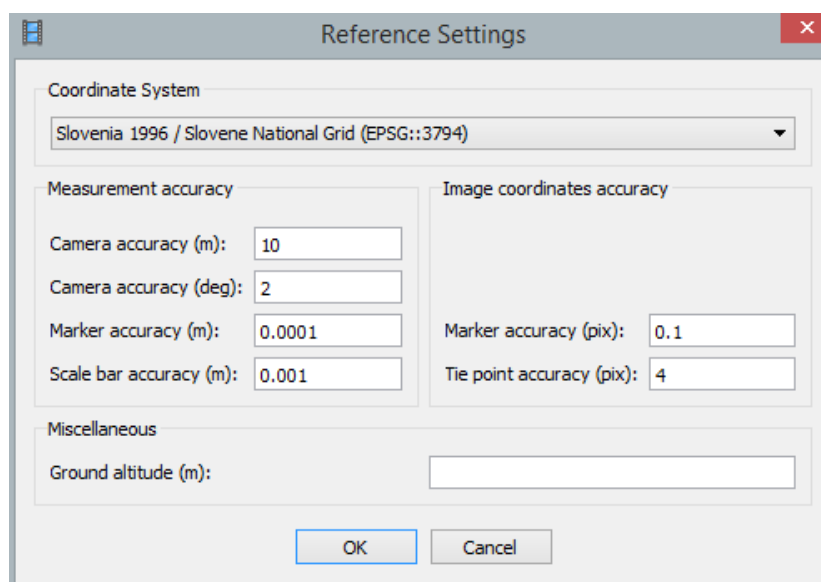


Slika 14: Shema postopka izračuna parametrov NO

#### Uvoz podatkov

Za vsak blok smo v program najprej uvozili izbrane posnetke. Možen je tudi uvoz koordinat projekcijskih centrov posnetkov ob času proženja v zelenem koordinatnem sistemu. Ta podatek vpliva zgolj na hitrost določanja veznih točk med posnetki in na končne rezultate nima vpliva. Zato smo zaradi poenostavitve dela ta korak izpustili.

V pogovornem oknu *Reference Settings* (Slika 15) smo izbrali koordinatni sistem Slovenia 1996 / Slovene national grid (EPSG:: 3794). V razdelku *Measurement accuracy* smo nastavili točnost koordinat oslonilnih točk (*Marker accuracy*) na 0,0001 m. Ostali parametri v tem razdelku na naše podatke niso imeli vpliva in jih nismo spreminjali. V razdelku *Image coordinates accuracy* smo nastavili natančnost merjenja pikselskih koordinat (*Marker accuracy*) na 0,1 piksla, kar v praksi predstavlja približno 1 mm na posnetkih z višine 70 m in 1,6 mm na posnetkih z višine 120 m. Natančnost veznih točk (*Tie point accuracy*) smo nastavili na 4 piksele. Gre za konzervativno a-priori oceno natančnosti, ki ni odvisna od posameznega projekta. Namen je določiti večjo utež oslonilnim točkam v postopku izravnave bloka in izračunu parametrov notranje in zunanje orientacije fotoaparata (Agisoft, 2016d).

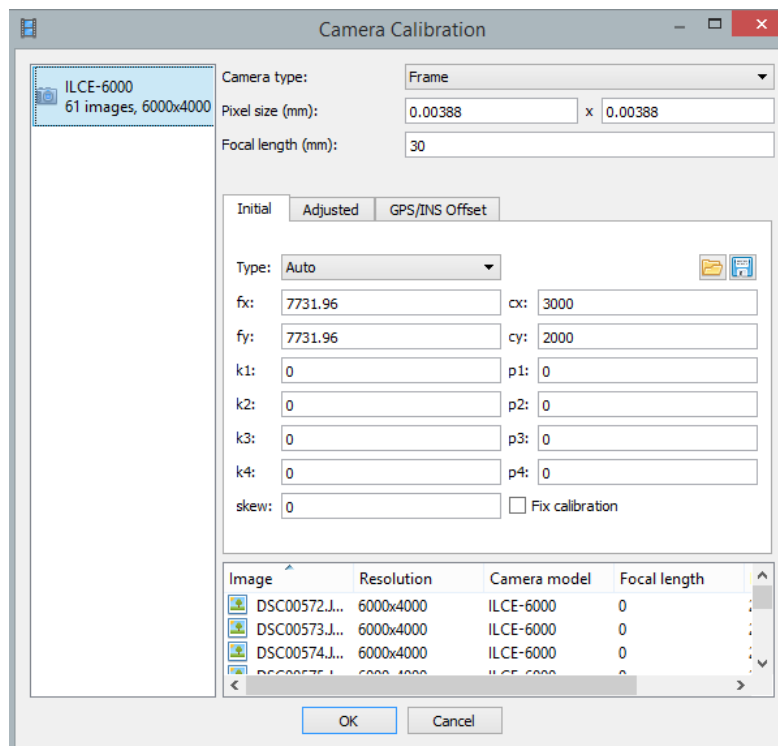


Slika 15: Pogovorno okno *Rereference Settings*

Nato smo v pogovornem oknu *Camera calibration* (Slika 16) določili:

- vrsto uporabljenega objektiva (*Camera type*); v našem primeru je bil uporabljen običajen fotografski objektiv (*Frame*),
- velikost piksla senzorja v milimetrih (*Pixel size*); 0,00388 mm,
- goriščno razdaljo (*Focal leinght*): 30 mm.

Podatke o velikosti piksla, ki naj bi bil kvadratne oblike, in goriščni razdalji nam je posredovalo podjetje C-ASTRAL. Na podlagi vnesenih podatkov se avtomatično izračunajo začetne vrednosti goriščne razdalje in glavne točke v piksljih.



Slika 16: Pogovorno okno *Camera Calibration*

### Izdelava redkega oblaka točk

V tem postopku program izračuna približne vrednosti notranjih in zunanjih parametrov orientacije fotoaparata. Izračun se izvede na podlagi slikovnega ujemanja izmerjenih veznih točk na prekrivajočih se posnetkih. Na izračunane vrednosti vpliva več dejavnikov, kot so velikost preklopa med posnetki in oblika zajetega območja, ki lahko privedejo do nelinearnih deformacij (Agisoft, 2016a). Rezultat postopka je redek oblak točk (angl. Sparse point cloud).

V pogovornem oknu *Align Photos* smo zbrali najvišjo natančnost obdelave (*Accuracy: Highest*) in generični način izbiranja stereoparov (*Pair preselection: Generic*). Število stičnih točk smo nastavili (*Key point Limit*) na 40000, veznih točk pa (*Tie point limit*) na 10000.

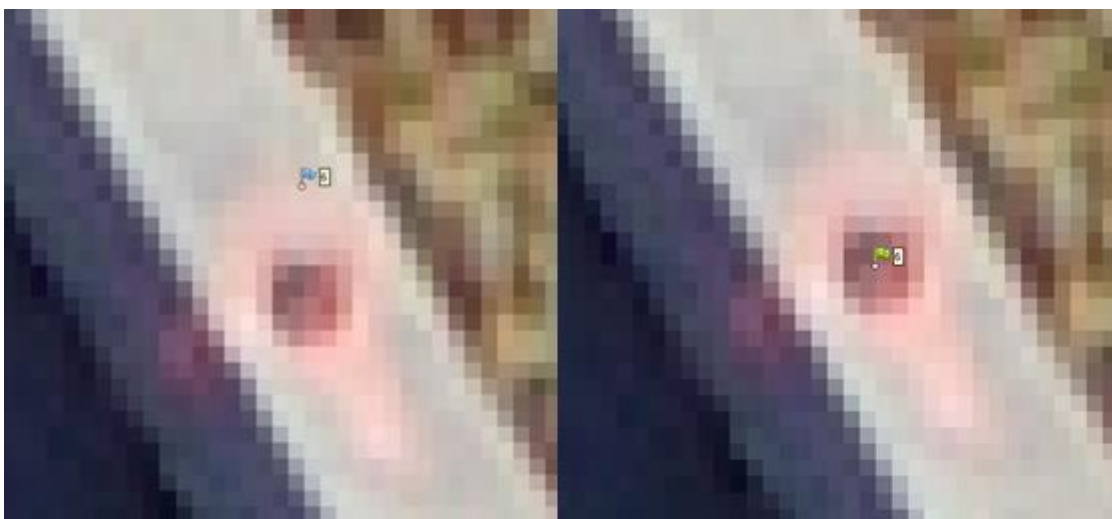
V redkem oblaku je po izdelavi prisoten šum. Gre za točke, ki ne pripadajo površju, zato smo jih ročno označili in odstranili.

### Merjenje OT in KT na posnetkih

Program omogoča hitrejšo vodeno pozicioniranje oslonilnih oziroma kontrolnih točk, za kar je potrebna predhodna izdelava redkega oblaka točk, in na podlagi tega izdelava digitalnega modela

površja (DMP) v obliki nepravilne trikotniške mreže TIN. Na posnetkih smo najprej poiskali vseh 20 signaliziranih točk in jih označili z zastavico (angl. Marker). Program je avtomatsko postavil zastavico na približno enak položaj na vseh posnetkih v bloku (Slika 17 -levo). Ker ti položaji niso točni, smo položaj vsake zastavice ročno popravili. Ob tem se je ta iz modre obarvala v zeleno barvo (Slika 17 -desno). V kolikor, zaradi ovir (tovornjaki, drogovi javne razsvetljave), točka na posnetku ni bila vidna, njen približen položaj pa avtomatsko vseeno določen, smo jo izločili iz nadaljnje obdelave. Opazili smo, da je prihajalo do največjih napak pri avtomatsko določenem položaju tistih točk, ki so bile v bližini ovir (tovornjaki, drogovi). Naleteli smo na nekaj posnetkov, na katerih nismo mogli nedvoumno izmeriti položajev točk zaradi slabe ostrine. Vzrok so bili slabši svetlobni pogoji in posledično daljši čas ekspozicije pri teh posnetkih. Zaradi premikanja letalnika med letom to pomeni slabšo ostrino zajetih posnetkov. Te posnetke smo iz nadaljnje obdelave izločili.

Ko so bile vse signalizirane točke izmerjene, smo uvozili njihove objektne koordinate v pripravljeno \*.txt datoteki in izbrali ustrezen koordinatni sistem. Podatke o pikseljskih koordinatah signaliziranih točk (OT in KT), smo za vsak blok izvozili v obliki \*.xml datoteke.

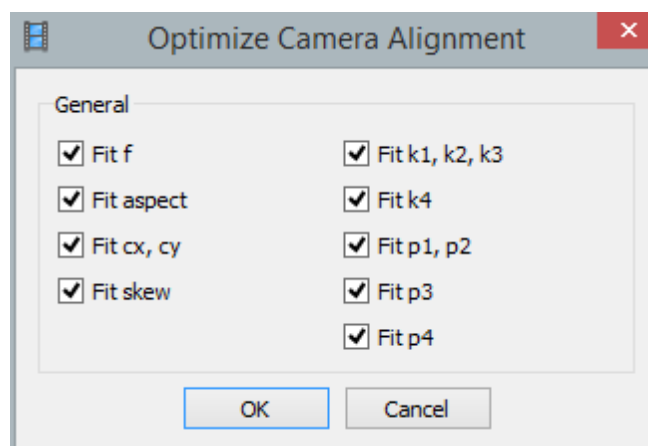


Slika 17: Položaj zastavice po avtomatskem pozicioniranju (levo) in ročno popravljen položaj (desno)

### **Izravnavna bloka posnetkov**

Z izmerjenimi vsemi oslonilnimi točkami smo, na podlagi teh, blok georeferencirali in izravnali. Pri tem smo lahko izbrali, katere točke naj služijo kot oslonilne in katere kot kontrolne. Ker nam je bil v tej fazi raziskave cilj določiti kar najboljše parametre notranje orientacije, smo v izravnave vključili vseh 20 točk.

V pogovornem oknu *Optimize camera allignement* (Slika 18) lahko izberemo, kateri parametri notranje orientacije fotoaparata so vključeni v izravnavo. V našem primeru smo označili vse možnosti.



