

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:

Cigelšek, L. 2012. Kalibracija digitalnega fotoaparata na testnem polju. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentor Grigillo, D.): 27 str.

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:

Cigelšek, L. 2012. Kalibracija digitalnega fotoaparata na testnem polju. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisor Grigillo, D.): 27 pp.

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 ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE GEODEZIJE
IN GEOINFORMATIKE

Kandidatka:

LUCIJA CIGELŠEK

**KALIBRACIJA DIGITALNEGA FOTOAPARATA NA
TESTNEM POLJU**

Diplomska naloga št.: 21/GIG

**CALIBRATION OF A DIGITAL CAMERA ON A TEST
FIELD**

Graduation thesis No.: 21/GIG

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

Somentor:

asist. dr. Dejan Grigillo

Član komisije:

doc. dr. Anka Lisec

doc. dr. Miran Kuhar

Ljubljana, 24. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Lucija Cigelšek izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Kalibracija digitalnega fotoaparata na testnem polju«.

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

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

Ljubljana, 1. 9. 2012

.....

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7:771(043.2).
Avtor:	Cigelšek Lucija
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	asist. dr. Dejan Grigillo
Naslov:	Kalibracija digitalnega fotoaparata na testnem polju
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	27 str., 5 pregl., 12 sl.
Ključne besede:	digitalni fotoaparati, kalibracija fotoaparata, testno polje, DLT, AeroSys

Izvleček

Osnovno orodje v fotogrametriji so profesionalni merski fotoaparati, ki imajo poznane (kalibrirane) parametre notranje orientacije in stabilno konstrukcijo. Zaradi vedno večje kakovosti in nižje cene pa se za določene fotogrametrične namene vse bolj uveljavlja uporaba nemerskih (amaterskih) digitalnih fotoaparatorov, kjer je potrebno parametre notranje orientacije določiti v postopku kalibracije. V okviru diplomske naloge je bila izvedena kalibracija nemerskega digitalnega fotoaparata Nikon D70 na testnem polju, ki je vzpostavljeno v kletnih prostorih UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Testno polje predstavljajo prostorsko razporejene in ustrezno signalizirane točke, katerih prostorske koordinate so bile predhodno določene s klasično metodo izmere. Parametre notranje orientacije smo najprej želeli določiti z metodo samokalibracije v okviru izravnave aerotriangulacije. Med obdelavo so se pri izvedbi te naloge pokazale težave v izbranem programskem paketu AeroSys, zato smo praktično izvedbo prilagodili programski opremi (parametre notranje orientacije smo določili z direktno linearno transformacijo). Rezultati so pokazali, da z uporabljenim postopkom in opremo lahko dosežemo natančnost fotogrametrično določenih prostorskih koordinat nekaj cm, kar je sprejemljivo za določene manj zahtevne naloge bližnjeliskovne fotogrametrije.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.7:771(043.2).
Author: Cigelšek Lucija
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph. D.
Cosupervisor: Assist. Dejan Grigillo, Ph.D.
Title: Calibration of a digital camera on a test field
Document type: Graduation thesis – University studies
Scope and tools: 27 p., 5 tab., 12 fig.
Keywords: digital camera, camera calibration, test field, DLT, AeroSys

Abstract

The principal tools of photogrammetry are professional cameras with calibrated parameters of inner orientation and stable construction. However, due to increased quality and lower prices, the use of amateur digital cameras, where the parameters of inner orientation are determined during calibration, for certain photogrammetric purposes is growing. For the aim of this diploma thesis, the calibration of Nikon D70 digital camera was performed at the test area in the basement facilities of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana. The area consists of spatially located and properly identified points with spatial coordinates previously determined via the classic measurement method. The initial aim was to determine the parameters of inner orientation through the method of self-calibration within the compensation of aerotriangulation. During data analysis certain problems with the chosen software package AeroSys became evident, so the practical implementation was adjusted to the software capabilities (the parameters of inner orientation were determined by direct linear transformation). The results have shown that by using the described procedure and equipment, the accuracy to within several centimetres of photogrammetrically determined spatial coordinates can be achieved, which is acceptable for certain less demanding tasks of close-range photogrammetry.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras ter somentorju asist. dr. Dejanu Grigillu za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi asist. Klemnu Kregarju za omogočeno uporabo testnega polja ter posredovane podatke.

Zahvalila bi se vsem ostalim, ki ste mi kakorkoli pomagali pri izdelavi diplomske naloge, in domačim za podporo v času študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 TEORETIČNE OSNOVE	2
2.1 Centralna projekcija.....	2
2.2 Direktna linearna transformacija	4
2.3 Metode kalibracije	6
2.3.1 Laboratorijska kalibracija z uporabo goniometra.....	6
2.3.2 Kalibracija na podlagi poznanih oblik v prostoru.....	6
2.3.3 Kalibracija na testnem polju točk z neznanimi prostorskimi koordinatami	7
2.3.4 Samokalibracija.....	7
2.3.5 Kalibracija na testnem polju točk z znanimi prostorskimi koordinatami	7
3 PRAKTIČNA IZVEDBA KALIBRACIJE	10
3.1 Zrcalno - refleksni fotoaparata Nikon D70	10
3.2 Testno kalibracijsko polje.....	11
3.3 Postopek snemanja	13
3.4 Postopek obdelave	14
3.4.1 Merjenje koordinat z digitalnim komparatorjem	16
3.4.2 Direktna linearna transformacija.....	16
3.4.3 Izravnava bloka snopov	17
3.4.4 Meritev 3D koordinat v Socet Set-u	18
4 REZULTATI OBDELAVE IN NJIHOVA ANALIZA TER INTERPRETACIJA	19
4.1 Direktna linearna transformacija	19
4.2 Izravnava bloka snopov	20
4.3 Meritev 3D koordinat v Socet Set-u	21
5 ZAKLJUČEK	24
VIRI	26

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Tehnični podatki fotoaparata Nikon D70 in objektivna AF-S DX Zoom-Nikkor (Nikon, 2012)	11
Preglednica 2: Parametri zunanje orientacije	20
Preglednica 3: Odstopanja na kontrolnih točkah.....	21
Preglednica 4: Meritev 3D koordinat v Socet Set	22
Preglednica 5: Srednji kvadratni pogreški	23

KAZALO SLIK

Slika 1: Povezava med objektom na posnetku in v prostoru (Bric, Grigillo, Kosmatin Fras, 2010)	2
Slika 2: Prikaz direktne linearne transformacije (Kwon, 1998).....	4
Slika 3: Testno polje na Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na Dunaju (Kraus, 1997) ..	8
Slika 4: Prikaz ravninskega testnega polja (Zhang, 1998)	9
Slika 5: Fotoaparat Nikon D70 z objektivom AF-S DX Zoom-Nikkor (Nikon, 2012).....	10
Slika 6: Testno kalibracijsko polje na UL Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo	12
Slika 7: Signalizirani oslonilna in vezna točka	12
Slika 8: Blok osmih posnetkov v dveh pasovih	13
Slika 9: Shema postopka obdelave.....	15
Slika 10: Merjenje koordinat z digitalnim komparatorjem	16
Slika 11: Struktura datoteke *.CTL.....	17
Slika 12: Struktura datoteke *.PTB	18

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

„Fotogrametrija je znanost in tehnologija pridobivanja merskih podatkov o fizičnih objektih in okolju s pomočjo postopkov beleženja, merjenja in interpretacije fotografskih posnetkov ter vzorcev sevanja elektromagnetne energije,“ (ASPRS, 2012). S tehnološkim razvojem se je razvijala tudi fotogrametrija, ki je tako prešla že številna razvojna obdobja: grafično obdobje, analogno obdobje, sledilo je analitično obdobje, z razmahom računalništva pa se je po letu 1980 pričelo digitalno obdobje.

Osnovno orodje pri fotogrametričnih postopkih predstavlja fotoaparatus, čigar tehnološki razvoj je pomembno narekoval razvoj fotogrametrije. Fotoaparate v osnovi delimo na analogne in digitalne fotoaparate. Slednji so zgrajeni in delujejo v splošnem enako kot analogni, le da se namesto na film, slika zapiše na slikovni senzor. Z vidika uporabe v fotogrametriji pa fotoaparate delimo tudi na merske in nemerske. Merski fotoaparati so posebej konstruirani za fotogrametrična slikanja, saj so robustni, stabilni in, kar je najpomembneje, imajo kalibrirane vrednosti parametrov notranje orientacije. Parametri notranje orientacije (konstanta fotoaparata, položaj glavne točke na sliki in distorzija objektiv) opisujejo glavne geometrijske lastnosti idealizirane preslikave centralne projekcije, obenem pa definirajo merski slikovni koordinatni sistem. Nemerski fotoaparati so običajni uporabniški (amaterski) fotoaparati, ki so kakovostni ter cenovno dokaj dostopni. Njihova največja slabost je ta, da uporabljajo spremenljivo optiko ter imajo nestabilne in običajno neznane parametre notranje orientacije, zato so z vidika fotogrametrije uporabni le, če jih predhodno kalibriramo. Kljub omenjenim slabostim uporaba amaterskih fotoaparatorov v fotogrametriji narašča, saj se njihova kakovost zaradi tehnološkega razvoja izboljšuje.

