

Ismail Kabashi *

UDK 528.53: 681.783.2

Pregledni rad

PRIMJENA MJERNIH ROBOTA U GEODEZIJI

0. UVOD

Brzi napredak na području mikroelektronike je omogućio razvoj nove generacije elektronskih tahimetara. Ovi teodoliti kojima se upravlja putem motora sa automatskim čitanjem ugla i dužine [8] daju korisniku mogućnost da putem konvencionalnih geodetskih načina mjerenja (pravci, udaljenosti) kontinuirano objedini deformacije. S druge strane pružaju prilaz mjernim podacima koji do sada uz pomoć razumnog napora nisu bili opipljivi.

Već niz godina stoje na raspolaganju teodolitni mjerni sistemi koji za mjerenje koriste aktivno ili pasivno označene ciljeve. Neki od ovih sistema rade sa videoteolidima. U tom slučaju se koriste CCD-kamere za viziranje tačaka. Ukoliko teodolit posjeduje odlike robota, moguća je automatska izvedba.

Detaljan opis izgradnje sistema videoteodolita, zvani GEOROBOT III, sa odgovarajućim komponentama će biti predstavljen u ovom radu. U sljedećem odlomku će videoteodolit TM3000V/VD biti detaljnije predstavljen. Posebna pažnja, će biti posvećena transformacijama između koordinatnih sistema senzornih komponenata. Transformacioni modul prerađuje piksel koordinate cilja u CCD- polju uz pomoć mjerenja horizontalnih pravaca i zenitnih daljina.

1. KRATAK PREGLED MJERNIH ROBOTA

Razvoj prototipa mjernog robota koji samostalno radi počeo je historijski viđeno 1982 [7]. Ovaj prototip, nazvan GEOROBOT, je kao bazni uređaj imao teodolit koji je pokretao motor tipa AGA 710 i postavljeni daljinomjer tipa Wild DI4L. Putem povezivanja beskrajnih pokretačkih snaga pokretnih motora kojima je moglo biti upravljano putem ugrađenog procesora, automatiziran je proces mjerenja. Kroz direktno povezivanje sa jednim računarom mogla bi se takođe dostava podataka automatizirati. Preko postupka traženja [6,7] koji je povezan s računarom, daljinomjer koji je povezan sa elektronskim tahimetrom je mogao biti fiksiran na jednu tačku. Parametri koji su tim putem izračunati (horizontalni i vertikalni ugao i udaljenost) su polarne koordinate u orijentiranom tahimetarskom sistemu, pri čemu su pravci služili samo usmjerenju daljinomjera. Vanjska tačnost sistema je iznosila pri udaljenostima od 3 do 4 km oko ± 6 mm, što je omogućilo uspješnu primjenu na površinskom kopu.

Ovaj uspješno funkcionirajući prototip je izgrađen na Geodetskom inistutu u Hanoveru, gdje je i dalje razvijan [7], u daljnjoj izvedbi se naziva sistemom Georobot II.

Sastoji se iz sljedećih komponenata sa određenim područjem zadataka:

- elektronski teodolit Wild TM2000
- elektrooptički daljinomjer Wild DI3000
- mikroprocesorski sistem
- host računar

* Ismail Kabashi, dipl.inž.geod., E-mail: ikabashi@pop.tuwien.ac.at

Institut für Geodäsie und Geophysik

Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingeniergeodäsie E-128/3

Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien

Znači radi se o mjernom robotu čija definicija prema Kahmen-u [9] glasi:

Mjerni roboti su univerzalno pokretni automati za pokretanje sa više osovinama, čiji je pokret u pogledu na posljedice pokretanja i puteve, odnosno uglove slobodno (dakle bez mehaničkog zahvata) moguće programirati i u datom slučaju prenositi putem senzora. Moguće ih je opremiti senzorom i drugim spravama za mjerenje udaljenosti i/ili pravaca i njihovih promjena i mogu izvršiti zadatke mjerenja.

Otkriće CCD¹⁾- senzora [14] omogućava mjerenje objekata bez dodira preko digitalne obrade slike. Za on-line mjerenje položaj CCD- senzora, što se tiče referentnog sistema, u svako doba mora biti poznat. Putem kombinacije sa jednim teodolitom se ovaj uvjet ispunjava. Pored različitih pokušaja da se teodolit i CCD-kamera biaksialno kombiniraju, npr. [14], što je povezano sa velikim problemima sa stabilnošću kombinacija, bilo je uspješnih pokušaja koaksialne integracije senzora u optički sistem teodolita.