Slika 18: Pogovorno okno *Optimize Camera Alignment*

»V postopku georeferenciranja se medsebojno povezani model posnetkov in njihovih slikovnih parov transformira v referenčni koordinatni sistem z uporabo podobnostne sedem parametrične prostorske transformacije (3 parametri translacije, 3 parametri rotacije in 1 parameter merila). Ker je ta transformacija podobnostna, ne omogoča odprave morebitnih nelinearnih pogreškov.« (Žorž, 2015, str. 13)

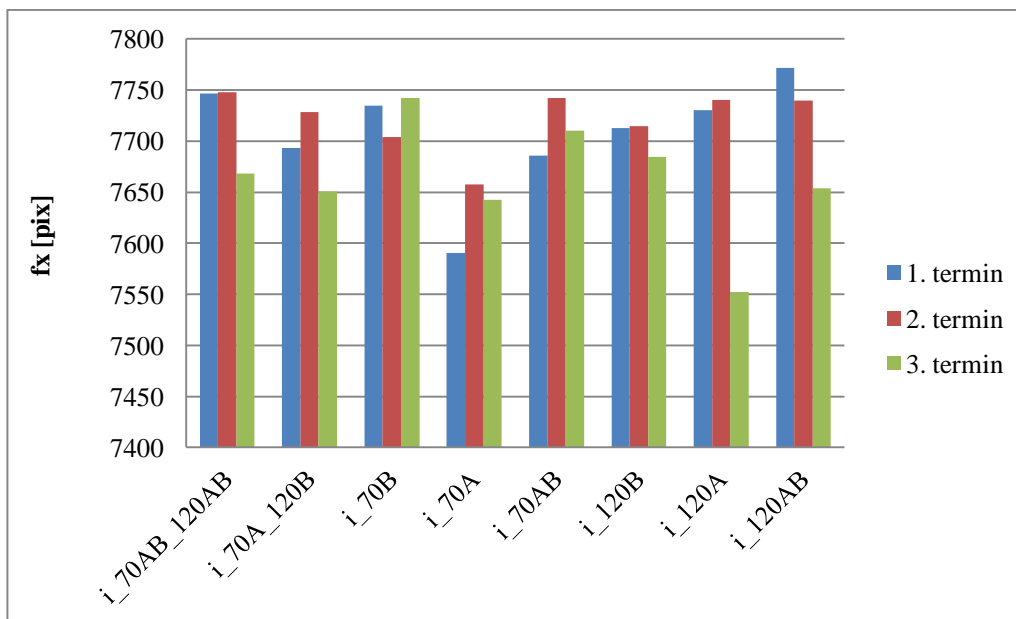
Nelinearni pogreški se odpravijo s postopkom izravnave bloka. Ob tem se preračunajo parametri notranje in zunanje orientacije fotoaparata (Agisoft, 2016a).

Za vsak obdelan blok smo izračunane parametre NO izvozili v obliki \*.xml datoteke.

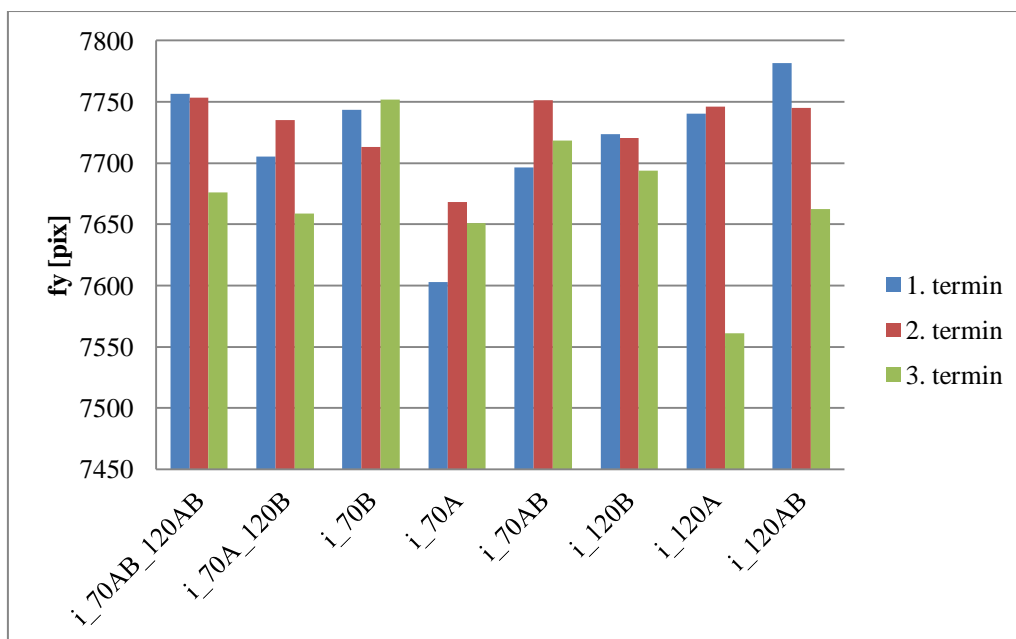
### 7.1.1 Rezultati in analize

V tem poglavju smo analizirali stabilnost parametrov NO. Vsak grafikon opisuje spreminjanje enega parametra, izračunanega z različnimi bloki posnetkov, ob treh časovnih terminih. Skupine parametrov, omenjene v nadaljevanju poglavja, predstavljajo po tri vrednosti parametra, pridobljene na osnovi enakega bloka, zajetega ob treh časovnih terminih.

Numerični podatki so podani v prilogi B.



Grafikon 1: Vrednosti goriščne razdalje v smeri osi x

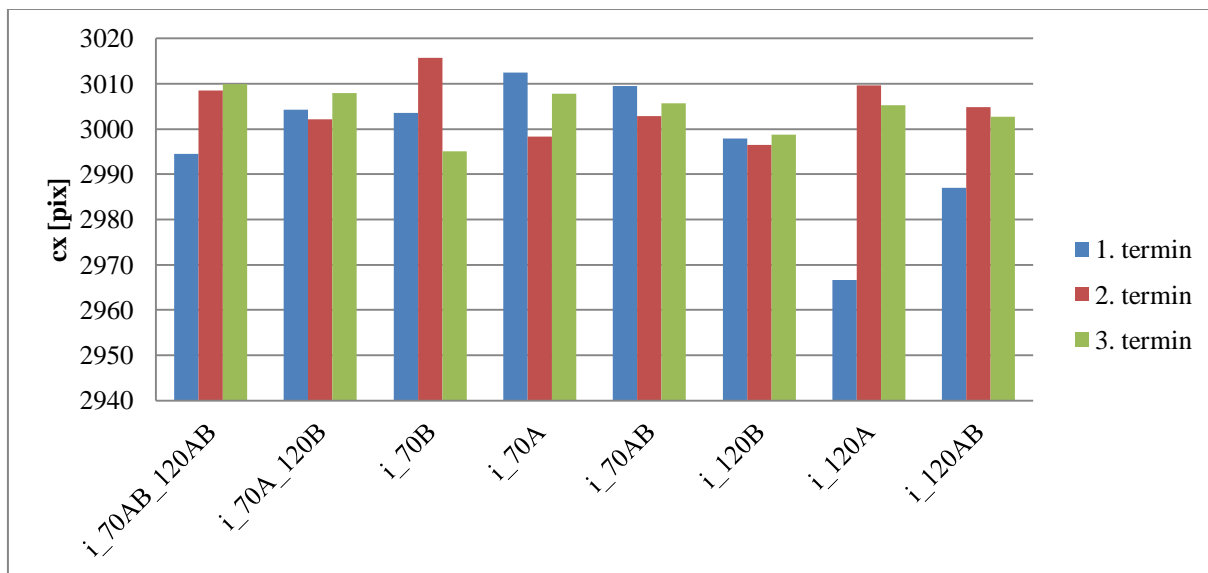


Grafikon 2: Vrednosti goriščne razdalje v smeri osi y

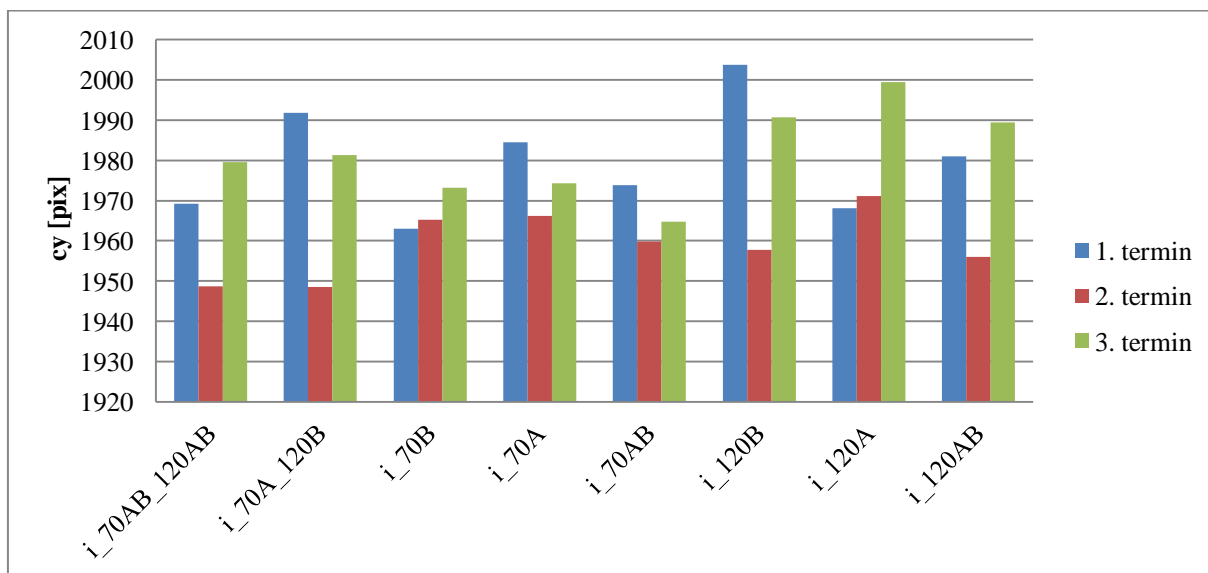
Grafikona 1 in 2 prikazujeta vrednosti goriščne razdalje v smeri osi x oziroma y slikovnega koordinatnega sistema ( $f_x$ ,  $f_y$ ). Začetna vrednost v obeh smereh znaša 7731,96 piksla. Razlike med vrednostmi  $f_x$  in  $f_y$ , izračunanima na istih blokih določenega termina, znašajo v povprečju okrog 10 pikslov. Razlika je posledica neenotnega merila vzdolž obeh koordinatnih osi, ki je lahko posledica ne-kvadratnih pikslov.



Ob primerjavi vrednosti parametrov znotraj skupin parametrov ni opaznih vzorcev, ki bi nakazovali na ohranjanje stabilnosti vrednosti goriščne razdalje. Rezultati nakazujejo na spreminjanje vrednosti tako med posameznimi termini, kot znotraj njih. V primeru rezultatov, pridobljenih na podlagi bloka 3\_120A, je opazno večje odstopanje vrednosti goriščne razdalje kot v ostalih primerih.