Nemerske fotoaparate lahko kalibriramo sami z izbranim postopkom kalibracije. V diplomski nalogi je uporabljena kalibracija digitalnega fotoaparata na testnem polju, ki je vzpostavljeno v kletnih prostorih UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo z namenom testiranja laserskega skenerja. Testno polje predstavljajo prostorsko razporejene ter ustrezno signalizirane točke, katerih prostorske koordinate so bile predhodno določene s klasično metodo izmere. Parametri notranje orientacije se nato izračunajo v postopku izravnave bloka snopov (angl. bundle block adjustment), kamor so vključeni vsi posnetki.

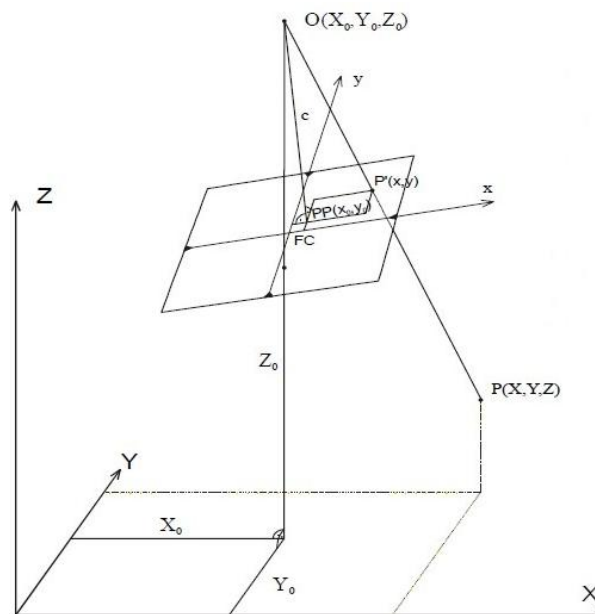
Diplomsko nalogo smo razdelili na uvod (prvo poglavje), tri vsebinska poglavja in zaključek. V drugem poglavju smo predstavili teoretične osnove centralne projekcije in direktne linearne transformacije ter opisali ključne metode kalibracije. Tretje poglavje vključuje opis praktične izvedbe kalibracije po korakih, v četrtem poglavju pa smo predstavili rezultate obdelave ter njihovo analizo in interpretacijo.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Centralna projekcija

Kadar govorimo o centralni projekciji v fotogrametriji, želimo predvsem matematično opisati odnose med objektom, ki ga slikamo, fotoaparatom ter sliko. Preslikava objekta v centralni projekciji se izvaja po zakonih projekтивne geometrije, katere rezultat pa je perspektivna slika. Razmerja med objektom in njegovo perspektivno sliko ob preslikavi so trajno ohranjena na sliki in jih lahko ponovno obnovimo. Tudi fotografija ima lastnosti perspektivne slike, zato je uporabna za rekonstruiranje oblike, velikosti slikanega objekta in določanje prostorske lokacije (Gorjup, 2001).

Če želimo na osnovi fotografije rekonstruirati položaj in obliko snemanega objekta, moramo poznati geometrijske zakone, ki veljajo za perspektivno projekcijo. Osnovno izhodišče modela centralne projekcije predstavlja kolinearnost treh točk: objektne točke, projekcijskega centra in slikovne točke. Vse te tri točke morajo torej ležati na skupni premici. Omenjena lastnost perspektivne projekcije izhaja iz dejstva, da svetloba, ki se odbija od fotografiranega objekta, potuje preko projekcijskega centra do svetlobnega tipala. Projekcijski center O predstavlja skupno točko, v kateri se zbirajo vsi projicirni žarki. Projicirne žarke si lahko v geometrijskem smislu predstavljamo kot premice, ki potujejo od vsake točke P objekta preko projekcijskega centra O do slikovne ravnine, ki jo prebadajo v slikovni točki P' (slika 1). Projicirni žarek, ki poteka skozi projekcijski center in je pravokoten na slikovno ravnino, prebada slikovno ravnino v glavni točki posnetka PP s koordinatami (x_0, y_0) . Razdalja med glavno točko PP in projekcijskim centrom O je konstanta fotoaparata c (Gorjup, 2001).



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

Slikovne koordinate se nanašajo na slikovni koordinatni sistem (3D), ki ima izhodišče v projekcijskem centru posnetka. Projekcijski center je za konstanto kamere pravokotno oddaljen od slikovne ravnine (glavne točke posnetka). Smeri osi x in y definirajo robne marke na posnetku, os z je usmerjena tako, da dobimo desnosučni kartezični koordinatni sistem. Na digitalni sliki dvodimenzionalne koordinate definiramo s pikselnim koordinatnim sistemom (z vrstico in stolpcem, kjer se nahaja piksel), medtem ko je na analognem posnetku merski koordinatni sistem definiran z robnimi markami merske kamere (Kosmatin Fras, 2011).

Povezava med slikovnimi koordinatami točke P' in prostorskimi koordinatami objektne točke P (X, Y, Z) je matematično definirana v naslednjih enačbah perspektivne projekcije (Kraus, 1993):

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

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

Iz sistema enačb (1) je razvidno, da moramo za orientacijo posnetka v prostoru poznati devet neodvisnih parametrov, ki jih tvorijo:

- trije parametri notranje orientacije ter
- šest parametrov zunanje orientacije.

Pojem notranje orientacije se nanaša na snemalni sistem in definira notranje odnose v snemalnem sistemu v času ekspozicije. Parametri notranje orientacije določajo položaj projekcijskega centra glede na slikovno ravnino. Mednje uvrščamo slikovni koordinati x_0, y_0 glavne točke (PP) posnetka in goriščno razdaljo c (konstanto kamere). Parametri zunanje orientacije omogočajo rekonstrukcijo položaja in nagiba fotoaparata v prostorskem koordinatnem sistemu. Tvorijo jih prostorske koordinate X_0, Y_0, Z_0 projekcijskega centra O ter zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem (ω, φ, κ). Zasuki slikovnega koordinatnega sistema so v sistemu enačb (1) izraženi posredno v obliki parametrov r_{ij} prostorske rotacijske matrike R , pri čemer ω predstavlja kot rotacije okoli osi x , φ kot rotacije okoli osi y in κ kot rotacije okoli osi z (Kraus, 1993).

Šest parametrov zunanje orientacije lahko izračunamo z različnimi metodami (Kosmatin Fras, 2011):

- za posamezen posnetek z metodo notranjega ureza (s pomočjo oslonilnih točk, za katere poznamo točno lokacijo v slikovnem in objektovem koordinatnem sistemu),
- za stereopar z dvostopenjsko metodo (relativna in absolutna orientacija),
- za fotogrametrični blok posnetkov s projektom aerotriangulacije.

Parametri notranje orientacije so pri merskih fotoaparatih običajno že poznani, saj jih v okviru laboratorijskih meritev določi proizvajalec snemalne tehnike. Kadar imamo opravka z nemerskimi fotoaparati, moramo parametre notranje orientacije določiti sami, in sicer z izbrano metodo kalibracije tik pred ali sočasno s snemanjem objekta za določeno nalogo.

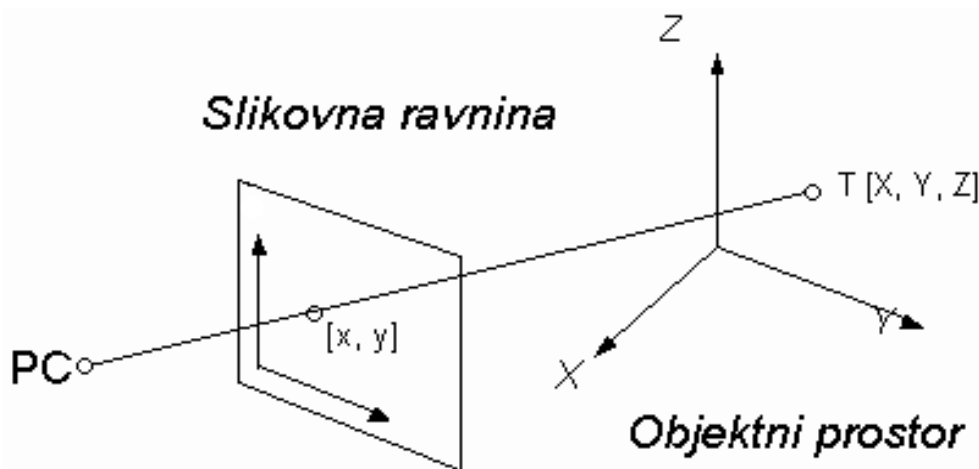
S postopkom kalibracije fotoaparata želimo poleg določitve elementov x_0, y_0, c ugotoviti tudi optično distorzijo objektiva. Optična distorzija objektiva je sistematična napaka objektiva (fotoaparata), ki povzroča geometrijsko nepravilno preslikavo. Posledica distorzije je, da vstopni in izstopni kot žarka nista enaka glede na matematično os, kar povzroči geometrijski premik preslikane točke. Ločimo več komponent distorzije:

- simetrična radialna distorzija,
- nesimetrična distorzija (radialna in tangencialna komponenta).