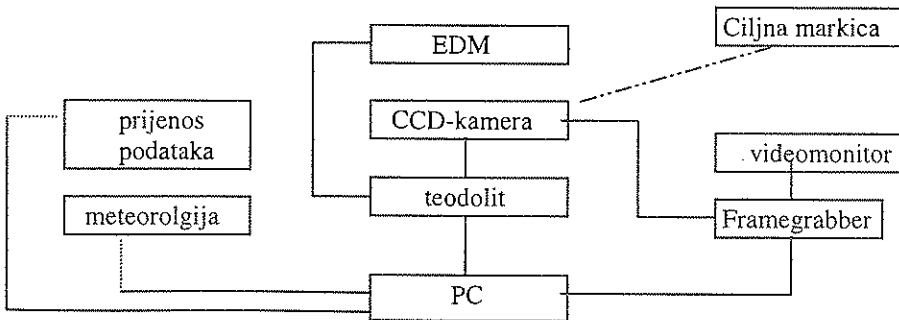
Izazov za mjerenje leži u korištenju CCD-senzora u okviru mjernog sistema da bi se zamijenilo ljudsko oko. Ako bi ovu kameru, s jedne strane, kao videoteodolit bilo u svako doba moguće kontrolirati u orijentaciji i pozicioniranju, a s druge strane osloniti na metode digitalne obrade slike, onda iz toga proizilazi nova generacija robota za mjerenje.

Podstaknuti ovim prvim uspjehom napravljena su poboljšanja sistema i razvijen GEOROBOT III [4]. Ugradnjom digitalnog sistema za pretraživanje (CCD-kamera) i s time povezanom računarskom obradom slike ovaj mjerni sistem je ispunio sve preduvjete za automatizirano trodimenzionalno određivanje koordinata tačaka. Tako adaptirana sprava za mjerenje se naziva i videoteodolit. Teodoliti sa motoriziranim osovinama, motoriziranim fokusom i čvrsto ugrađena (integrirana) CCD-kamera se nazivaju videoteodolitom [15]. Slijedi kratak opis osnovnih komponenata jednog takvog videoteodolita.

2. VIDEOTEODOLIT

2.1 Hardware- komponente

Mora biti uveden hardware s čijom pomoći se realizira izgradnja sistema. Iz slike 1 se vide različiti dijelovi iz kojih se mjerni sistem sastoji.

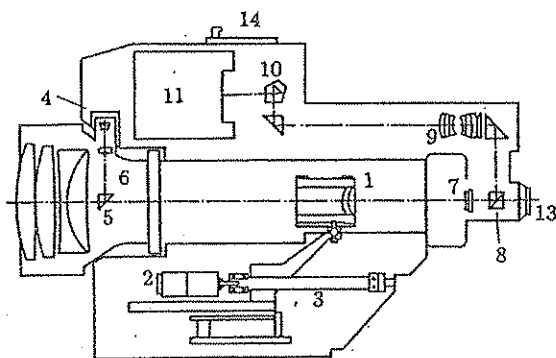


Slika 1. Komponente hardware-a

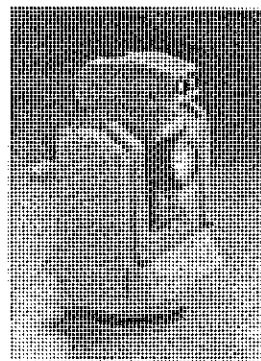
¹⁾ CCD=Charge Coupled Device. Prinzip „Charge Coupled Device” je od W.Boyle und G. Smith pronaden i 1974 patentovan