Grafikon 3: Položaj glavne točke v x-smeri

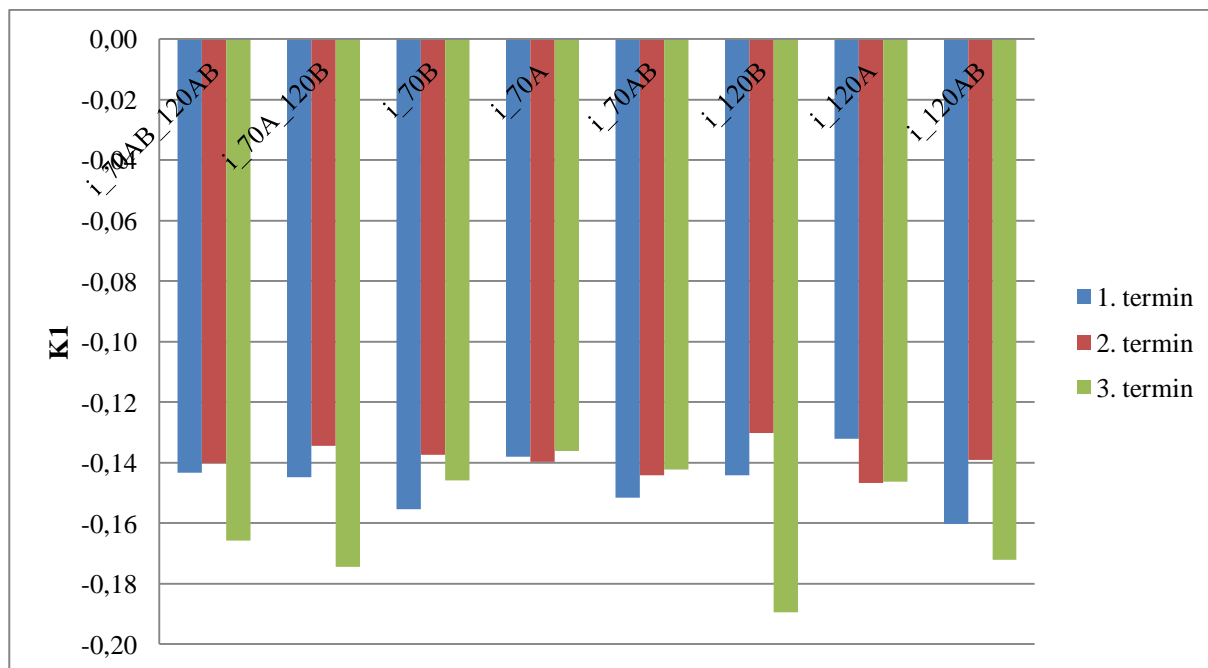


Grafikon 4: Položaj glavne točke v y-smeri

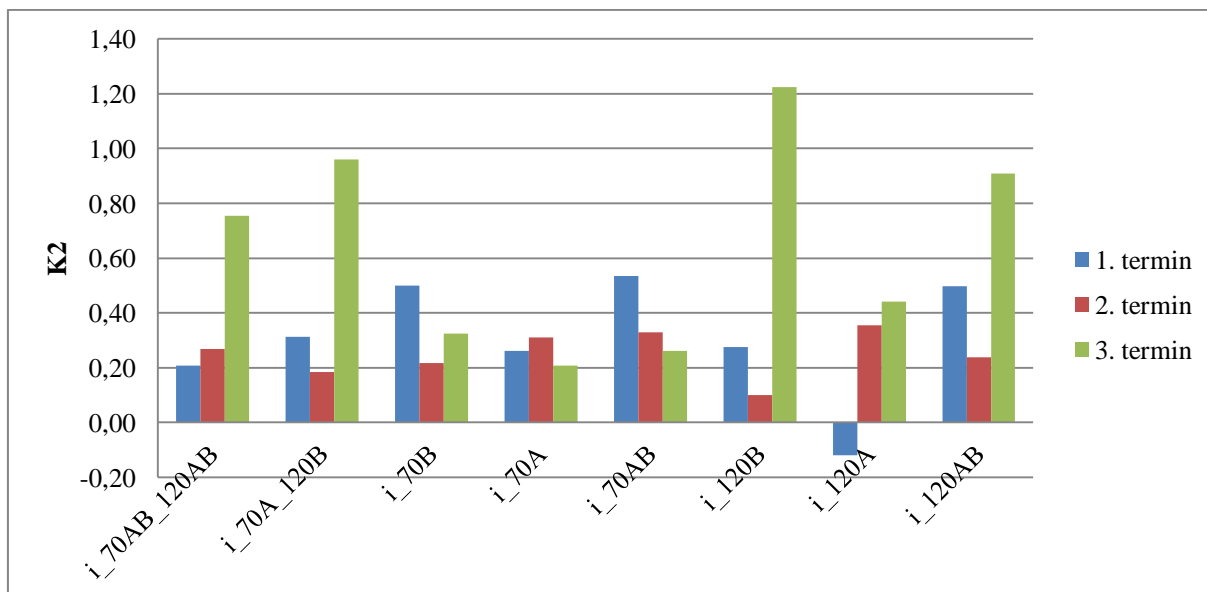
V grafikonih 3 in 4 so prikazane vrednosti položaja glavne točke v smeri osi x oziroma y slikovnega koordinatnega sistema ( $c_x$ ,  $c_y$ ). Začetna vrednost komponente  $c_x$  je znašala 3000 pikslov, komponente  $c_y$  pa 2000 pikslov. Ob primerjavi vrednosti med skupinami parametrov je opazen ponavljajoč vzorec,

značilno prikazan na primeru rezultatov skupine  $i_{70A}$ . V tej skupini vrednosti  $c_x$  in  $c_y$  najbolj odstopajo od začetne vrednosti pri rezultatih iz drugega termina, sledijo rezultati tretjega, najmanj pa odstopajo rezultati prvega termina. Absolutne vrednosti se med skupinami spreminjajo, razmerja znotraj skupin pa so v večini primerov podobna kot v skupini  $i_{70A}$ . Opazne so razlike med vrednostmi, pridobljenimi na podlagi različnih blokov iz istih terminov snemanja. Predvidevamo, da je to posledica različne konfiguracije blokov in zunanjih vplivov. Pri rezultatih, ki so pridobljeni na podlagi blokov sestavljenih iz posnetkov zajetih z višine 120 m, so opazne večje razlike znotraj skupin.

Ponavljajoč vzorec razlik med parametri znotraj skupin lahko pripišemo spreminjanju parametra med posameznimi termini. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da se je položaj glavne točke med letom ohranja, na daljši rok pa ne.



Grafikon 5: Vrednosti koeficienta radialne distorzije  $K1$

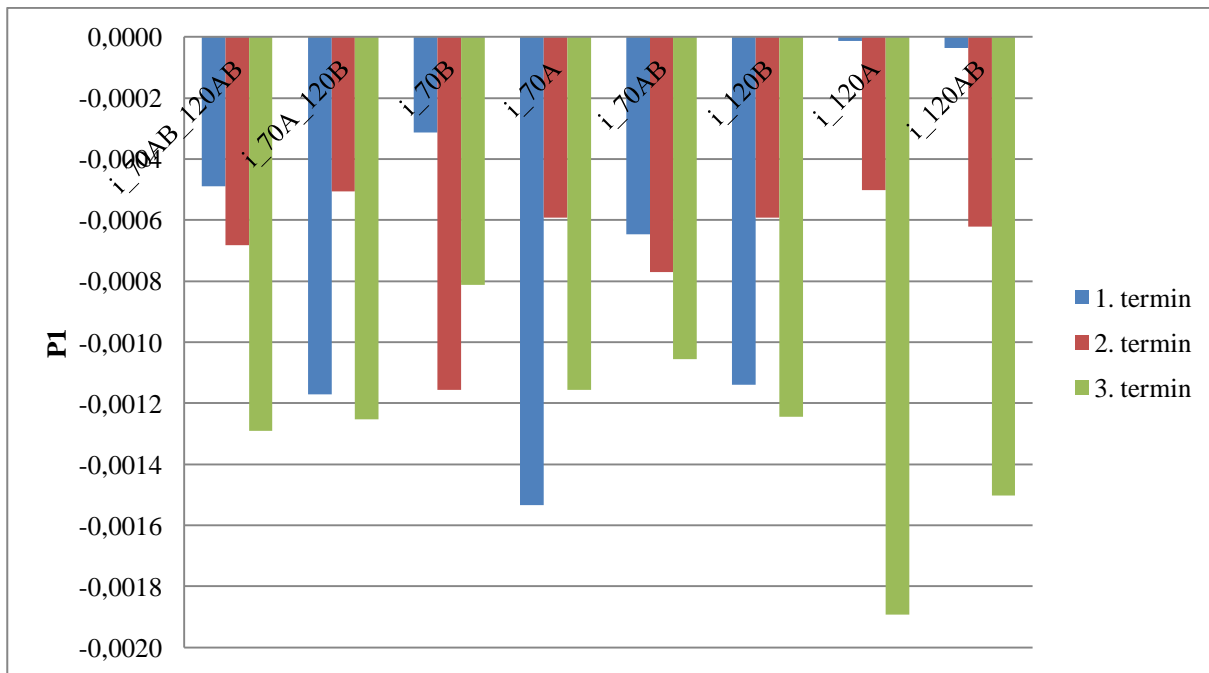


Grafikon 6: Vrednosti koeficienta radialne distorzije K2

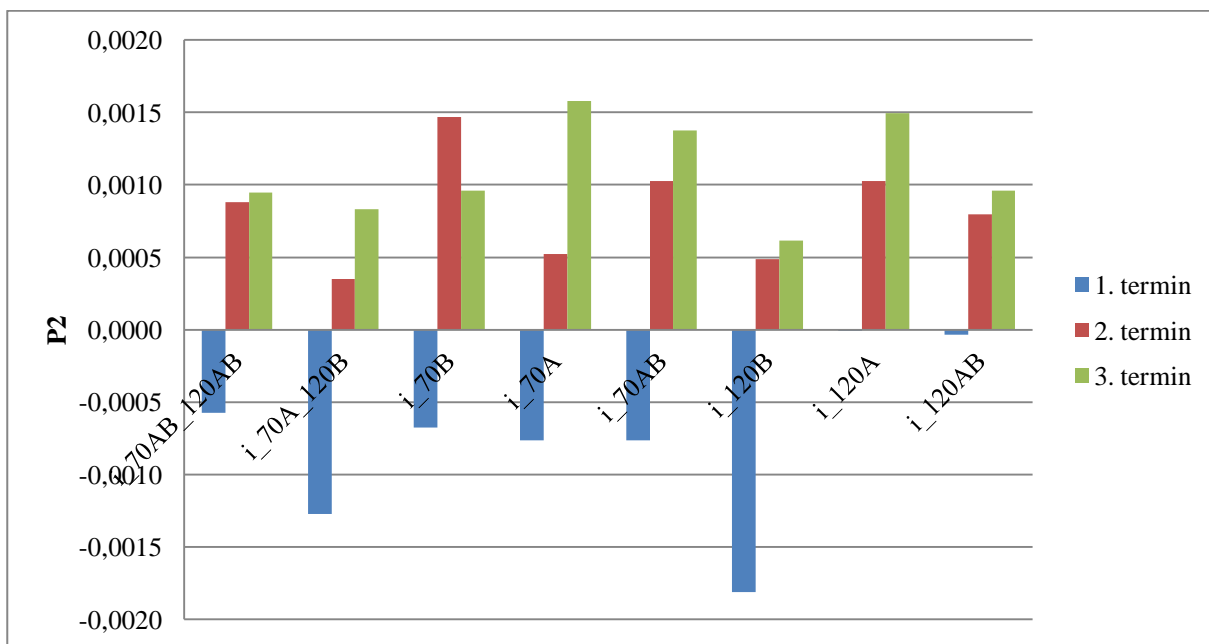
V grafikonih 5 in 6 so prikazane vrednosti koeficientov radialne distorzije K1 in K2. Razmerja med in znotraj skupin so primerljiva z že opaženimi pri rezultatih vrednosti položaja glavne točke, kar je posledica velike korelacije med parametroma. To lahko privede do kompenziranja pogreškov enega parametra z drugim, kar ima lahko za posledico nerealne rezultate kalibracije (Tang, 2013).

Opazne so večje vrednosti koeficientov, pridobljenih na osnovi blokov, v katere so bili vključeni posnetki, zajeti z višine 120 m v smeri B, ob tretjem terminu snemanja. Razlike so izrazitejše pri rezultatih koeficienta K2. Podobne razlike so opazne tudi pri parametru  $c_y$ . Ob omenjenem zajemu so bili svetlobni pogoji spremenljivi (oblačnost), kar je botrovalo večjemu številu posnetkov slabše ostrine, na katerih je bilo težje nedvoumno izmeriti točen položaj oslonilnih točk.

Pri koeficientih K3 in K4 so razlike med koeficienti večje tako znotraj skupin kot med njimi. V grafikonih jih nismo prikazali in dodatno analizirali, ker imajo v praksi zanemarljiv vpliv.



Grafikon 7: Vrednosti koeficienta tangencialne distorzije P1

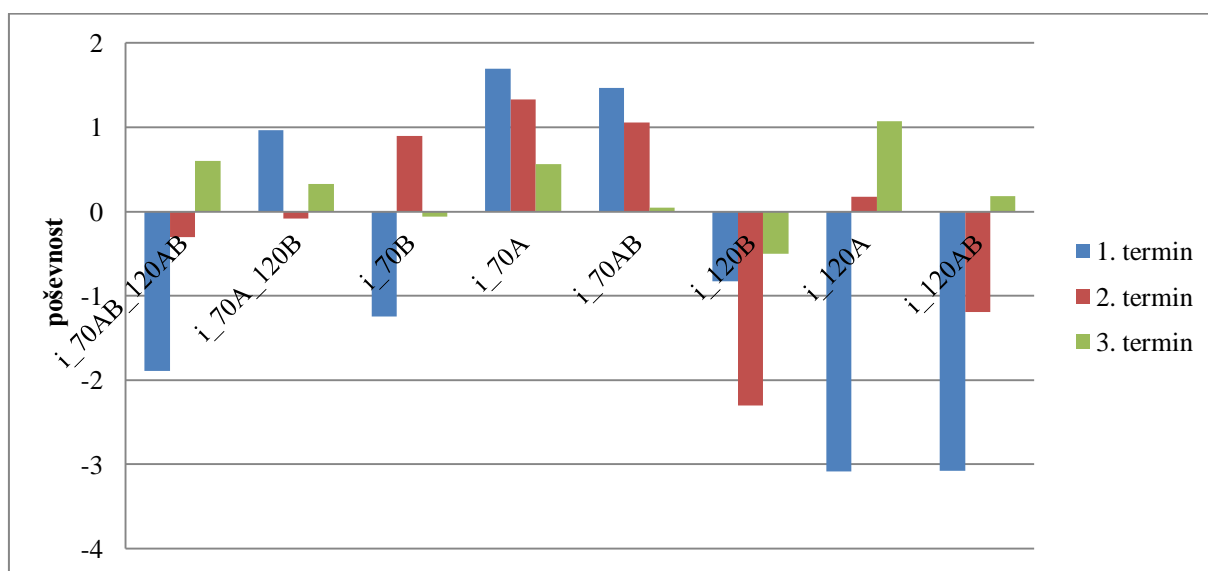


Grafikon 8: Vrednosti koeficienta tangencialne distorzije P2

V grafikonih 7 in 8 so predstavljeni rezultati koeficientov tangencialne distorzije P1 in P2. V obeh primerih je opazen že opisan vzorec podobnosti med skupinami, ki nakazuje na različne vrednosti parametrov med posameznimi termini snemanja in ohranjanje vrednosti parametrov znotraj terminov.