Največji del k skupni distorziji objektiva prispeva simetrična radialna distorzija, medtem ko je vrednost nesimetrične distorzije v primerjavi s simetrično skorajda zanemarljiva. V enačbi centralne projekcije (1) optična distorzija ni vsebovana, zato jo moramo naknadno matematično odpraviti v obliki popravkov. Parametre distorzije, ki jih določimo v postopku kalibracije, uporabimo za popravo slikovnih koordinat (Kosmatin Fras, 2011).

2.2 Direktna linearna transformacija

V poglavju 2.1 smo definirali odnos med objektom, fotoaparatom in sliko, ki je matematično opisan s centralno projekcijo. Drug matematični model, ki se prav tako uporablja v fotogrametriji in sledi zakonom projektivne geometrije, je direktna linearna transformacija (na kratko DLT).



Slika 2: Prikaz direktne linearne transformacije (Kwon, 1998)

Na sliki 2 je prikazana povezava med objektom v prostoru in njegovo sliko na posnetku v primeru uporabe matematičnega modela DLT. S slike je razvidno, da je koordinatni sistem v slikovni ravnini pri DLT poljuben ravninski koordinatni sistem in ne slikovni koordinatni sistem, kot pri centralni projekciji.

Enačbe za DLT lahko izpeljemo iz enačb centralne projekcije, saj gre za matematični opis istih povezav med objektom in njegovo sliko. Dobljeni sistem enačb (2) je širše poznan tudi kot splošni matematični model kolinearnosti (Kraus, 1997):

$$x = \frac{a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1}$$
$$y = \frac{b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1}$$
(2)

Pomembna lastnost DLT je v tem, da na sliki ni potrebno definirati glavne točke avtokolimacije (angl. principal point of autocollimation), ki jo fizikalno lahko določimo le z laboratorijsko kalibracijo. Za merjenje koordinat x in y na sliki lahko torej izberemo poljuben ravninski koordinatni sistem, če uporabljamo analogne fotografije tako tudi ne potrebujemo robnih mark. Posledično parametrov v enačbah DLT ne moremo interpretirati fizikalno, saj neposredno ne predstavljajo posameznih parametrov notranje in zunanje orientacije. Parametre notranje in zunanje orientacije pa naknadno lahko določimo iz parametrov DLT.

Druga pomembna razlika DLT v primerjavi s centralno projekcijo je, da sistem enačb DLT vsebuje 11 parametrov, torej dva več, kot osnovna enačba centralne projekcije. Ta dodatna parametra lahko razložimo kot spremembo merila v smeri x in smeri y ter nepravokotnost med osema x in y , kar je še posebej za nemerske slike zelo ugodna lastnost matematičnega modela.

Poleg opisanih prednosti modela DLT pa ima le-ta tudi nekatere slabosti (Kraus, 1997):

- Večje število neznanih parametrov zahteva tudi večje število oslonilnih točk, kot bi jih bilo potrebno v primeru uporabe centralne projekcije.
- Rešitev sistema DLT postane nestabilna, ko vse oslonilne točke ležijo v isti ravnini ali ležijo v skoraj isti ravnini. Temu se lahko izognemo z dobro prostorsko razporeditvijo oslonilnih točk.

DLT je torej uporabna predvsem takrat, ko imamo opravka z nemerskimi fotoaparati, oziroma kadar parametri notranje orientacije niso poznani. Pri izvedbi kalibracije po tej metodi pa moramo zagotoviti

dovolj veliko število oslonilnih točk (najmanj 6 za posnetek; pri uporabi centralne projekcije jih potrebujemo najmanj 3), ki morajo biti primerno prostorsko razporejene (predvsem ne smejo vse ležati v isti ravnini). V primeru naše naloge smo te pogoje izpolnili.

2.3 Metode kalibracije

Kalibracijo fotoaparata lahko razumemo kot nasproten postopek običajnega fotogrametričnega postopka merjenja koordinat. Pri fotogrametričnem merjenju koordinat običajno poznamo parametre notranje orientacije in določamo koordinate objektnih točk. Ravno nasprotno pa je pri postopku kalibracije, kjer poznamo koordinate objektnih točk ter njihove slikovne koordinate in želimo določiti parametre notranje orientacije. V postopku kalibracije tako določamo (Kraus, 1997):

- koordinati glavne točke x_0, y_0 in konstanto kamere (goriščno razdaljo) c v slikovnem koordinatnem sistemu,
- simetrično radialno distorzijo ter
- tangencialno ali nesimetrično distorzijo.

Na voljo je več metod kalibracije, ki se uporabljajo za različne fotogrametrične namene. Med najpogostejšimi so laboratorijska kalibracija z uporabo goniometra, kalibracija na podlagi poznanih oblik v prostoru, kalibracija na testnem polju točk z neznanimi prostorskimi koordinatami, kalibracija na testnem polju točk z znanimi prostorskimi koordinatami ter samokalibracija (Kraus, 1997). V poglavju bomo na kratko predstavili zgoraj omenjene metode ter podrobneje prikazali zgolj kalibracijo na testnem polju točk z znanimi prostorskimi koordinatami, ki smo jo uporabili v praktičnem delu diplomske naloge.

2.3.1 Laboratorijska kalibracija z uporabo goniometra

Laboratorijska kalibracija z uporabo goniometra se uporablja predvsem za kalibriranje profesionalnih fotogrametričnih fotoaparata v aerofotogrametriji. Metoda izkorišča dejstvo, da parametri notranje orientacije posredno opisujejo geometrijo vstopnega snopa žarkov ter geometrijo izstopnega snopa žarkov. Goniometer je naprava, ki omogoča vzpostavitev v prostoru definirane vstopnega žarka in spremljanje izstopnega žarka. Na podlagi različnih vstopnih kotov in sprememb izstopnih kotov lahko določimo parametre notranje orientacije (Kraus, 1997).

2.3.2 Kalibracija na podlagi poznanih oblik v prostoru

Za izračun notranje orientacije se lahko uporabijo poleg kartezičnih koordinat točk (testnega polja) tudi druge informacije v prostoru. Ena od možnosti je uporaba medsebojno pravokotnih parov vzporednih linij na posnetku, kot so na primer robovi objekta. Skozi linije v prostoru ter njihove slike

na posnetku lahko definiramo ravnine, ki se sekajo v projekcijskem centru. Z izbiro več parov linij, ki so med seboj pravokotne, pridobimo dovolj podatkov za izračun notranje orientacije. Druga metoda pa je uporaba vzporednih linij, ki izkorišča dejstvo, da je ravna linija v idealni preslikavi tudi na sliki ravna (Kraus, 1997).

2.3.3 Kalibracija na testnem polju točk z neznanimi prostorskimi koordinatami

Ta metoda ne zahteva niti prostorsko razporejenih točk v testnem polju niti njihovih prostorskih koordinat. Kalibracija temelji na večjem številu posnetkov z istimi delovnimi nastavitvami fotoaparata. "Prostorska narava" testnega polja se upošteva z različnimi postavitvami in usmerjenostjo kamere, pri čemer mora biti vsaka objektna točka vidna vsaj na treh posnetkih. Kalibracijo na testnem polju točk z neznanimi koordinatami ali z nekaj oslonilnimi točkami lahko opravimo v okviru izravnave bloka snopov z neznanjo notranjo orientacijo. Kalibracija je lahko izvedena kot del takšne izravnave, v kolikor je na voljo zadostno število kontrolnih in veznih točk z ustrešno postavitvijo (Kraus, 1997).

2.3.4 Samokalibracija

Metoda samokalibracije (angl. self-calibration) za izračun notranje orientacije ne potrebuje nobenih kartezičnih podatkov o prostoru (koordinat). Vhodni podatki so slikovne koordinate detajlnih objektnih točk, izmerjene na več perspektivno različnih posnetkih. Elementi notranje orientacije se določijo ali izboljšajo v okviru izravnave bloka snopov. Primerna izbira uteži opazovanjem nam omogoča, da ločimo med popolnoma neznanimi elementi notranje orientacije in elementi z omejeno natančnostjo, ki potrebujejo popravke. Prednost te metode pred laboratorijsko je predvsem v tem, da sta tako kalibracija kot fotografiranje izvedena pod istimi pogoji okolja (Kraus, 1997).

2.3.5 Kalibracija na testnem polju točk z znanimi prostorskimi koordinatami

Testno polje predstavljajo prostorsko razporejene in ustrezno signalizirane objektne točke, katerih prostorske koordinate morajo biti predhodno določene. Običajno so le-te določene v okviru klasične geodetske izmere z elektronskim tahimetrom, ki dosega natančnost enega milimetra ali bolje. Točke običajno namestimo na objekt tako, da so prostorsko čim bolj enakomerno razporejene v smereh vseh treh koordinatnih osi. Na sliki 3 je prikazan Inštitut za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na Dunaju, kjer imajo testno polje vzpostavljeno kar na stavbi inštituta in je prostorska razporeditev točk ustrezna.