2.2 Opće osobine TM3000VD-a

Videoteodolit TM3000V odgovara razvijenijem elektronskom teodolitu T3000 firme Leica. Komponente, kao okvir, opto-elektronsko čitanje ugla, kompenzator za tekućinu i interni software su nepromijenjeni preuzeti od baznog dijela. Ovaj instrument je proširen motoriziranom pokretnom osovinom i digitalnim sistemom za pretraživanje- CCD-kamera. Kao što je predstavljeno na slici 2 proširen je i eksternom CCD-kamerom u boji. Za mjerenje se može po potrebi koristiti kamera u boji ili crno-bijela. Ukoliko se mjeri internom kamerom onda se umjesto okulara (10) i kamere u boji (11) montira prizma za promjenu smjera (5) pomoću bajunetne kopče (zapora) na tijelu durbina. Slike obiju kamera se uglavnom razlikuju u području polja slike, dakle što se tiče povećanja i s tim povezanim preciznošću mjerenog pravca. Da bi se u daljnjem izlaganju olakšalo razlikovanje ovih kamera, kamera za preciziranje će se radi njenog položaja u unutrašnjosti tijela durbina nazivati internom, a kamera u boji eksternom. Ukoliko postoji mogućnost da se videoteodolit opremi daljinomjerom, onda se tijekom mjerenja mogu brzo i tačno odrediti dužine. Naziv instrumenta se tada mijenja u TM3000VD. Bez EDM- uređaja ostaje otvorena mogućnost da se dužine izvedu preko funkcije autofokusiranja. To traje međutim veoma dugo i u najboljem slučaju daje grube približne vrijednosti udaljenosti.



Slika 2. Tijelo durbina TM3000VD-a [11]



TM3000VD

Uz komunikaciju sa kompjuterom za upravljanje ili joystick-om u teodolit je integriran komandni procesor. Ovaj interpretira naredbe koje su poslone u ASCII- Code preko serijalnog reza na teodolitima i prenosi potrebne interne naredbe na komponente videoteodolita.

Tehnički podaci TM3000V prema [11]

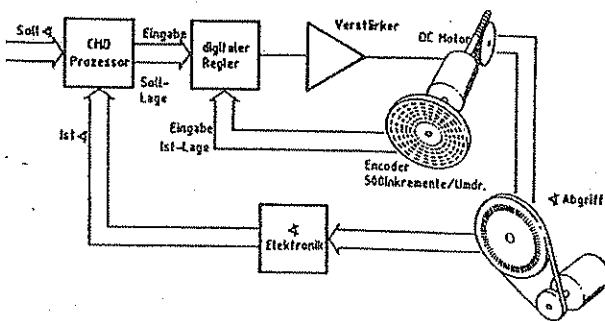
Mjerenje ugla:	apsolutni coder, diametralno očitavanje kruga
Standardno odstupanje:	horizontalni pravac: 0,15 mgon
	vertikalni ugao: 0,15 mgon

Trajanje pojedinačnog mjerenja:	0.9s-min 0.04s
Popravke pravaca:	vezano za greške vizure, kosine vertikalne osovine, opcionalno
Korektura zenitne daljine:	indeksna pogreška se tokom mjerenja automatski podesi
Kompenzator:	dvoosovinski tečni kondenzator radno područje: do 0,06gon
Pogon osovina:	max. brzina okretanja: 50°/s tačnost pozicioniranja: 0,08 mgon
Tačnost uigranosti:	0,03 mgon
Durbin:	panfokalni durbin
Osvjetljivač cilja:	talasna dužina: 850nm ugao otvaranja: 0,33°
Pogon uredaja za fokusiranje:	servomotor sa apsolutnom linearnom očitavanjem područje fokusiranja: 1m-∞ razlučivanje linearnog zahvata: 2,5μm
Interface:	ASCII, 2400- 19200 Baud, 10 Bit lični protokol
Opskrbljavanje naponom:	12V istosmjerna struja
Snimanje učinka:	normalni pogon 1,8- 12 W vrhunci do 72W (6A kod 12V)

Tabela 1. Tehnički podaci TM3000[11]

2.2.1 Servomotor

Za automatsko pozicioniranje osovina i fokusnog sočiva (1, slika 2) su neophodni servomotori (2) koji pokreću osovine u pravilnom kruženju. Ovi motori s jedne strane moraju dozvoljavati egzaktno pozicioniranje ($\pm 0,1$ mgon za alhidadu i durbin), a s druge strane trebaju brzo raditi.



Slika 3. Upravljanje osovinskog pogona [11]

Komandni procesor prima naredbu za pozicioniranje i željenu vrijednost pravca. On naredbu prenosi digitalnom regulatoru koji u zavisnosti od momentanog položaja osovine izračuna broj inkremenata za podešavanje i onoliko dugo pokreće motor, dok se osovina ne pomjeri na broj inkremenata. Onda se na ugaonom očitacu očitava postavljeni pravac i uporedi se sa željenom vrijednošću u komandnom procesoru.