Izstopata vrednosti, ki sta pridobljeni na osnovi blokov 1\_120A in 1\_120AB. Sklepamo, da imajo na izstopajoče vrednosti vpliv podatki bloka 1\_120A. Izstopanje rezultatov, pridobljenih na podlagi tega bloka, se kaže tudi pri koeficientu K2 in vrednosti položaja glavne točke  $c_y$ . Ob zajemu bloka 1\_120A je bilo, v primerjavi z ostalimi bloki, zajeto večje območje, ker je letalnik rahlo zaneslo iz smeri ob preletu nad robom kalibracijskega polja. Oslonilne točke tako niso bile enakomerno razporejene po zajetem območju.

Vpliv tangencialne distorzije na kakovost končnega izdelka je majhen (Dörstel, Jacobsen, Stallmann, 2003). Koeficientov P3 in P4, ki imajo manjši vpliv zato nismo predstavili v grafikonih in dodatno analizirali.

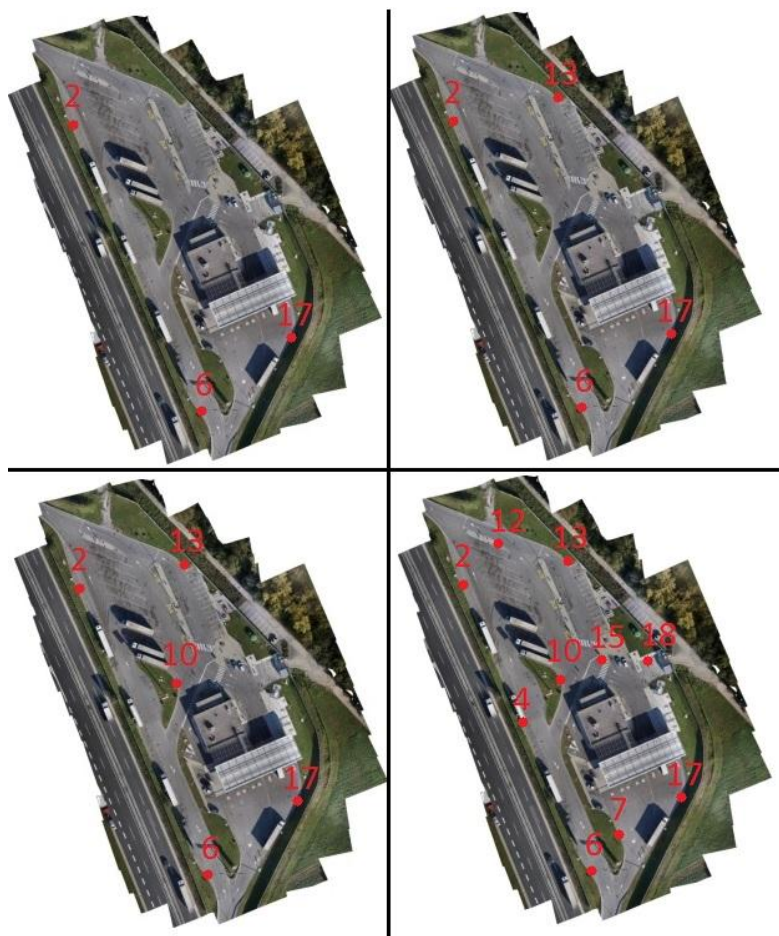


Grafikon 9: Vrednosti parametra poševnosti

Grafikon 9 prikazuje vrednosti parametra poševnosti, ki opisuje nepravokotnost osi senzorja. Vemo, da se v praksi oblika senzorja ne spreminja. Naključne razlike nastanejo zaradi uporabe tehnike ekspozicije kotalečega zaklepa in gibanja letalnika med ekspozicijo (Vautherin idr., 2016).

## 7.2 Raziskava vpliva števila oslonilnih točk na položajno točnost izdelka

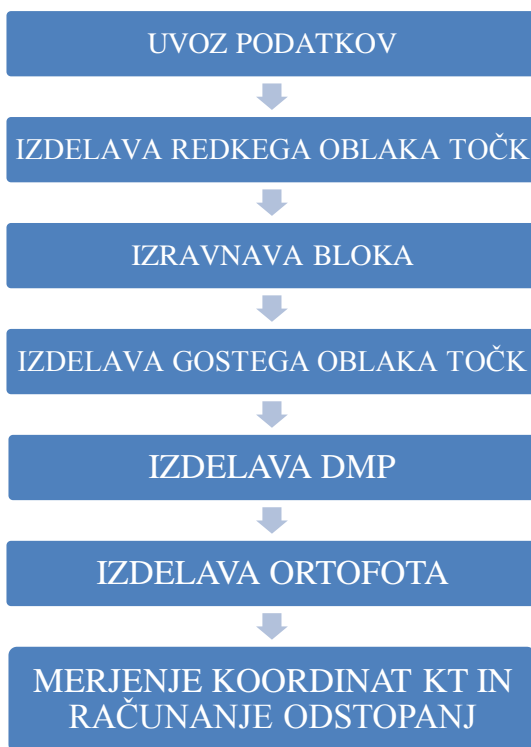
V tem delu naloge smo analizirali vpliv uporabe različnega števila OT (3, 4, 5, 10, 20), na položajno točnost izdelkov. Izbrane razporeditve OT so prikazane na sliki 19. Razporeditev 20-ih OT prikazuje slika 10 v rdeči barvi.



Slika 19: Prikaz izbranih razporeditev OT

Na podlagi izbranega števila OT je bila v vsakem od petih primerov izvedena izravnava bloka posnetkov in s tem kalibracija ob delu. Za testiranje smo izbrali blok 2\_70A zaradi primernih svetlobnih in vetrovnih pogojev med zajemom. Tako imajo posnetki, zajeti v idealnih ravnih pasovih, enakomeren preklap in primerno ostrino. S tem smo se želeli izogniti prevelikemu vplivu zunanjih dejavnikov na kakovost izdelka.

Prvi trije koraki obdelave, predstavljeni v shemi (Slika 20), so podrobneje opisani v poglavju 7.1. Metoda merjenja odstopanj je predstavljena v poglavju 7.2.1, pri ostalih korakih smo sledili navodilom (Agisoft, 2016b).



Slika 20: Shema postopka obdelave podatkov

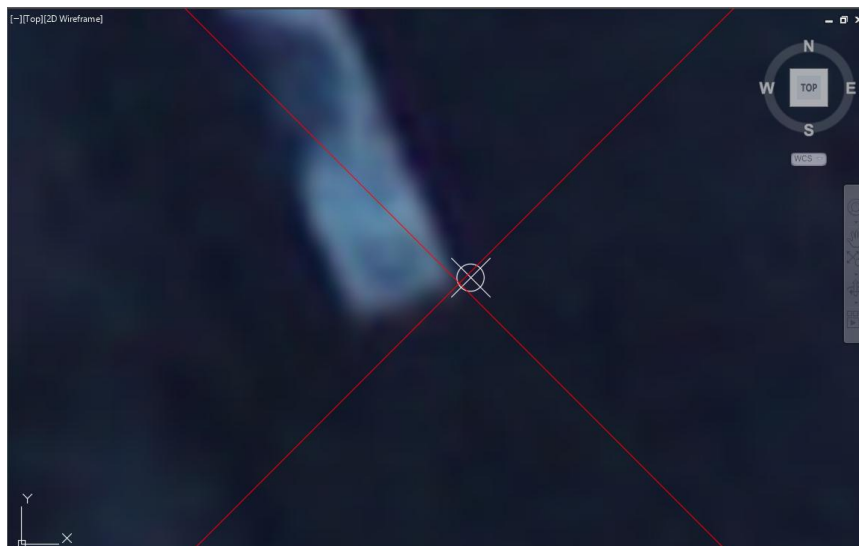
Ob uvozu smo poleg podatkov, opisanih v poglavju 7.1, vnesli tudi pikselske koordinate točk mreže, zapisane v datoteki \*.xml, pripravljene v omenjenem poglavju. Ob izdelavi gostega oblaka smo izbrali drugo največjo stopnjo gostote točk (*High*). Tako izdelan oblak točk je bil primeren za merjenje višin KT (točke mreže, ki niso bile uporabljene kot OT in detajlne točke), kar je opisano v poglavju 7.2.1. Ob izdelavi ortofota smo določili največjo ločljivost, ki so jo omogočali izbrani posnetki in je na posnetkih z višine 70 m je znašala 0,95 cm, na posnetkih z višine 120 m pa 1,16 cm.

### 7.2.1 Rezultati in analiza

Horizontalna in višinska odstopanja na KT kalibracijskega polja so podana v avtomatskih poročilih programa. Z namenom neodvisnega izračuna in dodatne potrditve rezultatov na večjem številu KT, smo izmerili koordinate KT (kalibracijskega polja in detajla) v programu Autocad Civil 3D. Za lažje razumevanje rezultatov, na tem mestu najprej opišemo našo metodo izmere in izračuna horizontalnih ter višinskih odstopanj:

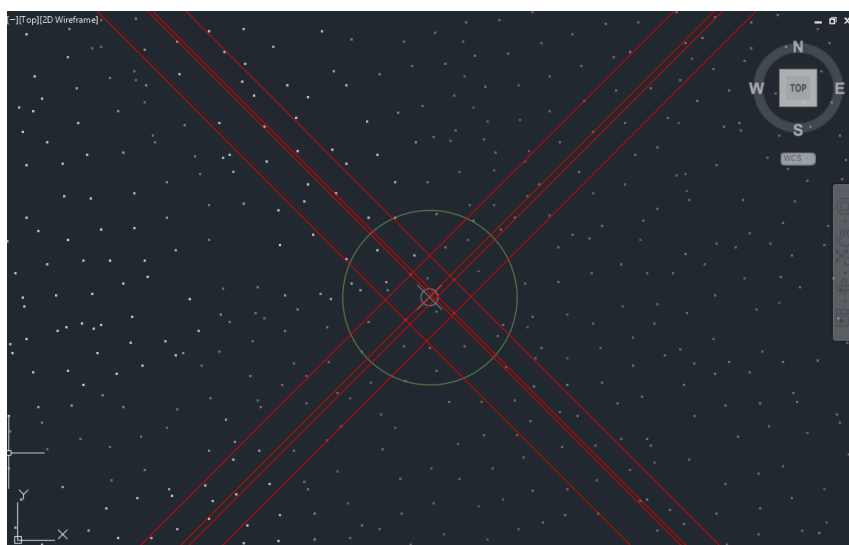
- V program Autocad Civil 3D smo uvozili:
  - koordinate točk kalibracijskega polja in posnetega detajla,
  - ortofote in oblake točk, izdelane v raziskavah vpliva št. OT in raziskavah vpliva uporabe različnih parametrov NO.

- Nadaljevali smo z merjenjem KT:
  - merjenje horizontalnega položaja na ortofotih, z digitalizacijo položajev KT (Slika 21),



Slika 21: Primer izmejenega položaja KT na ortofotu (rdeč križ) in položaja uvožene koordinate iste KT (bel križ)

- merjenje višin KT na gostih oblakih točk; okrog vsake KT smo ustvarili krog premera 10 cm, ki nam je služil kot pomoč pri identifikaciji točk. Tako smo okrog vsake KT digitalizirali položaj 4-ih točk oblaka, ki so ležale znotraj omenjenega kroga (Slika 22).