Slika 3: Testno polje na Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na Dunaju (Kraus, 1997)

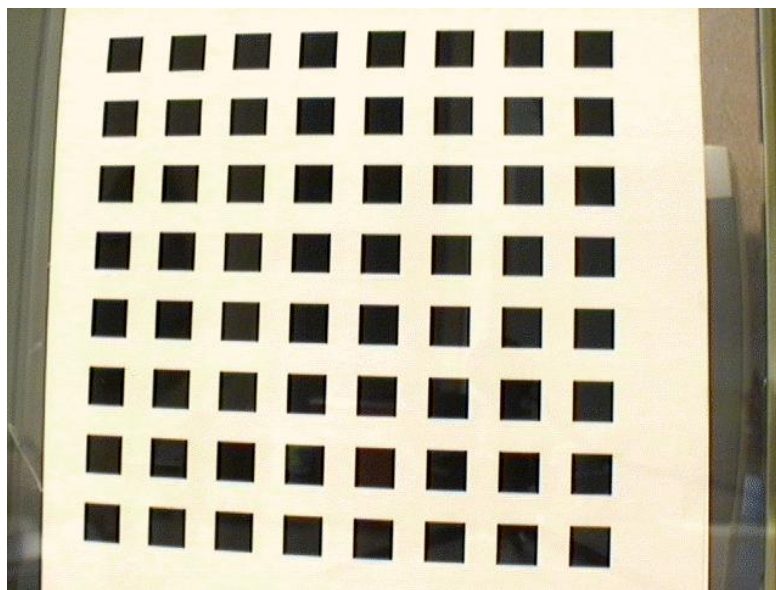
Signaliziranju točk moramo posvetiti nekaj pozornosti, saj nam lahko bistveno olajša delo ter omogoči večje natančnosti. Tradicionalne oblike signaliziranja predstavljajo risalni žeblički z belo glavo, ki so primerni za lesena ozadja, medtem ko so za betonska ozadja primerne že majhne barvne točke. Danes se namesto tradicionalnih signalov priporoča uporaba tarč z odbojno folijo (retro-reflektivnih tarč), ki delujejo zelo kontrastno na temnem ozadju. Dobra vidljivost točk olajša ročno merjenje slikovnih koordinat ter ustvari dobre pogoje za njihovo avtomatsko merjenje, ki omogoča še večje natančnosti (Kraus, 1997).

Po opravljeni prostorski razporejenosti in signaliziranju točk sledi fotografiranje testnega polja. S fotoaparatom napravimo ustrezno število posnetkov tako, da točke pokrijejo kar se da celotno površino posnetka. Pazimo, da imamo na vseh posnetkih iste delovne nastavitve fotoaparata. Elementi notranje in zunanje orientacije se nato določajo v sklopu izravnave bloka snopov, v katero so vključeni vsi posnetki. Ta metoda kalibracije se najpogosteje uporablja v terestrični fotogrametriji.

Kot smo že omenili, nam podatke o kalibraciji za merske fotoaparate poda kar sam proizvajalec snemalnega sistema, vendar je potrebno za zagotavljanje ustrezne kakovosti fotogrametričnih meritev kalibracijo izvajati v rednih časovnih intervalih. Tako pri merskih fotoaparatih kot tudi pri nemerskih je težava predvsem v časovni spremenljivosti elementov notranje orientacije. Te težave so bistveno večje pri nemerskih fotoaparatih, ki so konstrukcijsko manj stabilni, saj niso izdelani za namene fotogrametričnih meritev. Časovno spremenljivost parametrov notranje orientacije nemerskih fotoaparatorov je v svoji diplomski nalogi obravnaval Kvaternik (2007). Ugotovil je, da manjše spremembe vrednosti parametrov notranje orientacije ne vplivajo na rezultat, v kolikor gre za fotogrametrične naloge, kjer je zahtevana natančnost velikostnega reda nekaj centimetrov. V takih

primerih je uporaba nemerskih fotoaparata zadovoljiva, vendar pa je potrebno pazljivo ravnati s fotoaparatom ter ga varovati pred ekstremnimi zunanji vplivi.

Iz zgoraj omenjenih razlogov je kalibracijo merskih in nemerskih fotoaparata smiselno izvajati na vzpostavljenem testnem polju točk, saj imamo tako možnost ponovitve kalibracije v različnih časovnih intervalih. Slabost te metode je predvsem zamudna vzpostavitev testnega polja, ki zahteva tudi vzdrževanje ter dodatne geodetske meritve. Za kalibracijo nemerskih fotoaparata je zato primernejša metoda kalibracije z ravninskim testnim poljem. Pri tej metodi predstavlja testno polje na ravno podlago nanosena mreža točk z znanimi koordinatami (pike, mreža kvadratov), kot je prikazano na sliki 4. Metoda kalibracije z ravninskim poljem je primerna zgolj za digitalne fotoaparate ter samodejne postopke merjenja, saj je pri analognih fotoaparatih in ročnem merjenju število meritev preobsežno. Takšno testno polje je za digitalne fotoaparate zelo praktično, saj je majhnih dimenzij in omogoča enostaven izračun kalibracije.



Slika 4: Prikaz ravninskega testnega polja (Zhang, 1998)

3 PRAKTIČNA IZVEDBA KALIBRACIJE

V praktičnem delu naloge smo opisali postopek kalibracije, ki smo jo izvedli na testnem polju v kletnih prostorih UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Za preizkus smo uporabili enega od nemerskih fotoaparatorov, saj ti prihajajo v vedno večjo veljavo v nalogah fotogrametrije, še posebej kjer je zadostna nekaj centimeterska natančnost. Izbrali smo kalibracijo na testnem polju točk z znanimi prostorskimi koordinatami, saj smo želeli izkoristiti že vzpostavljeno testno polje. Naša prvotna želja je bila določiti parametre notranje orientacije z metodo samokalibracije v okviru programskega paketa AeroSys. Med obdelavo so se pokazale težave, ki jih nismo predvideli in so podrobneje predstavljene na koncu poglavja 4.2. Rezultati samokalibracije niso bili zanesljivi, zato smo za izračun notranje orientacije uporabili metodo DLT. Notranja orientacija nam je kot vhodni podatek služila v izravnavi aerotriangulacije, kjer smo določili še parametre zunanje orientacije. Tako parametre notranje kot zunanje orientacije smo v zadnjem koraku uporabili v programu Socet Set, kjer smo opravili kontrolne meritve 3D koordinat oslonilnih točk.

V tem poglavju predstavimo uporabljen zrcalno-refleksni fotoaparater in testno kalibracijsko polje. V nadaljevanju opišemo postopek snemanja ter podrobneje prikažemo postopek obdelave po posameznih fazah.

3.1 Zrcalno - refleksni fotoaparater Nikon D70

V preizkusu smo uporabili digitalni zrcalno-refleksni fotoaparater Nikon D70 z objektivom AF-S DX Zoom-Nikkor (slika 5). Fotoaparater danes uvrščamo med manj zmogljive zrcalno-refleksne fotoaparate na tržišču, saj njegovo število efektivnih pikslov dosega 6,1 milijona, medtem ko so danes po dostopnih podatkih na voljo že fotoaparater s 36,3 milijona slikovnih točk (Nikon, 2012). Kljub temu je ta fotoaparater zadostoval za izvedbo praktičnega preizkusa pri diplomski nalogi.



Slika 5: Fotoaparater Nikon D70 z objektivom AF-S DX Zoom-Nikkor (Nikon, 2012)

Pomembnejše tehnične specifikacije fotoaparata Nikon D70 in objektivu AF-S DX Zoom-Nikkor so predstavljene v preglednici (1).

Preglednica 1: Tehnični podatki fotoaparata Nikon D70 in objektivu AF-S DX Zoom-Nikkor (Nikon, 2012)

Fotoaparat Nikon D70	
Skupno število slikovnih točk	6,4 milijona
Efektivno število slikovnih točk	6,1 milijona
Svetlobno tipalo	senzor CCD: 23,7 mm x 15,6 mm
Maksimalna ločljivost	3008 x 2000
Občutljivost ISO	ISO 200-1600
Čas ekspozicije	1/8000-30 s
Objektiv AF-S DX Zoom-Nikkor f/3.5-4.5G IF-ED	
Goriščna razdalja	18-70 mm
Največja vrednost zaslonke	f/3,5-4,5
Najmanjša vrednost zaslonke	f/22

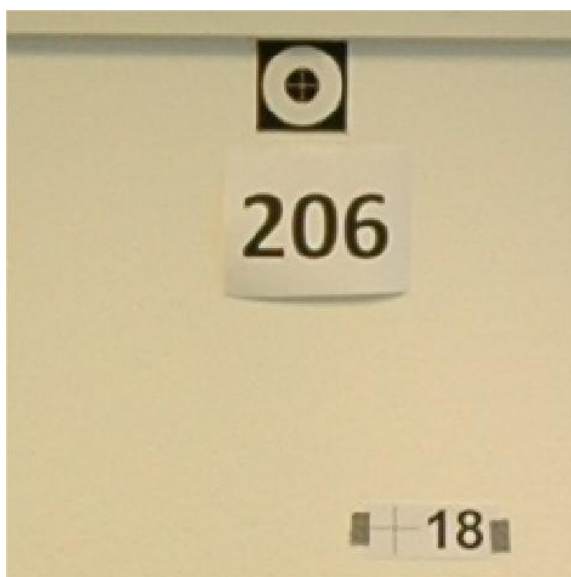
3.2 Testno kalibracijsko polje

Kot smo že omenili, smo za kalibracijsko polje izkoristili vzpostavljeno polje točk v kletnih prostorih UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Testno polje sestavlja večje število točk (61), ki so prostorsko razporejene po stenah in stropu. Prostorske koordinate točk so bile določene z natančnostjo velikostnega reda dveh desetink milimetra v okviru klasične geodetske izmere s tahimetrom Leica TPS 1201+, Izmero je izvedel asist. Klemen Kregar in nam posredoval koordinate oslonilnih točk. Točke so bile oštevilčene in signalizirane v obliki tarč ter so bile dobro vidne na fotografijah. Za potrebe izvedbe kalibracije smo vključili le tiste točke (dvajset točk), ki so prikazane na sliki 6 in so nam v postopku služile kot oslonilne točke.