Da bi se to uspjelo, pozicioniranje se dijeli na grubo i fino poziciranje. Tolerancija za fino pozicioniranje može biti zadata između 1gon i 0.1mgon, čime se uzima utjecaj na vremenke potrebe. Maksimalna brzina pokretanja osi iznosi 55 gon/s. Slika 3 šematski prikazuje kružni tok pozicioniranja.

Pozicioniranje se smatra završenim kad se očitana vrijednost željene vrijednosti razlikuje manje od izabranog dozvoljenog odstupanja.

2.2.2 CCD- Kamera

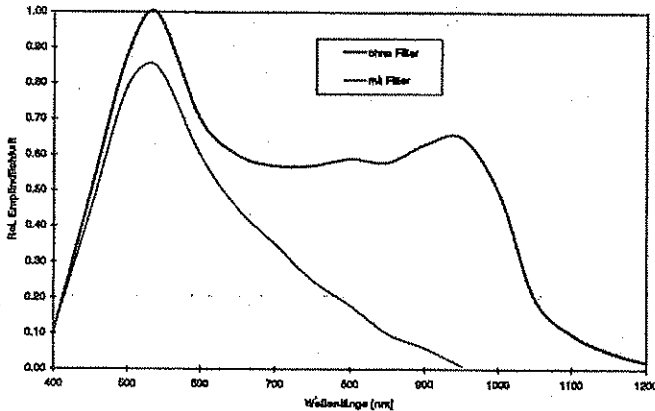
Dalja posebnost durbina je da je u njegovom tijelu integriran digitalni sistem koji služi za snimanje. Na CCD-chip-u je oslikano vidno polje durbina i time određena tačka objekta na koji se cilja. On, tako reći, preuzima osobine senzora ljudskog oka i može se razumjeti kao "elektronsko oko" [4]. Kamera posjeduje senzorsko polje sa 500×582 piksela čija površina iznosi $17 \times 11 \mu\text{m}^2$. Ukupna površina senzora iznosi $8,8 \times 6,6 \text{ mm}^2$. CCD-kamera (11) obuhvata jedno područje cilja i daje sliku na kojoj treba biti lokalizirana jedna tačka. Slika objekta koja se vidi kroz objektiv se "oštro" oslika kroz fokus i ispravi u Abbe-ovoj prizmi. Pošto durbin ne posjeduje linijsku ploču, na CCD-polje se zajedno sa slikom objekta peslikava i referentni okvir koji je ugrađen u tijelu durbina preko optičke spone (vidi sliku 7).

U tabeli 2 su sadržani najvažniji tehnički podaci o CCD-kameri.

Elementi za razlaganje:	500 (H) x 582 (V)
Oblast razlaganja:	5,8 (H) x 6.6 (V)
Sistem razlaganja:	2:1 razmak između redova
Razlaganja:	625 redova, 50 dijelova slike, 25 slika
	horizontalno: 15.625 Khz
	vertikalno: 50 Hz
Razrješenje	
horizontalno:	preko 380 redova u sredini
min.jačina osvjjetljenja:	5 lux kod uvjeta zaslijepljivanja 1: 1.4
žarisna daljina	
ugao daljine:	8mm
standard:	16mm
Ugao slike	
ugao daljine:	58°06', 44°44'
standard:	30° 24', 23°

Tabela 2: tehnički detalji CCD-kamere [11]

Prednost CCD-kamere u odnosu na druge optičke senzore je prije svega zbog njene minijaturene veličine (nekoliko mm^2) i geometrijske stabilnosti senzornih elemenata. Kamera daje analogni signal [14] koji mora biti digitaliziran za dalju preradu u računaru (koji digitalno radi). Nakon digitaliziranja framegrabber-a pojavljuje se u svakom od elemenata siva vrijednost između 0 i 255 koja reprezentira zračenje. CCD-senzor nije jednako osjetljiv za sve frekvencije u spektru elektromagnetskih talasa.



Slika 4: relativna spektralna osjetljivost CCD-senzora [16]

Dijagram na slici 4 pokazuje relativnu spektralnu osjetljivost CCD-senzora sa i bez infracrvenog filtra. Jasno se vidi maksimum osjetljivosti kod oko 520nm, kao i izražena osjetljivost bliže infracrvenom.