Slika 22: Primer digitalizacije točk z višinami na oblaku točk

- Digitalizirane točke smo uvozili v program Microsoft Office Excel in jih tabelarično uredili. Horizontalna odstopanja med digitaliziranimi in kontrolnimi točkami smo izračunali po



enačbi (8). Na podlagi odstopanj na vseh KT smo izračunali koren srednjega horizontalnega kvadratnega pogreška ( $RMSE_{XY}$ ) (9). Točkam, ki smo jih 4-krat digitalizirali na oblaku točk, smo najprej izračunali povprečno višinsko odstopanje za vsako kontrolno točko in na podlagi teh podatkov izračunali koren srednjega višinskega kvadratnega pogreška ( $RMSE_Z$ ) (10).

$$dXY_i = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (8)$$

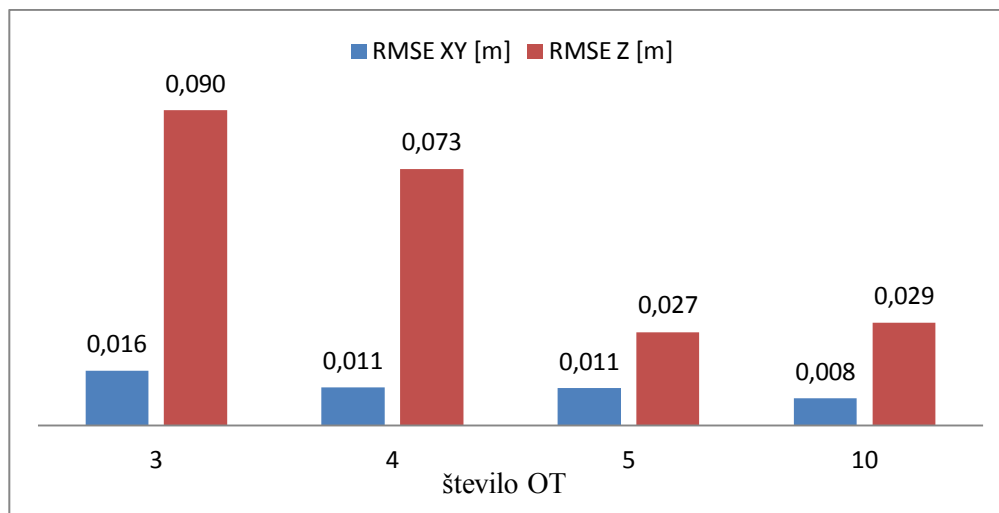
$$RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{\sum dXY_i^2}{n}} \quad (9)$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum dz_i^2}{n}} \quad (10)$$

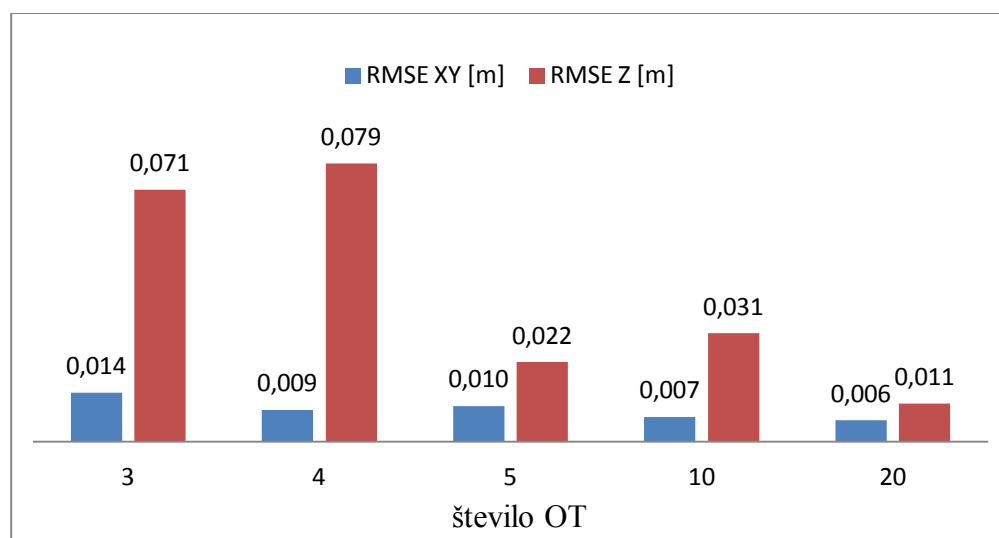
kjer so :

- $x_1, y_1$ : koordinate fotogrametrično določenih točk,
- $x_2, y_2$ : koordinate točk, določene z geodetskimi meritvami,
- $dXY, dZ$ : horizontalne in višinske razlike fotogrametrično določenih točk glede na koordinate, določene z geodetskimi meritvami,
- $n$ : število kontrolnih točk.

Na grafikonu 10 so predstavljeni koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja in višine izdelkov (oblaki točk in ortofoti), izračunani na podlagi meritev koordinat KT (točke polja, ki niso služile kot OT in 10 detajlnih točk), v odvisnosti od uporabljenega števila OT za orientacijo bloka. Na grafikonu 11 so prikazani rezultati, ki so podani v avtomatskih poročilih programa, in so izračunani le na podlagi točk mreže, ki niso služile kot OT. V primeru 20-ih izbranih OT, program ni imel na voljo KT za avtomatski izračun pogreška, zato ta vrednost v grafikonu 11 ni predstavljena. Med grafikonoma je opazna očitna podobnost med rezultati, kar nakazuje na pravilnost naše uporabljene merske metode, oziroma verodostojen prikaz pogreškov v avtomatsko ustvarjenih poročilih.

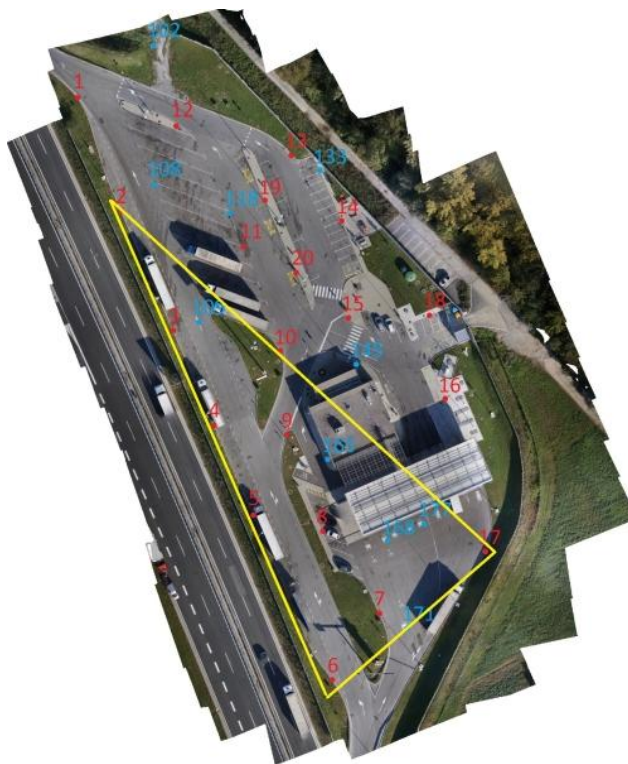


Grafikon 10: Srednji kvadratni pogreški horizontalnega položaja in višine, na kontrolnih točkah, izmerjenih na izdelkih v odvisnosti od uporabljenega števila OT za orientacijo bloka; uporabljene KT iz kalibracijskega polja in dodatnih 10 detajlnih točk (točke so bile izmerjene ročno)



Grafikon 11: Srednji kvadratni pogreški horizontalnega položaja in višine izdelka, na avtomatsko izmerjenih kontrolnih točkah kalibracijskega polja, v odvisnosti od uporabljenega števila OT za orientacijo bloka; uporabljene samo KT iz kalibracijskega polja (točke so bile izmerjene avtomatsko)

Večja razlika med grafikonoma 10 in 11 je opazna le pri višinskem odstopanju ob uporabi treh OT. Avtomatsko izračunano odstopanje višin je za 1,9 cm večje od ročno izmerjenega. Zaradi merjenja odstopanja na večjem številu KT, ki ležijo izven poligona, ki povezuje tri uporabljene OT (Slika 23) in uporabe KT 102, ki je od poligona najbolj oddaljena, smo pričakovali slabše rezultate, pridobljene na podlagi meritev na izdelkih.



Slika 23: Poligon območja med tremi OT

Iz Grafikonov 10 in 11 je razvidno, da se točnost izdelka v horizontalnem in višinskem smislu v splošnem izboljšuje z večanjem števila OT, kar je v skladu s teoretično predpostavko. Število uporabljenih oslonilnih točk ima večji vpliv na višinsko točnost, najbolj izrazito se je to pokazalo pri uporabi petih oslonilnih točk, pri čemer se dodatna peta točka nahaja približno v sredini bloka, ko se je  $RMSE_z$  v primerjavi z uporabo štirih oslonilnih točk izboljšal za približno trikratno vrednost. Tudi to se sklada z ugotovitvami konvencionalne fotogrametrije na področju izravnave blokov posnetkov, da oslonilne točke v sredini bloka znatno vplivajo na izboljšanje višinske točnosti. Naj še enkrat poudarimo, da je poleg števila uporabljenih oslonilnih točk potrebna tudi njihova pravilna razporeditev glede na obliko in velikost bloka (po robovih bloka in na sredini bloka).

Pri naši merski metodi smo bili pri določanju horizontalnega položaja kontrolnih točk omejeni s prostorsko ločljivostjo ortofota, ki je v konkretnih primerih znašala 0,95 cm za piksel. Položajna točnost ortofota je bila v večini primerov približno en piksel, tako smo točen položaj med digitaliziranjem ocenili s pod-pikselsko natančnostjo. V primerih s 5, 10 in 20 OT se tako horizontalna točnost izdelka približa točnosti naše merske metode.

Zaključimo lahko, da je pri praktičnem delu, za zagotovitev ustrezne kakovosti izdelka, potrebno uporabiti 5 ali več OT, ki so enakomerno razporejene po zajetem območju (štiri v vogalih območja in

ena v sredini), seveda pa je število oslonilnih točk potrebno prilagoditi tudi velikosti bloka. Ugotovili smo, da naše ugotovitve v zvezi s številom in razporeditvijo oslonilnih točk potrjujejo splošna pravila, ki so poznana iz konvencionalne fotogrametrije.

V nadaljevanju naloge smo v raziskavah uporabljali 4 OT, ki so služile za georeferenciranje. S tem smo med drugim testirali možnost izboljšanja višinske točnosti izdelka, ob uporabi predhodno izračunanih parametrov NO in omejitvi na uporabo ne-optimalnega števila 4-ih OT.

### **7.3 Raziskava vpliva uporabe različnih parametrov notranje orientacije**

V nadaljevanju naloge smo raziskovali vpliv uporabe predhodno izračunanih parametrov notranje orientacije fotoaparata na fotogrametrični izdelek, kar je opisano v poglavjih 7.3.1 in 7.3.2. Kot znane smo uporabili vse možne parametre NO, ki jih omogoča program ( $f_x$ ,  $f_y$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ , K1, K2, K3, K4, P1, P2, P3, P4 in poševnost), pridobljene v poglavju 7.1.1. Postopki obdelav so bili enaki kot v poglavju 7.2, le da po postopku izdelave redkega oblaka točk, zaradi uporabe fiksnih parametrov NO, program ne omogoča izvedbe dodatne izravnave bloka. V vseh primerih smo kot OT uporabili točke 2, 6, 13 in 17 ter v grafikonih prikazali in analizirali rezultate odstopanj, izračunanih na podlagi terenskih meritev in ročnih meritev koordinat KT (točke mreže, ki niso služile kot OT in detajlne točke) na ortofotih in oblakih točk. Rezultati iz avtomatskih poročil so navedeni v prilogi C.

#### **7.3.1 Raziskava vpliva različnih predhodno izračunanih parametrov notranje orientacije na točnost izdelkov**

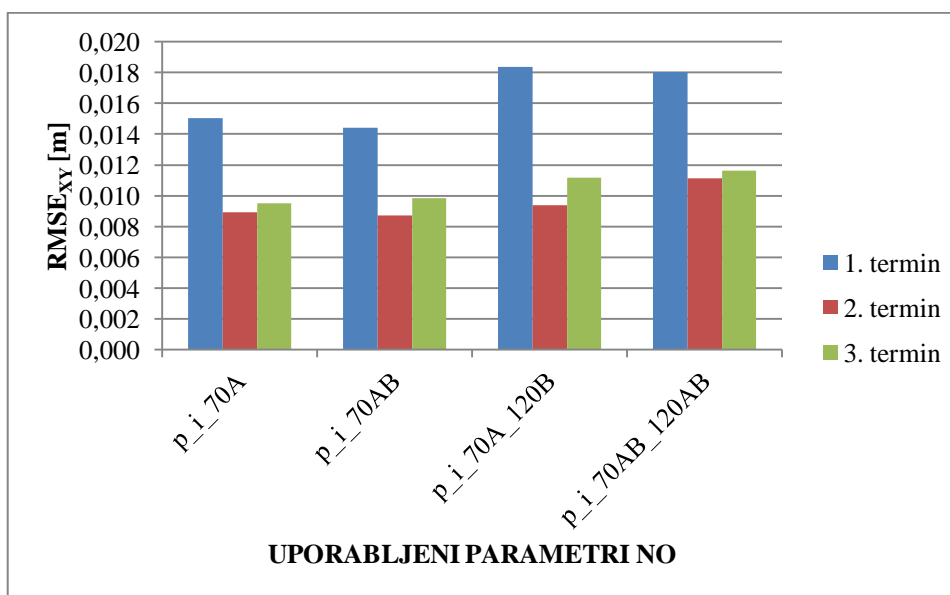
Najprej smo želeli ugotoviti, kakšen vpliv ima lahko uporaba različnih predhodno izračunanih parametrov na horizontalno in višinsko točnost izdelkov (oblak točk in ortofoto). Analizo smo izdelali na primeru bloka 2\_70A, iz istih razlogov, kot so opisani v poglavju 7.2. Kot vhodni podatek smo uporabili 12 različnih vrednosti parametrov notranje orientacije, ki so bili izračunani iz štirih različnih konfiguracij blokov za vse tri terminske izmere (Preglednica 5). Skupno je bilo torej izdelanih 12 oblakov točk in pripadajočih ortofotov, katerih položajno točnost smo ocenili.