Slika 6: Testno kalibracijsko polje na UL Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo

Da bi omogočili enakomerno razporejenost točk na posnetkih in izboljšali prekrivanje med posnetki, smo dvajsetim oslonilnim točkam dodali še 31 veznih točk. Za vezne točke nimamo podatka o prostorskih koordinatah, ampak izmerimo samo njihove koordinate na posnetkih, objektne pa se nato izračunajo med izravnavo bloka posnetkov. Nekatere vezne točke so bile signalizirane s tarčami, druge pa so bile le dobro definirane točke v prostoru (pike na stebrih, vratih, steni). Na sliki 7 sta prikazani signalizirani točki, in sicer oslonilna točka 206 ter vezna točka 18.



Slika 7: Signalizirani oslonilna in vezna točka

3.3 Postopek snemanja

Snemanje testnega polja smo prvotno izvedli z različnih stojišč in v različnih smereh, saj smo želeli zajeti čim več točk ter izkoristiti njihovo prostorsko razporejenost. Kot smo omenili, so se med obdelavo pokazale omejitve v programski opremi AeroSys, zaradi česar smo morali spremeniti tudi postopek fotografiranja ter ga prilagoditi zahtevam letalskega snemanja. Glede na velikost testnega polja smo se odločili, da bomo polje fotografirali v dveh pasovih s štirimi posnetki in ustvarili dobro prekrivanje. Način fotografiranja je bil tako analogen letalskemu snemanju, saj smo ustvarili blok osmih posnetkov, kot prikazuje slika 8.



Slika 8: Blok osmih posnetkov v dveh pasovih

Pred samim pričetkom fotografiranja je bilo potrebno izbrati ugodne nastavitve fotoaparata, ki bi zagotovile čim bolj kakovostne fotografije testnega polja. Pri tem mislimo predvsem na globinsko ostrino, ki smo jo uravnavali z vrednostjo zaslonke, časom osvetlitve (ekspozicije) in občutljivostjo.

Izbrali smo naslednje vrednosti:

- zaslonka $F = 5,6$,

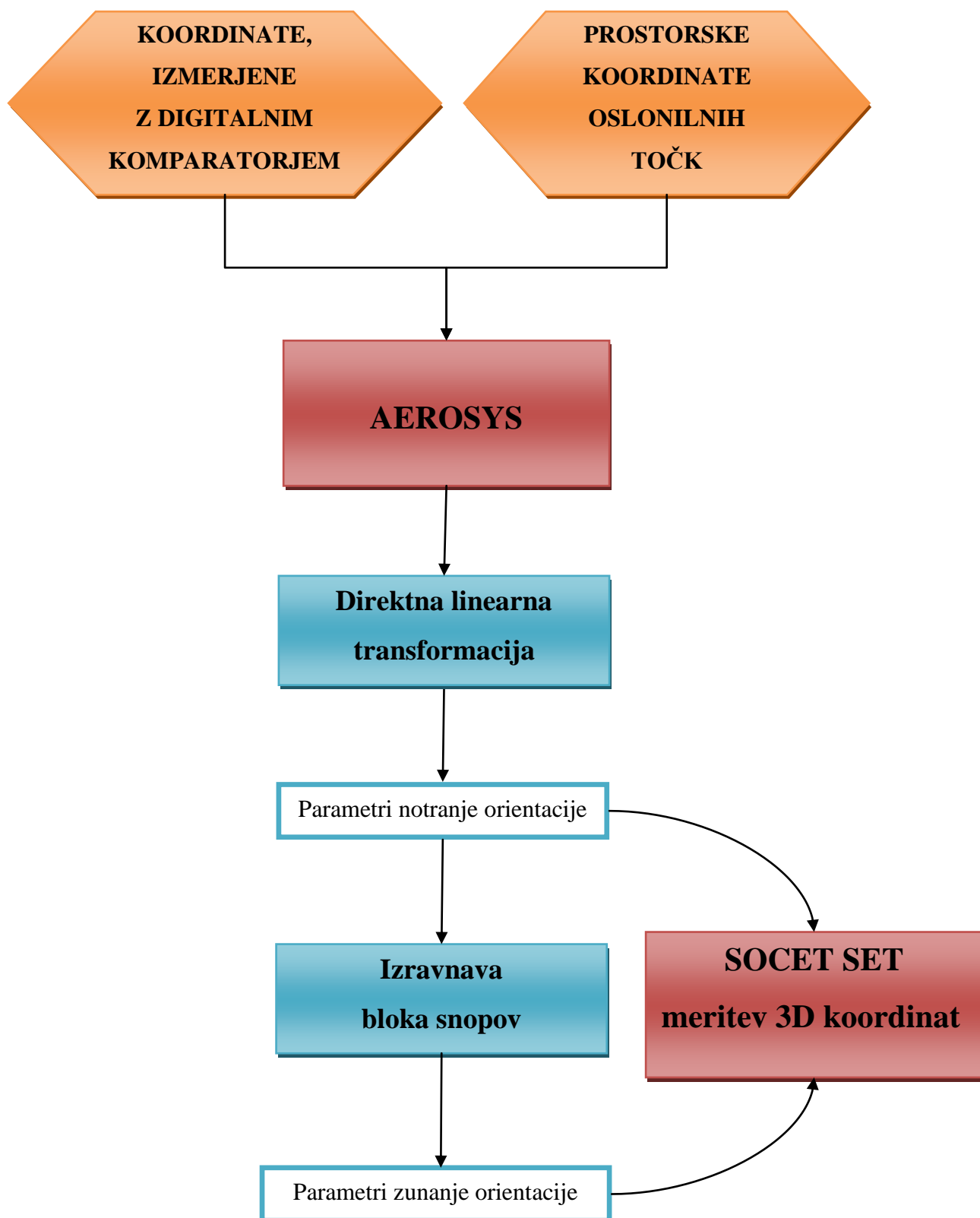
- čas ekspozicije $t = \frac{1}{30} s$,
- občutljivost $ISO = 320$.

Približna vrednost goriščne razdalje je znašala 24 mm.

Fotoaparatusmo pritrdili na stativ, tako da je med fotografiranjem miroval in ohranjal stabilno notranjo geometrijo. Ko smo opravili štiri posnetke prvega pasu, smo višino fotoaparata zmanjšali in naredili nov pas posnetkov. Naredili smo tudi dva posnetka z večje oddaljenosti, ki vključujeta večino oslonilnih točk, in ju uporabili v postopku po metodi DLT.