2.2.3. Framegrabber

Za digitaliziranje signala i memoriranje podataka slike u formi sivih vrijednosti u matrici slike služi karta za obradu slike (framegrabber). Jednostavni framegrabber-i predstavljaju samo slobodan prilaz memoriranim sivim vrijednostima. Svi proračuni moraju biti u hostu računara. Bolji framegrabber-i mogu sprovesti operacije obrade slika, kao filtriranje, stvaranje diferencija i proračune histograma i time ubrzavaju primjenu, jer otpada vremenski intenzivan prijenos podataka na PC.

2.2.4. Videomonitor

Radi kontrole procesa mjerenja na framegrabber se može priključiti videomonitor koji stalno pokazuje sadržaj memorije slike, dakle digitaliziranu sliku CCD-kamere. Za mjerenje monitor nije potreban. Osim toga danas postoje mnogobrojni framegrabber-i koji sliku mogu uključiti u jedan dio PC- monitora, tako da drugi monitori nisu potrebni.

2.2.5. Računar

Računar predstavlja vezu između različitih uređaja. Na njemu radi software koji upravlja tokom mjerenja, komunicira sa uređajima i sprovodi proračune, dokumentaciju i upravlja podacima. Već više godina dovoljna je sposobnost učinka personalnog računara za opisane primjene (potrebe). Usljed minijaturiziranja, jednostavne upotrebe i niskih cijena u sistemu je PC predviđen kao jedinka koja upravlja.

2.2.6. Ciljne markice

Posebnu važnost u sistemu imaju ciljne markice (signali). One moraju jasno i stabilno definirati tačku cilja (cilj). Obrada slike funkcionira samo kad se ciljne markice mogu odvojiti (razlučiti) od pozadine. Dalje se određivanje cilja u datom sistemu ne gradi na procesu matching-a sa referentnim slikama, nego na proračunima težišta regije koja je određena kao površina s masom [1]. Veza između cilja i težišta cilja mora biti opravdana, stoga dolaze u pitanje samo simetrične ciljne markice.

Postoje različite vrste ciljnih markica koje sistem može obuhvatiti. To su: reflektor, retroreflektivna folija, signal koji se može osvijetliti, grafička ciljna markica i prirodne tačke.

2.2.7. EDM- podnožni stalak

Umjesto optike širokog ugla (adaptera) tijelo durbina TM3000VD-a ima stalak sa pločom (14) za daljinomjer. Radi velikog opterećenja ležaja osovine tijela durbina, durbin se mora izbalansirati nakon svakog korištenja daljinomjera (DI1600, DI2000, DI3000). Za to su s jedne strane postavljeni tegovi u tijelu durbina, a s druge strane, kad se EDM-uređaj postavi, mora se na donjoj strani durbina pričvrstiti protuteg. Napajanje strujom i upravljanje daljinomjera se odvijaju preko teodolita. Komunikacija kompjutera za upravljanje daljinomjerom odvija se dakle preko komandnog procesora teodolita.

2.2.8. Elektronski daljinomjer

Na TM3000VD se po potrebi može postaviti daljinomjer (vidi gore). Sva mjerenja koje daljinomjer može izvesti automatski se integriraju u proces automatskog mjerenja.

2.2.9. Dio za fokusiranje

Da bi se dobila oštra slika, sistemu za preslikavanje se može promijeniti žarišna daljina ili se može pomjeriti ravan slike u odnosu na glavnu tačku sistema sočiva. Durbin TM3000VD-a je panfokalni fokusni durbin. Za fokusiranje se mijenja žarišna daljina optičkog sistema pomjeranjem međusočiva. Time se mijenja, ovisno od udaljenosti, i mjerilo preslikavanja i ugao slike (tabela 3).