Preglednica 5: Uporabljeni parametri notranje orientacije, izračunani iz različnih konfiguracij blokov, kot vhodni podatek pri obdelavi bloka 2\_70A in izdelavi oblaka točk ter ortofota

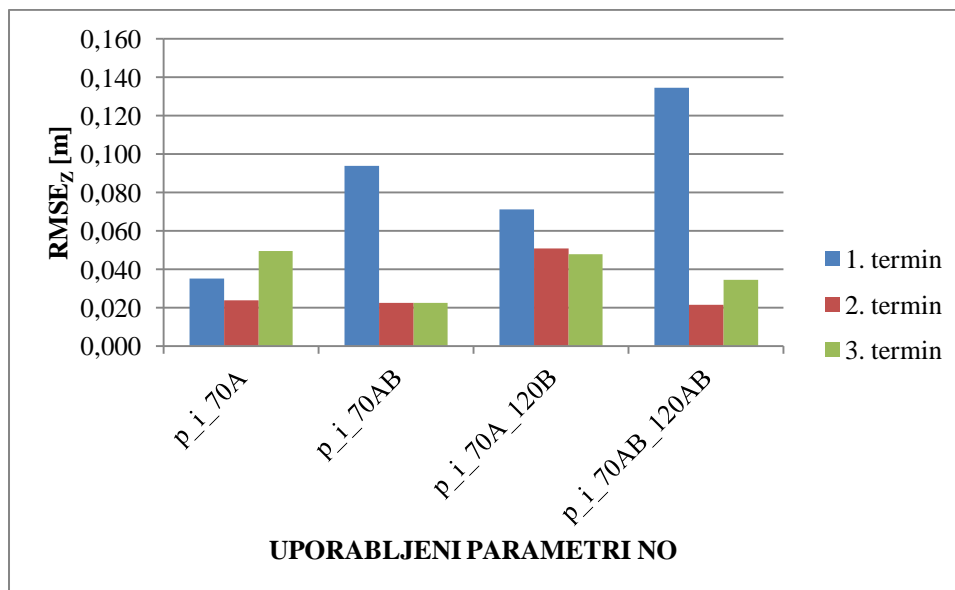
Skupina	1.termin	2. termin	3. termin
1	p_1_70A	p_2_70A	p_3_70A
2	p_1_70AB	p_2_70AB	p_3_70AB
3	p_1_70A_120B	p_2_70A_120B	p_3_70A_120B
4	p_1_70AB_120AB	p_2_70AB_120AB	p_3_70AB_120AB

### 7.3.1.1 Rezultati in analize

Na podlagi vrednosti, prikazanih v grafikonih 12 in 13, lahko sklepamo, da ima uporaba parametrov notranje orientacije, ki so določeni v različnih časovnih terminih in z različno konfiguracijo blokov, merljiv vpliv na končni izdelek.



Grafikon 12: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja, izračunani iz terenskih meritev in izmerjenih koordinat KT na ortofotih iz bloka 2\_70A, ob uporabi različnih vhodnih parametrov notranje orientacije



Grafikon 13: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov višin, izračunani iz terenskih meritev in izmerjenih koordinat KT na oblakih točk iz bloka 2\_70A, ob uporabi različnih vhodnih parametrov notranje orientacije

Znotraj vsake izmed štirih skupin rezultatov, ki so prikazani na grafikonih 12 in 13, se izkaže, da najslabše rezultate dobimo v prvem časovnem terminu (izjema je pri višinah v prvi skupini, kjer so si rezultati zelo blizu). V vseh skupinah so najboljši rezultati, kjer so uporabljeni parametri NO iz drugega termina, iz katerega je tudi obravnavani blok, kar je logično in smiselno. Med prvim in drugim terminom je skoraj sedem mesecev časovne razlike. Rezultati za tretji termin so le nekoliko slabši kot za drugi termin, kar je pričakovano, saj je med drugim in tretjim terminom razlika en mesec. To potrди našo domnevo, da je čas določitve parametrov NO pomemben in lahko znatno vpliva na točnost izdelkov. Lahko sklepamo, da daljši kot je čas med kalibracijo fotoaparata in izvedbo projekta, slabša je točnost izdelkov. Poleg tega iz grafikonov lahko sklepamo, da višina leta ne vpliva zelo na horizontalno točnost izdelkov, nekoliko boljše sicer dobimo z nižjo višino leta (70 m). Pri obravnavi višinske točnosti so rezultati za drugi in tretji termin nekoliko slabši le pri konfiguraciji bloka 70A\_120B, ostali rezultati so primerljivi. Okvirno lahko zaključimo, da je nižja višina snemanja primernejša, snemanje v dveh pravokotnih smereh ne prinese bistveno boljših rezultatov. Te ugotovitve se seveda nanašajo na naš testni primer, za posplošitev teh ugotovitev bi potrebovali še dodatne primere.

### 7.3.2 Raziskava vpliva uporabe enega primera parametrov notranje orientacije na različnih blokih posnetkov

Kot dodaten preizkus smo z uporabo istih vhodnih parametrov notranje orientacije izvedli obdelave na več različnih blokih posnetkov. S tem smo želeli raziskati morebiten vpliv zunanjih dejavnikov (konfiguracija bloka, razlike v zunanjih pogojih), v nasprotju z vplivom uporabe parametrov, pridobljenih ob različnih časovnih terminih, raziskanim v prejšnjem poglavju.

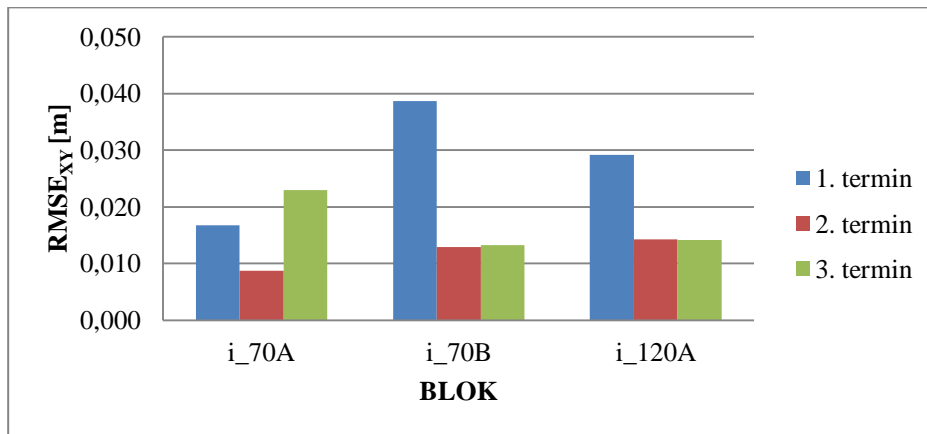
Uporabili smo parametre NO, izračunane iz blokov posnetkov, zajetih z ene višine (p\_2\_70AB) in z dveh višin (p\_2\_70AB\_120AB), ob drugem terminu snemanja. S takšno izbiro parametrov smo hoteli dodatno analizirati vpliv snemalne višine na kakovost kalibracije. Z obema primeroma parametrov NO smo izvedli obdelave na treh skupinah blokov. Vsaka je vsebovala bloke iz posnetkov, zajetih ob vsakem od treh terminov letanja (Preglednica 6). Rezultat je bil 18 oblakov točk in pripadajočih ortofotov.

Preglednica 6: Bloki posnetkov, obdelani z uporabo parametrov p\_2\_70AB in p\_2\_70AB\_120AB

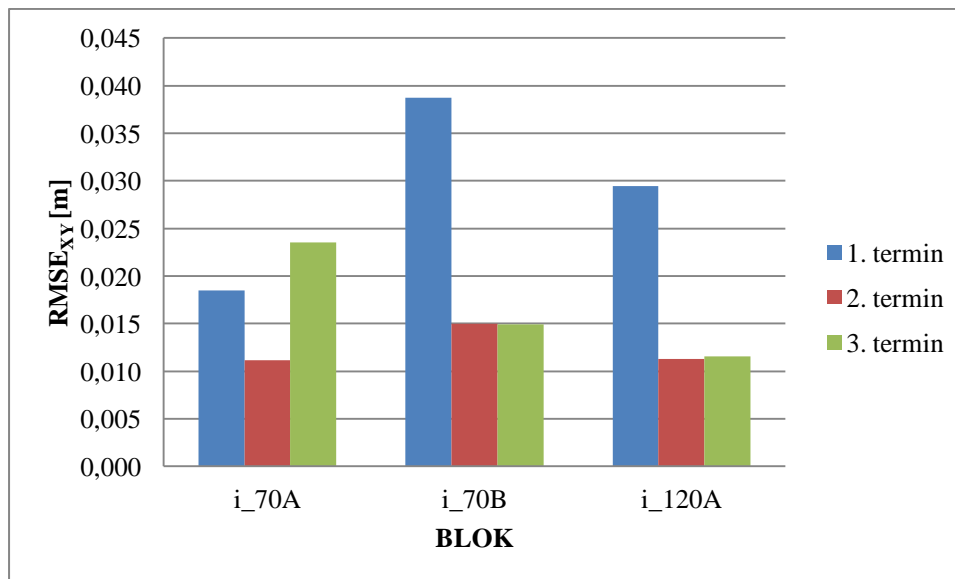
Skupina	1. termin	2. termin	3. termin
1	1_70A	2_70A	3_70A
2	1_70B	2_70B	3_70B
3	1_120A	2_120A	3_120A

### 7.3.2.1 Rezultati in analize

Rezultati  $RMSE_{XY}$  z uporabo parametrov  $p_{2\_70AB}$  in  $p_{2\_70AB\_120AB}$ :



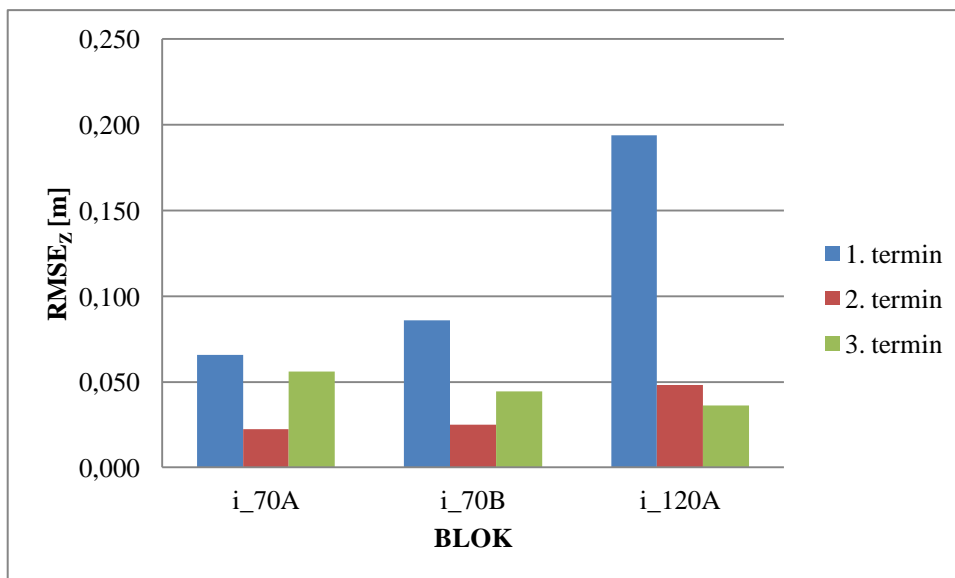
Grafikon 14: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na ortofotih iz blokov, obdelanih s parametri  $p_{2\_70AB}$



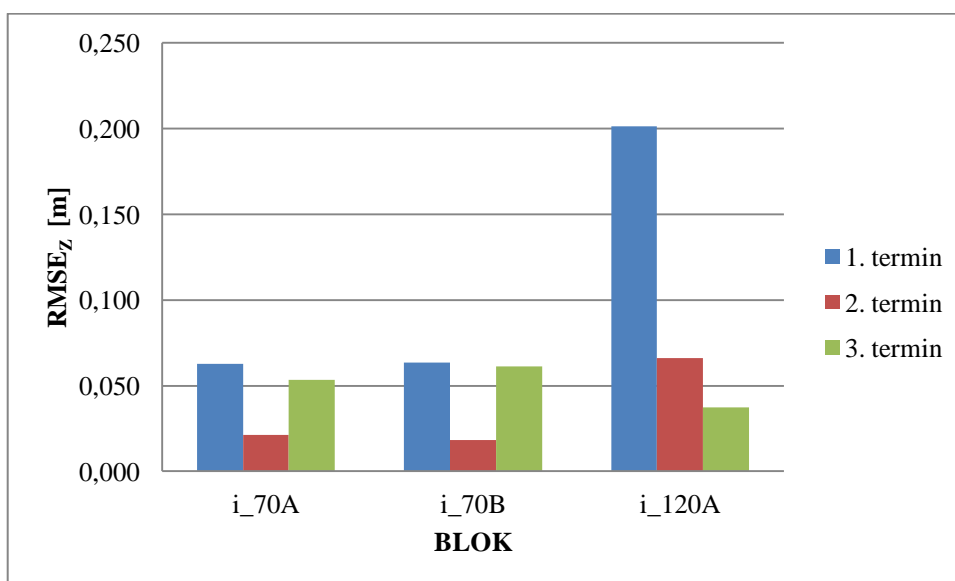
Grafikon 15: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov horizontalnega položaja, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na ortofotih iz blokov, obdelanih s parametri  $p_{2\_70AB\_120AB}$



Rezultati  $RMSE_z$  z uporabo parametrov p\_2\_70AB in p\_2\_70AB\_120AB:



Grafikon 16: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov višine, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na oblakih točk iz blokov, obdelanih s parametri p\_2\_70AB



Grafikon 17: Koreni srednjih kvadratnih pogreškov višine, izračunani iz izmerjenih koordinat KT na oblakih točk iz blokov, obdelanih s parametri p\_2\_70AB\_120AB

Iz grafikonov 14, 15, 16 in 17 je razvidno, da uporaba različnih parametrov notranje orientacije, izračunanih na podlagi blokov iz istega termina snemanja, v praksi ni bistveno vplivala na položajno in višinsko točnost izdelkov.