3.4 Postopek obdelave

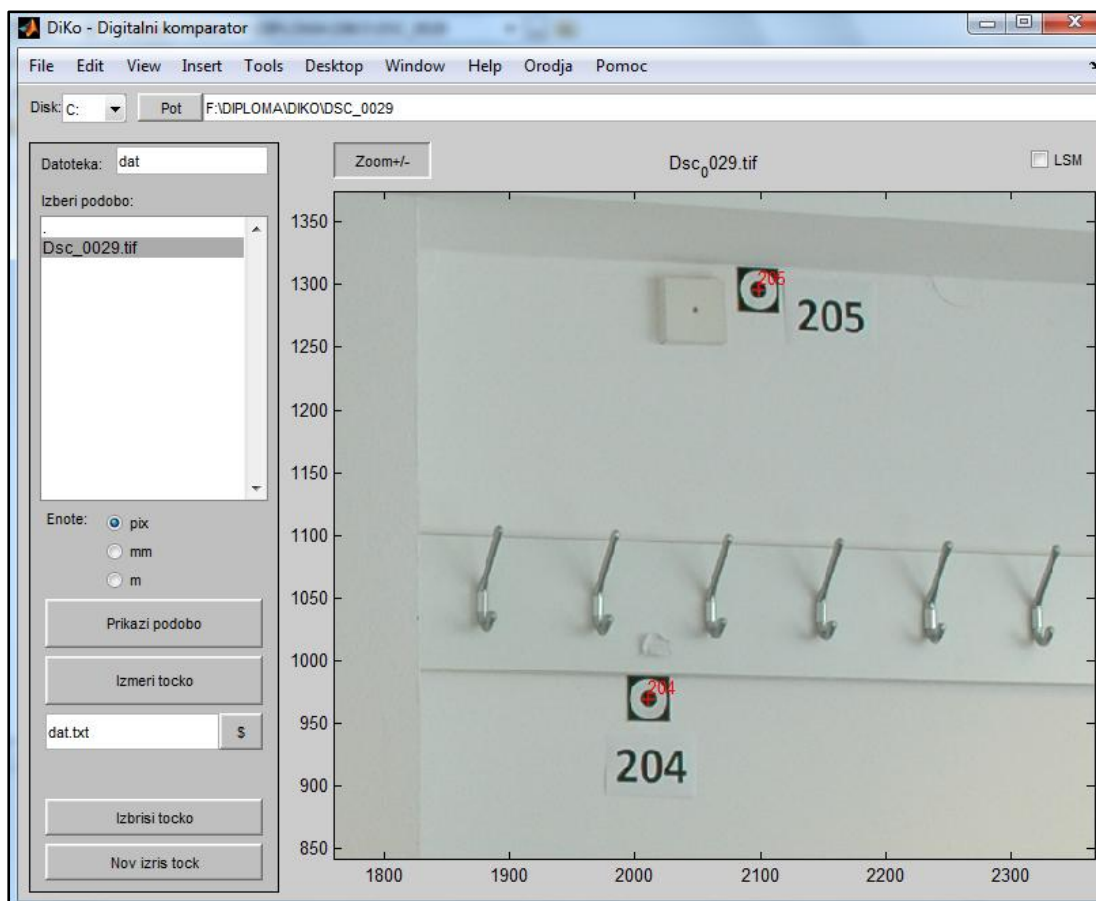
Na sliki 9 je shematsko prikazan postopek obdelave. V prvi fazi smo pripravili vhodne podatke za obdelavo, in sicer prostorske koordinate oslonilnih točk ter izmerjene koordinate oslonilnih in veznih točk. Kot smo že omenili, smo prostorske koordinate pridobili od asist. Klemna Kregarja, ki je opravil klasično izmero na testnem polju. S programom DiKo (digitalnim komparatorjem), avtorja asist. dr. Dejana Grigilla, smo opravili še meritve koordinat oslonilnih in veznih točk. Za nadaljnjo obdelavo smo uporabili programski paket AeroSys, avtorja dr. Matta H. Stevensa, ki je v osnovi namenjen obdelavi aerosnemanja, omogoča pa tudi številne druge aplikacije kot je kalibracija. V okviru programa AeroSys smo izvedli postopek DLT, katerega rezultat so bili izračunani parametri notranje orientacije. Ti so služili kot vhodni podatek v izravnavi bloka snopov, kjer smo dobili še parametre zunanje orientacije. V zadnji fazi smo parametre notranje in zunanje orientacije vnesli v program Socet Set, kjer smo izvedli kontrolne meritve 3D koordinat točk.



Slika 9: Shema postopka obdelave

3.4.1 Merjenje koordinat z digitalnim komparatorjem

V prvi fazi obdelave smo na vseh posnetkih izmerili koordinate oslonilnih in veznih točk z digitalnim komparatorjem DiKo, kot je prikazano na sliki 10. Pri tem smo poskušali čim natančneje določiti center tarče. Koordinate, ki smo jih pridobili v tem postopku, predstavljajo vhodni podatek za DLT ter izravnavo bloka snopov.



Slika 10: Merjenje koordinat z digitalnim komparatorjem

3.4.2 Direktna linearna transformacija

Kot smo omenili v poglavju 2.2, se v postopku DLT določijo parametri notranje orientacije. Vhodni podatki so prostorske koordinate oslonilnih točk ter z digitalnim komparatorjem izmerjene koordinate oslonilnih in veznih točk. DLT smo izvedli v programu AeroSys, ki omogoča to aplikacijo. Prostorske koordinate oslonilnih točk smo morali predhodno zasukati, saj je program ustvarjen za obdelavo letalskih posnetkov, kjer koordinata Z kaže v globino. Takšno situacijo smo morali ustvariti tudi v našem primeru testnega polja.

3.4.3 Izravnava bloka snopov

Izravnavo bloka snopov smo kot naslednjo fazo izvedli v programu AeroSys. Pred samo izvedbo izravnave je bilo potrebno opraviti številne postopke. V prvem koraku smo v program vnesli parametre notranje orientacije (rezultat DLT), torej podatek o uporabljenem fotoaparatu. Sledila je priprava vhodnih datotek za izravnavo:

- datoteka oslonilnih in kontrolnih točk *.CTL in
- datoteka merjenih koordinat točk na vseh posnetkih *.PTB.

CTL						
oslonilne točke						
ID	X	Y	Z	Sxy	Sz	
112	90.4664	100.6030	83.5600	0.001	0.001	3D oslonilne točke
113	90.4930	101.2284	82.4141	0.001	0.001	
115	90.5053	101.6756	80.4103	0.001	0.001	
201	92.0460	101.9347	80.5492	0.001	0.001	
202	92.0061	100.6771	80.4120	0.001	0.001	
203	92.8317	100.0882	80.4174	0.001	0.001	
204	93.3422	101.1385	80.0817	0.001	0.001	
205	93.5307	101.7768	80.0821	0.001	0.001	
206	94.6050	101.1399	80.0833	0.001	0.001	
207	95.3324	100.4916	80.0843	0.001	0.001	
209	96.0192	99.8812	80.4481	0.001	0.001	
301	96.2722	100.0852	81.6894	0.001	0.001	
509	95.7350	101.9549	81.4623	0.001	0.001	
510	94.6845	101.9574	82.1904	0.001	0.001	
513	92.0569	101.9637	82.3439	0.001	0.001	
514	92.6088	101.9640	81.8609	0.001	0.001	
515	92.6203	101.9699	80.8918	0.001	0.001	
601	93.4297	100.3615	81.6266	0.001	0.001	
-99						
116	90.5067	100.6644	80.4086	0.001	0.001	3D kontrolne točke
208	95.4921	101.9270	80.4578	0.001	0.001	
-99						

Slika 11: Struktura datoteke *.CTL

Kot smo omenili, datoteka *.CTL vsebuje prostorske koordinate (X, Y, Z) oslonilnih in kontrolnih točk ter njihove natančnosti (Sxy, Sz). Razlika med oslonilnimi in kontrolnimi točkami je v tem, da prve aktivno, druge pa pasivno sodelujejo v izravnavi. Odstopanja na kontrolnih točkah nam povedo, kakšna je kvaliteta aerotriangulacije. Iz slike 11 je razvidno, da smo imeli na voljo 18 oslonilnih točk ter dve kontrolni točki (116 in 208).

Datoteka *.PTB vsebuje meritve koordinat oslonilnih in veznih točk s programom DiKo. Datoteka vsebuje meritve na vseh osmih posnetkih, zato je precej obsežna. Struktura datoteke *.PTB za prvi posnetek je prikazana na sliki 12.

22	1			oznaka posnetka
	1	0.5	2000.5	
	2	3008.5	2000.5	koordinate robnih mark
	3	0.5	0.5	
	4	3008.5	0.5	
	112	727.7231	328.5843	
	115	1307.0152	1464.5517	
	116	1306.9561	847.0073	
	11	1556.5357	1508.6421	
	12	1370.5449	986.3147	
	13	1369.3343	236.2786	koordinate oslonilnih in veznih točk
	201	2273.2706	1640.3685	
	26	2106.5282	1492.5766	ID x y
	27	2115.5525	871.5939	
	202	2225.8789	850.8178	
	28	2104.4121	245.6457	
	515	2720.6403	1708.9004	
	14	2711.5682	1512.4749	
	15	2713.9991	1045.5385	
	204	2960.1163	1129.6000	
	203	2726.5174	489.6762	
	16	2703.5074	216.1598	
	1001	568.8569	1551.6422	
	1002	663.4869	39.7362	
	2001	2847.8186	1584.4851	
	4001	2597.4361	801.6031	
	4002	2572.5316	46.1848	
	-99			

Slika 12: Struktura datoteke *.PTB

Definirali smo blok osmih posnetkov v dveh pasovih:

1. pas 4 posnetki: 22-25
2. pas 4 posnetki: 26-29

V naslednjem koraku je sledila pretvorba vhodnih podatkov v program AeroSys, in sicer tako, da smo podatke iz enot piksla pretvorili v milimetre. V predhodni obdelavi so se nato določile vse približne vrednosti neznanek v izravnavi opazovanj aerotriangulacije, pozorni pa smo bili tudi na morebitne grobe pogreške. V zadnjem koraku smo izvedli izravnavo bloka snopov in preverili rezultate izravnave.

3.4.4 Meritev 3D koordinat v Socet Set-u

Zadnjo fazo v našem praktičnem preizkusu je predstavljalo delo v programskem paketu Socet Set. Socet Set se v praksi uporablja za natančnejše naloge fotogrametrije in predstavlja digitalno fotogrametrično postajo, ki omogoča izvajanje fotogrametričnih meritev na posnetkih. V praktičnem preizkusu smo uporabili program Socet Set zgolj za meritev objektnih 3D koordinat oslonilnih točk. Vhodni podatek v Socet Set predstavljajo parametri notranje orientacije, ki smo jih pridobili z metodo DLT ter parametri zunanje orientacije, pridobljeni z izravnavo aerotriangulacije. S pridobitvijo objektnih koordinat smo izračunali odstopanja od danih prostorskih koordinat in srednje kvadratne odklone ter tako opravili kontrolo kakovosti izvedene kalibracije.