Udaljenost	Vidno polje	Faktor povećanja
∞	1°08'	43x
100	2,08m	41x
10	0,26m	32x
3	0,11m	24x
0,6	0,04m	13x

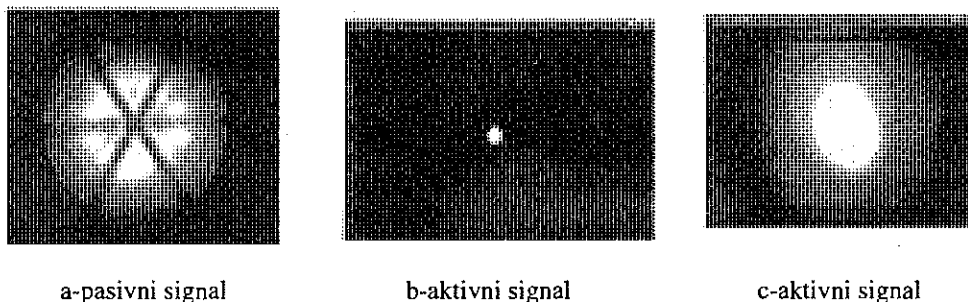
Dalje je, radi neizbježnih grešaka u montaži i u upravljanju dijelom za fokusiranje, njegovim pomjeranjem promijenjen položaj osovine, tako da vizurna osa nije prava, nego blago zaobljena hiperbola [3].

Tabela 3: Panfokalni fokusni durbin od T3000

Da ovo pomjeranje ne bi značajno utjecalo na tačnost mjerenja, upravljanju (3) i pogonu fokusnog sočiva se postavljaju visoki zahtjevi preciznosti. Kod durbina T3000 promjena vizurne ose cilja iznosi manje od 0,15mgon. Stvarna pozicija fokusnog sočiva u pokretnom predjelu od 4cm se određuje uz pomoć opto-elektronskog očitavanja ugla u inkrementu na 2,5 μ m. Tačno poznavanje pozicije fokusnog dijela je potrebno radi ovisnosti povećanja, odnosno mjerila slike, za izračunavanje položaja pravaca koordinata slike.

2.2.10. Interno osvjetljenje cilja

U prednjem dijelu durbina TM3000VD nalazi se infracrvena dioda (4 sl.2) koja uz pomoć odgovarajuće blende proizvodi svjetlosni stožac. Ovaj svjetlosni stožac se prizmom (5) ogledalom koaksialno prenese u prostor objekta. Ugao otvaranja stožca iznosi 0,33°. U vezi sa uglom slike polja, horizontalno oko 0,2mgon obasja se kompletno područje mjerenja durbina. Spektar poslanog svjetla leži kod 850nm, dakle u blizini infracrvenog.



Slika 5: Osvjetljivač- reflektor- slika na videomonitoru

Osvjetljivač cilja se može koristiti kao uređaj za viziranje, odnosno za signalizaciju: povezan sa reflektujućim signalima, npr. retroreflektivna folija, osvjetljenjem teodolita se može postići kompariranje kontrasta. Pasivne ciljne markice (folija) osvjetljavanjem postaju aktivne. Slika 5a pokazuje kako je obuhvaćen horizontalni osvjetljeni reflektor na udaljenosti oko 40m od CCD-polja. Radijalni zraci su ivice prizme sa ivicama krova i njihova refleksija.

Intenzitet osvjetljenja se može regulirati na 7 stupnjeva. Time je moguće podešavanje jačine svjetla prema vrsti cilja- folija treba jače osvjetljenje od prizme- i prema meteorološkim prilikama. Kod prejakog intenziteta na CCD- polju dolazi do prejakog ozračenja (vidi sliku 5c) i mjerenje ne uspijeva, jer je težište nesigurno ili ne može biti ni određeno.

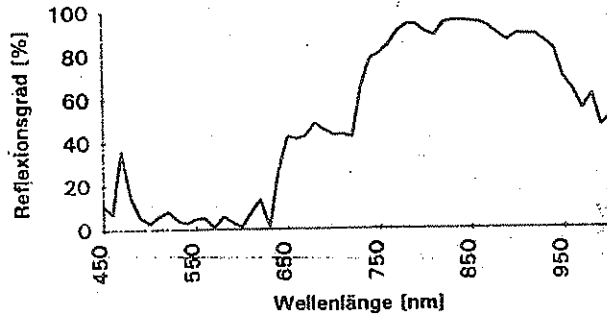
Osvjetljivač cilja se pri obostranom mjerenju dvaju videoteodolita može koristiti kao ciljna marka.

2.2.11. Polupropusna prizma

Dihroitska polupropusna prizma (8) ispunjava dva zadatka:

- dijeljenje zraka na udio koji postaje CCD-polje i dio koji dolazi u okular
- filtriranje zraka koji su prebačeni na CCD-polje.