---

Znotraj skupin blokov ponovno opazimo, da so najboljši rezultati v drugem terminu snemanja, iz katerega so bili izračunani tudi parametri kalibracije, kar dodatno potrjuje ugotovitev, da naj bo kalibracija časovno izvedena čim bližje projektu. Večjih razlik med uporabo parametrov NO, izračunanih iz različnih dveh različnih konfiguracij, tako pri horizontalni kot pri višinski točnosti, ne opazimo. Če posplošimo, so pri večini blokov nekoliko boljši rezultati pri uporabi parametrov p\_2\_70AB.

## 8 ZAKLJUČEK

Na podlagi analize stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata, izračunanih ob treh časovnih terminih, lahko potrdimo, da se ti s časom spreminjajo. Ugotovili smo, da se stabilnost parametrov v krajšem časovnem intervalu ohranja (med istim letom in med dvema letoma v istem dnevu), a so izračunane vrednosti parametrov odvisne od konfiguracije bloka. Med krajšim intervalom med drugim in tretjim terminom, ki je trajal en mesec, pa se že kažejo razlike med izračunanimi parametri, ki so izrazitejšje ob primerjavi s parametri iz prvega termina, ki je bil izveden 7 mesecev pred drugim. Ob tem ostaja odprto vprašanje vpliva temperature zraka. Ob prvem terminu snemanja je bila namreč temperatura bistveno višja kot pri ostalih dveh, torej večje razlike v parametrih mogoče lahko pripišemo tudi temu dejavniku.

Preizkušali smo tudi vpliv števila oslonilnih točk, ki jih uporabimo v izravnavi bloka, na točnost izdelkov (ortofota in oblaka točk). Ugotovili smo, da se točnost izdelkov z večanjem števila oslonilnih točk v splošnem veča, kar je v skladu s teoretičnimi predpostavkami. Za zagotavljanje višinske točnosti izdelkov je pomembno, da so oslonilne točke razporejene tudi v sredini bloka. Minimalna konfiguracija, ki zagotavlja dobre rezultate, so štiri oslonilne točke v vogalih bloka in ena v sredini bloka. Pri prostorsko večjih blokkih, kot je bil uporabljen v našem eksperimentu, pa bi bilo to potrebno še dodatno preveriti.

V postopkih obdelave testnih blokov, ki smo jih izbrali za analize, smo uporabljali predhodno izračunane parametre notranje orientacije fotoaparata in opazovali njihov vpliv na položajno točnost izdelkov (oblaka točk in ortofota). Ugotovili smo, da je vpliv merljiv. Z uporabo parametrov, pridobljenih v daljšem obdobju pred ali po zajemu obravnavanih blokov, so bili doseženi v povprečju do približno tri-krat slabši rezultati višinske točnosti izdelkov, kot ob uporabi parametrov, pridobljenih ob terminu zajema testnega bloka. Razlike v horizontalni točnosti so bile manjše. Večjih razlik vpliva parametrov, pridobljenih iz blokov z različno konfiguracijo, na točnost izdelkov nismo zaznali. V nasprotju z našimi pričakovanji najboljši rezultati niso bili doseženi z uporabo parametrov, izračunanih iz bloka posnetkov z dveh višin in v dveh pravokotnih snemalnih pasovih, kar je najbolj kompleksna konfiguracija, ki smo jo uporabili, pač pa z uporabo parametrov, pridobljenih iz blokov, ki so bili po konfiguraciji najbolj podobni obravnavanim blokom.

Potrebno je poudariti, da so testi in analize, opisani v tej diplomski nalogi, izvedeni z uporabo zelo kakovostnih terensko izmerjenih točk (oslonilnih in kontrolnih). V praksi večinoma to težko zagotovimo. Ugotovitve in zaključki, ki smo jih izpeljali iz naših eksperimentov, lahko veljajo v podobnih izvedbenih pogojih. Na primer, pri manj natančno izmerjenih oslonilnih točkah na terenu bi

---

morda večje število oslonilnih točk precej bolj vplivalo na boljšo točnost izdelkov, kot je to bilo v našem primeru. To bi vsekakor bilo potrebno še dodatno preizkusiti.

V prihodnosti bo potrebno izdelati še precej eksperimentalnih raziskav, da bomo v zvezi z uporabo brezpilotnih letalnih sistemov za zajem prostorskih podatkov znali opisati pomembne vplive v izvedbi celotnega postopka od snemanja do izdelkov. Takšni eksperimenti so zahtevni in časovno zamudni, vendar nujno potrebni, da bomo izvedbo projektov lahko optimizirali glede na zahtevano kakovost izdelkov.

## VIRI

Agisoft. 2016a. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.2.

<http://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/> (Pridobljeno 16. 2. 2016.)

Agisoft. 2016b. Orthophoto and DEM generation with Agisoft Photoscan Pro 1.2 (with GCP).

<http://www.agisoft.com/support/tutorials/beginner-level/> (Pridobljeno 16. 2. 2016.)

Agisoft. 2016c. Features-Professional Edition.

<http://www.agisoft.com/features/professional-edition/> (Pridobljeno 6. 2. 2016.)

Agisoft. 2016d. Community-Forum.

<http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3105.0> (Pridobljeno 6. 2. 2016.)

Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L. V. 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. European Conference on Computer Vision. Berlin, Springer-Verlag.

Bitenc, M. 2014. Brezpilotni letalniki – od igrače do večnamenskih robotov. Geodetski vestnik 58, 1: 155–158.

Bric, V., Grigillo, D., Kosmatin Fras, M. 2010. Fotogrametrija: Gradivo za strokovni izpit iz geodetske stroke. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije.

[http://www.izs.si/fileadmin/dokumenti/strokovni\\_izpiti/msgeo/Fotogrametrija.pdf](http://www.izs.si/fileadmin/dokumenti/strokovni_izpiti/msgeo/Fotogrametrija.pdf) (Pridobljeno 17. 6. 2016.)

C-Astral. 2016. Bramor rTK.

<http://www.c-astral.com/en/products/bramor-rtk> (Pridobljeno 6. 2. 2016.)

Colomina, I., Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 49: 79–97.

Dörstel, C., Jacobsen, K., Stallmann, D. 2003. DMC-Photogrammetric Accuracy, Calibration Aspects and Generation of Synthetic DMC Images. V: Grün, A., Kahmen, H. (ur.). Optical 3D Measurement Techniques VI, Vol. I. Zürich, Institute for Geodesy and Photogrammetry, ETH: str. 74–82.

[https://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/Jac0903zuerich.pdf](https://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/Jac0903zuerich.pdf) (Pridobljeno 16. 2. 2016.)

Dougan, J. N. 2016. Uporaba brezpilotnega sistema za zajem prostorskih podatkov in ocena kakovosti klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk. Magistrsko delo. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. N. Dougan): 11 str.

Eisenbeiss, H., 2009. UAV Photogrammetry. Doktorska dizertacija. Dresden, University of Technology Dresden (samozaložba H. Eisenbeiss): 203 f.  
[http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/blaue\\_Berichte\\_PDF/105.pdf](http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/blaue_Berichte_PDF/105.pdf) (Pridobljeno 13. 4. 2016.)

Grudnik, K. 2016. Vzpostavitev, izmera in izračun kalibracijskega polja za kalibracijo fotoaparata. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Grudnik): 3 str.

Hastedt, H., Luhmann, T. 2015. Investigations on the quality of the interior orientation and its impact on object space for UAV photogrammetry. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4: 321–328.  
<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/321/2015/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015.pdf> (Pridobljeno 22. 2. 2016.)

Honkavaara, E., Ahokas, E., Hyypä, J., Jaakkola, J., Kaartinen, H., Kuitto, R., Markelin, L., Nurminen, K. 2006. Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60, 6: 387–399.

Kraus, K. 1993. Photogrammetry, Volume 1, Fundamentals and Standard Processes. Bonn, Dümmlers: 14 str.

Kvaternik, T. 2007. Test stabilnosti parametrov notranje orientacije digitalnega fotoaparata. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Kvaternik): 58 str.

Lowe, D. G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60, 2: 91–110.

Portal Geopedia. 2016.  
[http://www.geopedia.si/#T105\\_x419196\\_y77512\\_s14\\_b4](http://www.geopedia.si/#T105_x419196_y77512_s14_b4) (Pridobljeno 13. 4. 2016.)

Tang, R. 2013. Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision. Doktorska dizertacija. Munchen, Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Deutsche Geodätische Kommission (samozaložba R. Tang): 15–16 str.

Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A., Strecha, C., 2016. Photogrammetric Accuracy and Modeling of Rolling Shutter Cameras. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 3: 139–146.

<http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/III-3/139/2016/isprs-annals-III-3-139-2016.pdf> (Pridobljeno 28. 7. 2016.)

Wikipedia. 2016. Structure from motion.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Structure\\_from\\_motion](https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion) (Pridobljeno 17. 6. 2016.)

Žorž, D. 2016. Izdelava ortofota iz bližnjelikovnih aeroposnetkov na območju krajinskega parka Sečoveljske soline. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žorž): 13 str.

## SEZNAM PRILOG

### PRILOGA A: KOORDINATE UPORABLJENIH TOČK

Preglednica A.1: Koordinate in točnosti točk kalibracijskega polja

Preglednica A.2: Koordinate detajlnih kontrolnih točk

### PRILOGA B: REZULTATI KALIBRACIJ

Preglednica B.1: Blok 70AB\_120AB

Preglednica B.2: Blok 70A\_120B

Preglednica B.3: Blok 70B

Preglednica B.4: Blok 70A

Preglednica B.5: Blok 70AB

Preglednica B.6: Blok 120B

Preglednica B.7: Blok 120A

Preglednica B.8: Blok 120AB

### PRILOGA C: REZULTATI HORIZONTALNIH IN VIŠINSKIH POGREŠKOV

#### REZULTATI POGREŠKOV NA PODLAGI MERITEV

Preglednica C.1: Položajna točnost izdelkov v odvisnosti od števila uporabljenih OT

Preglednica C.2: Položajna točnost izdelkov iz bloka 2\_70A, ob uporabi različnih parametrov NO

Preglednica C.3: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO

p\_2\_70AB

Preglednica C.4: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO

p\_2\_70AB\_120AB

#### REZULTATI AVTOMATSKO IZRAČUNANIH POGREŠKOV

Preglednica C.5: Položajna točnost izdelkov v odvisnosti od števila uporabljenih OT

Preglednica C.6: Položajna točnost izdelkov iz bloka 2\_70A, ob uporabi različnih parametrov NO

Preglednica C.7: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO

p\_2\_70AB

Preglednica C.8: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO

p\_2\_70AB\_120AB



## PRILOGA A: KOORDINATE UPORABLJENIH TOČK

Preglednica A.1: Koordinate in točnosti točk kalibracijskega polja

Točka	Y (m)	X (m)	Z (m)	My (m)	Mx (m)	Mz (m)
1	419020.9989	77227.7039	156.3389	0.0001	0.0001	0.0002
2	419033.5132	77195.4582	156.8064	0.0001	0.0001	0.0002
3	419048.2779	77161.4689	157.3047	0.0001	0.0001	0.0003
4	419059.8745	77134.8419	157.7098	0.0001	0.0001	0.0003
5	419070.9927	77109.2486	158.1193	0.0001	0.0001	0.0002
6	419093.3356	77062.6558	158.9296	0.0001	0.0001	0.0003
7	419106.8938	77081.2109	158.2515	0.0001	0.0001	0.0002
8	419090.5764	77104.8038	157.5729	0.0001	0.0001	0.0008
9	419080.5930	77132.3731	157.7473	0.0001	0.0001	0.0004
10	419078.4849	77155.8547	157.4038	0.0001	0.0001	0.0002
11	419068.2090	77185.3389	156.7892	0.0001	0.0001	0.0002
12	419048.9453	77219.6306	156.4377	0.0001	0.0001	0.0002
13	419082.0137	77211.2151	156.5787	0.0001	0.0001	0.0002
14	419095.9984	77192.9950	156.8050	0.0001	0.0001	0.0002
15	419098.0791	77165.1292	157.2693	0.0001	0.0001	0.0002
16	419125.5315	77142.5308	157.7322	0.0001	0.0001	0.0002
17	419136.7486	77098.5675	157.9734	0.0001	0.0001	0.0003
18	419120.8811	77166.0367	157.2232	0.0001	0.0001	0.0002
19	419074.4601	77198.2767	156.7344	0.0001	0.0001	0.0002
20	419083.2868	77178.0572	157.0480	0.0001	0.0001	0.0002