4 REZULTATI OBDELAVE IN NJIHOVA ANALIZA TER INTERPRETACIJA

V tem poglavju smo strnili rezultate vseh faz obdelave in jih interpretirali.

4.1 Direktna linearna transformacija

V prvi fazi obdelave, torej izračunu parametrov z DLT, smo pridobili parametre notranje orientacije: goriščno razdaljo c in koordinati x_0, y_0 glavne točke. Ker smo v postopku DLT uporabili dva posnetka, smo vrednost goriščne razdalje in koordinat glavne točke v koordinatnem sistemu digitalne slike (pikselski koordinatni sistem) določili z aritmetično sredino vrednosti na obeh posnetkih:

$$c = 2989,232 \text{ (v enotah slikovnega piksla)}$$

$$x_0 = 1480,026 \text{ (v enotah slikovnega piksla)}$$

$$y_0 = 964,227 \text{ (v enotah slikovnega piksla)}$$

Koordinati glavne točke smo preračunali v slikovni koordinatni sistem, ki ima izhodišče v sredini posnetka. Koordinati glavne točke sta tako znašali:

$$x_0 = 1480,026 - 1504,5 = -24,474$$

$$y_0 = 964,227 - 1000,5 = -36,273$$

Zgornje vrednosti goriščne razdalje in koordinat glavne točke so podane v enotah slikovnega piksla. Zaradi nadaljnje obdelave v AeroSys smo le-te pretvorili v milimetre, pri čemer smo upoštevali, da je velikost enega piksla po dostopnih podatkih $7,8 \mu\text{m}$ (DigitalDingus, 2012). Končne vrednosti, ki smo jih uporabili v nadaljnjem postopku izravnave, so tako znašale:

$$\mathbf{c} = \mathbf{23,316 \text{ mm}},$$

$$\mathbf{x_0} = \mathbf{-0,191 \text{ mm}},$$

$$\mathbf{y_0} = \mathbf{-0,283 \text{ mm}}.$$

Poleg parametrov notranje orientacije se v postopku DLT izračunajo tudi prostorske koordinate oslonilnih točk ter srednji kvadratni odkloni, ki jih v geodeziji imenujemo tudi srednji kvadratni pogreški (angl. Root Mean Square, RMS). Srednji kvadratni pogrešek v smeri osi X je znašal $0,012 \text{ m}$, v smeri osi Y $0,006 \text{ m}$ ter v smeri osi Z $0,035 \text{ m}$. Skupni srednji pogrešek je znašal $0,021 \text{ m}$. Vidimo, da je odstopanje največje v smeri koordinatne osi Z in znaša kar dobre 3 cm . Vzrok za takšno odstopanje je lahko slaba prostorska razporeditev točk v smeri osi Z, ki predstavlja oddaljenost od objekta snemanja (testnega polja). Oba posnetka smo naredili pri večji oddaljenosti, zato so bili slabši preseki žarkov pri bolj oddaljenih točkah, kar posledično pomeni manj natančno opredelitev točke.

4.2 Izravnava bloka snopov

V drugi fazi obdelave, izravnavi bloka snopov, smo pridobili parametre zunanje orientacije: koordinate projekcijskega centra X_0, Y_0, Z_0 in kote zasukov ω, φ, κ za vsak posnetek. V preglednici 2 so prikazani parametri zunanje orientacije za vseh osem posnetkov (22-29).

Preglednica 2: Parametri zunanje orientacije

	ω [°]	φ [°]	κ [°]	X_0 [m]	Y_0 [m]	Z_0 [m]
22	-2,191662764720	1,652681624160	0,056775277444	90,931	101,050	85,340
23	-1,447731961459	0,072896450391	0,759173869808	92,285	101,056	85,326
24	-1,070101583703	0,789456888412	0,860554004634	93,994	101,068	85,372
25	-1,224770263427	3,914739825327	0,887125468636	95,177	101,063	85,393
26	-1,641656467023	-0,677529701541	0,795298540011	90,950	100,794	85,332
27	-1,347012668910	-2,232017294352	1,167380358531	92,269	100,812	85,308
28	-1,341086777456	-0,723999818248	1,369324356083	94,022	100,822	85,343
29	-1,105636839300	0,097121368648	1,063831497650	95,188	100,816	85,310

V postopku izravnave aerotriangulacije se ocenijo tudi natančnosti koordinat in odstopanja na točkah. Ocenjena natančnost določitve objektnih koordinat je znašala:

$$S_x = 0,005 \text{ m,}$$

$$S_y = 0,003 \text{ m,}$$

$$S_z = 0,015 \text{ m.}$$

Pomemben pokazatelj natančnosti oziroma kakovosti so odstopanja na oslonilnih in kontrolnih točkah. Odstopanja na oslonilnih točkah so znašala 0,001 m v vseh smereh koordinatnih osi, kar je skorajda preoptimistično. Veliko realnejša so odstopanja na kontrolnih točkah 116 in 208, ki ju nismo uporabili v izravnavi za izračun parametrov, saj nam povedo, kakšna je kakovost aerotriangulacije. V preglednici 3 so prikazana odstopanja na posamezni kontrolni točki ter skupno odstopanje. Skupno odstopanje na kontrolnih točkah je znašalo 0,003 m v smeri osi X in Y ter 0,016 m v smeri koordinatne osi Z. Razvidno je, da so odstopanja večja v smeri osi Z, kar potrjuje že omenjeno dejstvo slabih presekov žarkov na točkah.

Preglednica 3: Odstopanja na kontrolnih točkah

Kontrolna točka	v_x [m]	v_y [m]	v_z [m]
116	-0,007	0,003	-0,015
208	-0,000	0,004	-0,016
Skupno odstopanje	0,003	0,003	0,016

V postopku izravnave se ocenijo tudi natančnosti opazovanj slikovnih koordinat ter srednji pogrešek odstopanj na slikovnih koordinatah. Natančnost meritev slikovnih koordinat je znašala $13,7 \mu\text{m}$ v obeh smereh koordinatnih osi. Če upoštevamo, da je velikost enega piksla $7,8 \mu\text{m}$, potem lahko rečemo, da smo meritve slikovnih koordinat izvedli na približno dva piksla natančno. Srednji pogrešek odstopanj na slikovnih koordinatah v smeri osi x je znašal $9,4 \mu\text{m}$, v smeri osi y $7,8 \mu\text{m}$. Skupni srednji pogrešek odstopanj je tako znašal $v_{xy} = 12,2 \mu\text{m}$.

Programski paket AeroSys je v osnovi namenjen obdelavi aerosnemanja, mi pa smo ga v našem praktičnem preizkusu uporabili za obdelavo terestričnega snemanja. Pri obdelavi smo tako naleteli na nekaj težav oziroma slabosti:

- Postopka samokalibracije v programu AeroSys ni bilo mogoče izvesti, kakor smo prvotno načrtovali, saj rezultati niso bili zanesljivi.
- Vhodne podatke v AeroSys je bilo potrebno pretvoriti v milimetre, saj so bili sicer popravki v pikslih preveliki in se je postopek izravnave ustavil.
- Posnetki, ki smo jih izdelali, so morali biti narejeni po principu aerosnemanja, torej vzporedno glede na testno polje. Program tako ni dopuščal poševnih posnetkov, kakor smo prvotno načrtovali in kot je pri terestričnih primerih običajno.
- Prostorske koordinate oslonilnih točk je bilo potrebno zasukati tako, da je bila os Z usmerjena v globino po principu aerosnemanja.

4.3 Meritev 3D koordinat v Socet Set-u

V zadnjem delu praktičnega preizkusa smo izvedli kontrolne meritve objektnih 3D koordinat točk ter določili njihova odstopanja z danimi koordinatami. Meritve smo opravili na različnih kombinacijah stereoparov posnetkov, pri čemer smo na vsakem stereoparu izmerili vse vidne točke. Za vsako točko smo izračunali aritmetično sredino meritev koordinat na vseh stereoparih, kot je prikazano v preglednici 4 za točko 204.

Preglednica 4: Meritev 3D koordinat v Socet Set

Točka 204			
Stereopar	X [m]	Y [m]	Z [m]
22/23	93,336	101,14	80,071
22/24	93,324	101,139	80,096
23/24	93,327	101,138	80,114
24/25	93,323	101,137	80,091
23/25	93,329	101,138	80,105
Aritmetična sredina	93,328	101,138	80,095
Dane koordinate	93,342	101,139	80,082
 Odstopanje 	0,014	0,001	0,013

Iz preglednice 4 lahko razberemo, da se meritve koordinat precej razlikujejo med posameznimi stereopari. Vzrok za takšno odstopanje je v že omenjenih slabih presekih, predvsem na stereoparih sosednjih posnetkov (npr. 23/24). Pomemben vpliv na odstopanje koordinat je imel tudi sam položaj točke na stereoparu, saj so bile robne točke izpostavljene slabšim presekom kakor centralne. Absolutna vrednost odstopanja med merjenimi in danimi koordinatami znaša za koordinato X 0,014m, za koordinato Y 0,001 m ter za koordinato Z 0,013 m.