Preglednica A.2: Koordinate in točnosti točk kalibracijskega polja

Točka	Y (m)	X (m)	Z (m)
102	419042.702	77242.634	155.738
108	419042.901	77203.023	156.564
109	419055.511	77164.207	157.154
118	419064.282	77194.690	156.638
133	419089.872	77207.172	156.621
145	419100.225	77152.121	157.503
165	419092.112	77125.130	157.687
168	419109.203	77102.355	157.602
171	419119.374	77106.781	157.587
177	419114.739	77077.567	158.317



## PRILOGA B: REZULTATI KALIBRACIJ

Preglednica B.1: Blok 70AB\_120AB

Parameter	1. termin	2. termin	3. termin
$f_x$	7746,61699	7747,87755	7667,98509
$f_y$	7756,74344	7753,62160	7675,86049
$c_x$	2994,53016	3008,55874	3009,99103
$c_y$	1969,26682	1948,61583	1979,53774
skew	-1,89140	-0,30300	0,60444
K1	-0,14335	-0,14020	-0,16572
K2	0,20660	0,26847	0,75410
K3	1,06471	0,33640	-3,03891
K4	-2,98911	-0,76266	6,87504
P1	-0,00049	-0,00068	-0,00129
P2	-0,00057	0,00088	0,00095
P3	-2,37267	0,72133	-3,76708
P4	35,49894	-0,97594	16,55691

Preglednica B.2: Blok 70A\_120B

Parameter	1. termin	2. termin	3. termin
$f_x$	7693,43968	7728,17944	7650,73065
$f_y$	7705,03025	7734,89807	7658,83672
$c_x$	3004,29143	3002,17013	3007,88273
$c_y$	1991,81919	1948,46271	1981,27165
skew	0,96489	-0,08309	0,32597
K1	-0,14473	-0,13431	-0,17447
K2	0,31200	0,18460	0,96115
K3	0,00758	0,84640	-4,62994
K4	-0,01976	-1,69351	10,68841
P1	-0,00117	-0,00050	-0,00125
P2	-0,00127	0,00035	0,00083
P3	-5,74955	10,34889	-4,81661
P4	33,06984	-30,98374	23,08136

Preglednica B.3: Blok 70B

Parameter	1. termin	2. termin	3. termin
$f_x$	7734,48534	7703,77021	7742,44848
$f_y$	7743,35880	7713,20334	7751,96486
$c_x$	3003,61703	3015,66373	2995,10167
$c_y$	1962,99514	1965,24671	1973,23849
skew	-1,24913	0,89567	-0,06205
<b>K1</b>	-0,15534	-0,13739	-0,14574
<b>K2</b>	0,49867	0,21738	0,32426
<b>K3</b>	-1,30976	0,56942	0,19373
<b>K4</b>	3,10909	-0,92942	-0,89112
<b>P1</b>	-0,00031	-0,00116	-0,00081
<b>P2</b>	-0,00067	0,00147	0,00096
<b>P3</b>	-4,04372	-4,36095	1,66053
<b>P4</b>	23,49768	19,59344	-8,33852

Preglednica B.4: Blok 70A

Parameter	1. termin	2. termin	3. termin
$f_x$	7590,29299	7657,89556	7642,56145
$f_y$	7602,76308	7668,31716	7650,97867
$c_x$	3012,45717	2998,38105	3007,82874
$c_y$	1984,44145	1966,26991	1974,29611
skew	1,69432	1,32645	0,56208
<b>K1</b>	-0,13801	-0,13963	-0,13607
<b>K2</b>	0,26182	0,31120	0,20816
<b>K3</b>	0,35219	-0,17515	0,79626
<b>K4</b>	-0,88601	0,80424	-2,07222
<b>P1</b>	-0,00153	-0,00059	-0,00116
<b>P2</b>	-0,00076	0,00052	0,00158
<b>P3</b>	-2,72068	5,50622	-6,61751
<b>P4</b>	15,39380	-16,55273	27,22935

Preglednica B.5.: Blok 70AB

<b>Parameter</b>	<b>1. termin</b>	<b>2. termin</b>	<b>3. termin</b>
<b>f<sub>x</sub></b>	7685,77153	7742,31766	7710,27657
<b>f<sub>y</sub></b>	7696,15281	7751,28083	7718,38506
<b>c<sub>x</sub></b>	3009,45825	3002,78691	3005,66263
<b>c<sub>y</sub></b>	1973,78045	1959,85162	1964,69895
<b>skew</b>	1,46660	1,05914	0,04518
<b>K1</b>	-0,15146	-0,14406	-0,14229
<b>K2</b>	0,53353	0,32818	0,25988
<b>K3</b>	-1,75937	-0,16388	0,68161
<b>K4</b>	4,18885	0,76244	-2,12261
<b>P1</b>	-0,00065	-0,00077	-0,00105
<b>P2</b>	-0,00076	0,00102	0,00138
<b>P3</b>	-2,98356	-0,41907	-3,84268
<b>P4</b>	18,19404	1,80370	15,67167

Preglednica B.6.: Blok 120B

<b>Parameter</b>	<b>1. termin</b>	<b>2. termin</b>	<b>3. termin</b>
<b>f<sub>x</sub></b>	7712,68964	7714,34390	7684,60452
<b>f<sub>y</sub></b>	7723,40146	7720,63613	7693,66418
<b>c<sub>x</sub></b>	2997,92728	2996,55125	2998,71229
<b>c<sub>y</sub></b>	2003,73930	1957,72669	1990,71030
<b>skew</b>	-0,82890	-2,30057	-0,50408
<b>K1</b>	-0,14424	-0,13011	-0,18954
<b>K2</b>	0,27568	0,10072	1,22420
<b>K3</b>	0,21944	1,59528	-6,43829
<b>K4</b>	-0,21036	-3,88286	14,83895
<b>P1</b>	-0,00114	-0,00059	-0,00124
<b>P2</b>	-0,00181	0,00049	0,00061
<b>P3</b>	-7,73726	8,85023	-1,82992
<b>P4</b>	41,14327	-30,82886	8,78250

Preglednica B.7.: Blok 120A

Parameter	1. termin	2. termin	3. termin
$f_x$	7730,14352	7740,28504	7552,15290
$f_y$	7740,28576	7746,28690	7561,08202
$c_x$	2966,69328	3009,62024	3005,31923
$c_y$	1968,07265	1971,19091	1999,52989
skew	-3,08196	0,17162	1,07369
<b>K1</b>	-0,13218	-0,14672	-0,14635
<b>K2</b>	-0,11941	0,35502	0,44117
<b>K3</b>	3,49554	0,00446	-0,97397
<b>K4</b>	-8,38074	-0,81092	2,17420
<b>P1</b>	-0,00001	-0,00050	-0,00189
<b>P2</b>	-0,00001	0,00103	0,00150
<b>P3</b>	266,10341	1,30260	-3,91038
<b>P4</b>	520,55316	-2,34275	12,10420

Preglednica B.8: Blok 120AB

Parameter	1. termin	2. termin	3. termin
$f_x$	7771,66319	7739,76369	7653,60448
$f_y$	7781,48657	7745,14065	7662,21262
$c_x$	2986,99548	3004,84454	3002,76892
$c_y$	1980,98501	1956,05746	1989,38598
skew	-3,07401	-1,19203	0,18215
<b>K1</b>	-0,16027	-0,13908	-0,17214
<b>K2</b>	0,49800	0,23750	0,90932
<b>K3</b>	-0,84250	0,70888	-4,30264
<b>K4</b>	0,93619	-2,04129	10,11812
<b>P1</b>	-0,00004	-0,00062	-0,00150
<b>P2</b>	-0,00003	0,00080	0,00096
<b>P3</b>	221,66346	3,26244	-3,86485
<b>P4</b>	-562,32096	-11,78938	16,20700

## PRILOGA C: REZULTATI HORIZONTALNIH IN VIŠINSKIH POGREŠKOV

### REZULTATI POGREŠKOV, IZRAČUNANI NA PODLAGI MERITEV NA IZDELKIH

Preglednica C.1: Položajna točnost izdelkov v odvisnosti od števila uporabljenih OT

Št. OT	RMSE <sub>XY</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
3	0,014	0,071
4	0,009	0,079
5	0,010	0,022
10	0,007	0,031
20	0,006	0,011

Preglednica C.2: Položajna točnost izdelkov iz bloka 2\_70A, ob uporabi različnih parametrov NO

Parametri NO	RMSE <sub>XY</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
p_1_70A	0,015	0,035
p_2_70A	0,009	0,024
p_3_70A	0,010	0,050
p_1_70AB	0,014	0,094
p_2_70AB	0,009	0,022
p_2_70AB	0,010	0,023
p_1_70A_120B	0,018	0,071
p_2_70A_120B	0,009	0,051
p_3_70A_120B	0,011	0,048
p_1_70AB_120AB	0,018	0,134
p_2_70AB_120AB	0,011	0,021
p_3_70AB_120AB	0,012	0,035

Preglednica C.3: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO  
p\_2\_70AB

Blok	RMSE <sub>XY</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
1_70A	0,017	0,066
1_70B	0,039	0,086
1_120A	0,029	0,194
2_70A	0,009	0,022
2_70B	0,013	0,025
2_120A	0,014	0,048
3_70A	0,023	0,056
3_70B	0,013	0,045
3_120A	0,014	0,036

Preglednica C.4: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO  
p\_2\_70AB\_120AB

Blok	RMSE <sub>XY</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
1_70A	0,018	0,063
1_70B	0,039	0,063
1_120A	0,029	0,201
2_70A	0,011	0,021
2_70B	0,015	0,018
2_120A	0,011	0,066
3_70A	0,024	0,053
3_70B	0,015	0,061
3_120A	0,012	0,037

## REZULTATI AVTOMATSKO IZRAČUNANIH POGREŠKOV

Preglednica C.5: Položajna točnost izdelkov v odvisnosti od števila uporabljenih OT

Št. OT	RMSE <sub>XY</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
3	0,016	0,090
4	0,011	0,073
5	0,011	0,027
10	0,008	0,029

Preglednica C.6: Položajna točnost izdelkov iz bloka 2\_70A, ob uporabi različnih parametrov NO

Parametri NO	RMSE <sub>XY</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
p_1_70A	0,015	0,032
p_2_70A	0,010	0,021
p_3_70A	0,012	0,042
p_1_70AB	0,014	0,090
p_2_70AB	0,010	0,022
p_2_70AB	0,012	0,023
p_1_70A_120B	0,018	0,067
p_2_70A_120B	0,013	0,058
p_3_70A_120B	0,014	0,044
p_1_70AB_120AB	0,019	0,133
p_2_70AB_120AB	0,015	0,022
p_3_70AB_120AB	0,015	0,031



Preglednica C.7: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO  
p\_2\_70AB

<b>Blok</b>	<b>RMSE<sub>XY</sub> (m)</b>	<b>RMSE<sub>Z</sub> (m)</b>
<b>1_70A</b>	0,017	0,061
<b>1_70B</b>	0,045	0,096
<b>1_120A</b>	0,024	0,195
<b>2_70A</b>	0,010	0,022
<b>2_70B</b>	0,015	0,024
<b>2_120A</b>	0,013	0,052
<b>3_70A</b>	0,021	0,058
<b>3_70B</b>	0,015	0,053
<b>3_120A</b>	0,010	0,035

Preglednica C.8: Položajna točnost izdelkov iz različnih blokov, ob uporabi parametrov NO  
p\_2\_70AB\_120AB

<b>Blok</b>	<b>RMSE<sub>XY</sub> (m)</b>	<b>RMSE<sub>Z</sub> (m)</b>
<b>1_70A</b>	0,018	0,062
<b>1_70B</b>	0,045	0,067
<b>1_120A</b>	0,024	0,209
<b>2_70A</b>	0,015	0,022
<b>2_70B</b>	0,015	0,017
<b>2_120A</b>	0,009	0,053
<b>3_70A</b>	0,021	0,057
<b>3_70B</b>	0,015	0,064
<b>3_120A</b>	0,007	0,033