Kriterij kakovosti, ki smo ga v nalogi že omenili in se pogosto uporablja v geodeziji, je srednji kvadratni odklon ali srednji kvadratni pogrešek. Srednji kvadratni pogrešek nam pove napako oziroma srednje odstopanje meritev glede na pravo vrednost. Prave vrednosti so bile v našem primeru prostorske koordinate, določene z geodetskimi meritvami. Za vsako točko smo določili aritmetično sredino meritev na različnih stereoparih, kot je prikazano v preglednici 4, in potem le-te primerjali s pravimi vrednostmi. Srednje pogreške koordinatnih odstopanj smo izračunali po enačbah (3) (Podobnikar, 1999):

$$RMS_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i')^2} \quad RMS_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2} \quad RMS_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_i')^2} \quad (3)$$

n ... število meritev (točk)

x_i, y_i, z_i ... merjene objektne koordinate

x_i', y_i', z_i' ... dane (prave) objektne koordinate

Na podlagi zgornjih srednjih pogreškov smo izračunali skupni srednji pogrešek, kot prikazuje enačba (4).

$$RMS_{XYZ} = \sqrt{RMS_X^2 + RMS_Y^2 + RMS_Z^2} \quad (4)$$

Preglednica 5: Srednji kvadratni pogreški

Srednji kvadratni pogrešek	RMS _X [m]	RMS _Y [m]	RMS _Z [m]	RMS _{XYZ} [m]
	0,015	0,005	0,019	0,025

Iz preglednice 5 je razvidno, da je srednji kvadratni pogrešek v smeri osi X znašal **0,015 m**, v smeri osi Y **0,005 m** in v smeri osi Z **0,019 m**. Srednji pogrešek v smeri osi Z je bil pričakovani največji, saj se je to izkazalo že v prejšnjih fazah obdelave. Skupni srednji pogrešek je znašal **0,025 m**, kar zadostuje za naloge bližneslikovne fotogrametrije, kjer ni zahtevana najvišja natančnost.

5 ZAKLJUČEK

Glavno orodje pri fotogrametričnih postopkih predstavljajo fotoaparati, ki jih lahko z vidika uporabe v fotogrametriji delimo na merske in nemerske. Merski fotoaparati so posebej konstruirani za fotogrametrična slikanja in imajo kalibrirane vrednosti parametrov notranje orientacije. Nemerski fotoaparati so običajni uporabniški fotoaparati, ki imajo neznane parametre notranje orientacije, zato so v fotogrametrične namene uporabni le, če jih predhodno kalibriramo. Uporaba amaterskih fotoaparatorov v fotogrametriji vedno bolj narašča, saj se njihova kakovost izboljšuje, obenem pa so cenovno ugodnejši od profesionalnih fotoaparatorov.

V diplomski nalogi smo izvedli kalibracijo nemerskega digitalnega fotoaparata Nikon D70 na testnem polju, ki je vzpostavljeno v kletnih prostorih UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Testno polje predstavljajo prostorsko razporejene in ustrezno signalizirane točke, katerih prostorske koordinate so bile predhodno določene s klasično metodo izmere. Uporabili smo metodo kalibracije na testnem polju točk z znanimi prostorskimi koordinatami, saj smo želeli izkoristiti že vzpostavljeno testno polje. Poseben izziv je bila tudi obdelava v programskem paketu AeroSys, kjer se podobne naloge na naši fakulteti doslej še ni izvajalo.

Naša prvotna želja je bila določiti parametre notranje orientacije z metodo samokalibracije v okviru izravnave aerotriangulacije. Med obdelavo so se pokazale težave v programskem paketu AeroSys, ki je v osnovi namenjen obdelavi aerosnemanja, mi pa smo ga v našem praktičnem preizkusu uporabili za obdelavo terestričnega snemanja. Iz omenjenega razloga smo morali spremeniti prvotne načrte in praktično izvedbo prilagoditi programski opremi, kar lahko strnemo v naslednjih ukrepih:

- Posnetki, ki smo jih izdelali, so morali biti narejeni po principu aerosnemanja, torej vzporedno glede na testno polje. Program tako ni dopuščal poševnih posnetkov, kakor smo prvotno načrtovali in kot je pri terestričnih primerih običajno.
- Prostorske koordinate oslonilnih točk je bilo potrebno zasukati tako, da je bila os Z usmerjena v globino po principu aerosnemanja.
- Elemente notranje orientacije smo pridobili z direktno linearno transformacijo, saj rezultati samokalibracije niso bili zanesljivi.

Po pridobitvi parametrov notranje orientacije z DLT, smo le-te vnesli v izravnavo aerotriangulacije, kjer smo določili še parametre zunanje orientacije. V postopku izravnave so se določila odstopanja na oslonilnih in kontrolnih točkah. Odstopanja na oslonilnih točkah so znašala 0,001 m v vseh smereh koordinatnih osi, kar je skorajda preoptimistično. Veliko realnejša so odstopanja na kontrolnih točkah, saj nam povedo, kakšna je kvaliteta aerotriangulacije. Skupno odstopanje na kontrolnih točkah je znašalo 0,003 m v smeri osi X in Y ter 0,016 m v smeri koordinatne osi Z. Razvidno je, da so

odstopanja večja v smeri osi Z, kar potrjuje dejstvo slabše prostorske razporejenosti točk v tej smeri. V postopku izravnave se oceni tudi natančnost merjenja slikovnih koordinat, ki je znašala 13,7 μm v obeh smereh koordinatnih osi. Srednji pogrešek odstopanj na slikovnih koordinatah v smeri osi x je znašal 9,4 μm , v smeri osi y 7,8 μm . Skupni srednji pogrešek odstopanj je tako znašal $v_{xy} = 12,2 \mu\text{m}$. Parametre notranje in zunanje orientacije smo vnesli v program Socet Set, kjer smo izvedli kontrolne meritve 3D koordinat točk ter izračunali srednje pogreške koordinatnih odstopanj. Srednji kvadratni pogrešek v smeri osi X je znašal 0,015 m, v smeri osi Y 0,005 m in v smeri osi Z 0,019 m. Skupni srednji pogrešek je znašal 0,025 m.

Rezultati kalibracije, ki smo jih pridobili, zadostujejo za naloge fotogrametrije, kjer je zahtevana nekaj centimeterska natančnost. Spoznali smo, da ima programski paket AeroSys določene omejitve, zato načrtovanega preizkusa nismo mogli izvesti, kakor smo prvotno načrtovali. Cilj, ki smo si ga zastavili, smo kljub temu izpolnili, saj smo na vzpostavljenem testnem polju kalibrirali amaterski fotoaparata in dosegli pričakovane rezultate. Pri nadaljnjih raziskavah bi bilo zanimivo uporabiti profesionalen fotogrametrični fotoaparata na istem testnem polju ter primerjati dobljene rezultate. Prav tako bi bilo dobro obdelavo izvesti v kakšnem drugem programskem paketu, ki je primernejši za naloge terestrične fotogrametrije (npr. BINGO). Nalogo bi lahko nadgradili tudi s samodejnim merjenjem slikovnih koordinat oslonilnih točk, kar bi olajšalo in deloma avtomatiziralo postopek kalibracije.

VIRI

Uporabljeni viri

American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). 2012.

<http://www.asprs.org/About-Us/What-is-ASPRS.html> (Pridobljeno: 5.3.2012.)

Bric, V., Grigillo, D., Kosmatin Fras, M. 2010. Fotogrametrija: Gradivo za strokovni izpit iz geodetske stroke. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 21 str.

http://www.izs.si/fileadmin/dokumenti/strokovni_izpiti/msgeo/Fotogrametrija.pdf

(Pridobljeno 15.3.2012.)

DigitalDingus. 2012.

<http://www.digitaldingus.com/reference/general/sensorsizes.php> (Pridobljeno: 15.7.2012.)

Gorjup, Z. 2001. Temelji fotogrametrije in postopki izvedenja. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 142 str.

Kosmatin Fras, M. 2011. Fotogrametrija. Gradiva iz predavanj za šolsko leto 2010/2011: loč.pag.

Kraus, K. 1993. Photogrammetry: Volume 1. Fundamentals and Standard Processes. Bonn, Dümmler Verlag: 397 str.

Kraus, K. 1997. Photogrammetry: Volume 2. Advanced Methods and Applications, Fourth edition. Bonn, Dümmler Verlag: 466 str.

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

Kwon, Y.-H. 1998. Direct Linear Transformation Method. 2012.

<http://kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html> (Pridobljeno: 5.7.2012.)

Nikon. 2012.

<http://www.nikonusa.com/index.page> (Pridobljeno: 10.7.2012.)

Podobnikar, T. 1999. Termina natančnost in točnost v geodeziji. Geodetski vestnik 43, 1:49-55.

Zhang, Z. 1998. A flexible new technique for camera calibration - Technical report. Redmond, Microsoft research, Microsoft corporation.

<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/calib/> (Pridobljeno: 7.7.2012.)

Ostali viri

Grigillo, D. 2003. Uporaba nemetričnih digitalnih fotoaparatorov v fotogrametriji. Geodetski vestnik 47, 3:240-250.

http://www.geodetski-vestnik.com/47/3/gv47-3_240-250.pdf (Pridobljeno: 18.6.2012.)

Pucelj, B. 2004. Kalibracija digitalnega fotoaparata visoke ločljivosti in analiza uporabnosti za fotogrametrične namene. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Pucelj): 90 str.