Radi ekstremno malog vidnog polja u mjernom modusu vrlo je teško manualno pronalaženje i postavljanje ciljeva videoteodolitom. Polupropusna prizma šalje jedan dio padajućeg svjetla u okular (13) i time dozvoljava direktan uvid u CCD-polje, koje je radi prostora i bolje zaštite u tijelu durbina postavljeno iznad objektiva.



Slika 6: Spektar refleksije polupropusne prizme [16]

Kao što se vidi na slici 6 spektar refleksije polupropusne prizme pokazuje proširen maksimum (95%) blizu infracrvenog i dodatni maksimum u crvenom području. Protivno tome se u plavom i zelenom području manje svjetla (<10%) reflektira na kameru.

To otežava obradu prirodne scene, što znači nesignaliziranih tačaka, jer polupropusna prizma umanjuje zrake u vidljivom svjetlu za 90%. S druge strane ovo filtersko djelovanje kod upotrebe osvijetljivača cilja ili svjetleće ciljne markice odstranjuje ostale objekte na slici, tako da je automatsko obuhvatanje cilja pojednostavljeno i ubrzano.

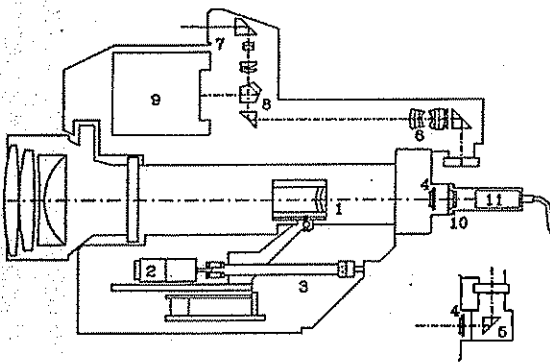
2.2.12. Naknadno uvećavanje

Tačnost koja se može dostići prilikom pronalaženja naznačenih tačaka uz pomoć uvećavanja slike leži, već prema formi i obliku markiranog cilja, u najboljem slučaju između 1/10 i 1/100 piksela. Kod prethodno zadate visine piksela je moguća tačnost mjerenja pravca uz pomoć obrade slike, dakle jedna funkcija mjerenja slike. Uglavnom se iz ovog razloga TM3000V podvrgava 10x serijskom naknadnom uvećanju (9). To znači da se maksimalno 40-struko povećanje durbina pomoću polupropusne prizme uveća još 10 puta. Time mjerilo slike kod preslikavanja na CCD-polje iznosi maksimalno 1:400. Zajedno sa malom veličinom CCD-polja ($8,8 \times 6,6 \text{ m}^2$) i referentnog okvira ($0,69 \times 0,46 \text{ mm}^2$) rezultira veoma malo vidno polje, koje odgovara uglu vidnog polja od oko $0,19\text{gon} \times 0,12\text{gon}$ [16]. Jako naknadno uvećavanje ograničava zrake kod preslikavanja na svežanj osi, tako da može izostati modeliranje različitih grešaka preslika optičkih sistema.

2.2.13. Optička spona i optika širokog ugla

Pentaprizma (8, sl. 7) koja se okreće oko horizontalne osovine funkcionira kao optička spona. Već prema položaju omogućava preslikavanje slike koja se mjeri ili pregledne slike. Slika koja se mjeri odgovara ulasku zraka kroz durbin, stoga je njena geometrija određena kalibriranjem i preslikom referentnog okvira. Kod TM3000V optika širokog ugla (7, sl.7) daje preglednu sliku. Uz pomoć optike širokog ugla uspijeva manualno grubo podešavanje tačaka radi puno većeg ugla slike $12,5^\circ \times 9,5^\circ$ i bez pogleda u durbin.

Kako slika 7 pokazuje to nije moguće kod TM3000V jer umjesto dijeljenja zraka uspijeva samo lomljenje zraka. Kalibriranjem optike širokog ugla moguće je napraviti vezu između pregledne i mjerne slike. Time podešeni pravac teodolitne osovine može biti automatski tako promijenjen da se tačke koje se nalaze u preglednom polju preslikaju sredinu mjernog polja. Snimanje širokog ugla služi manualnom ili automatskom pribavljanju približnih vrijednosti za pravce koji se podešavaju.

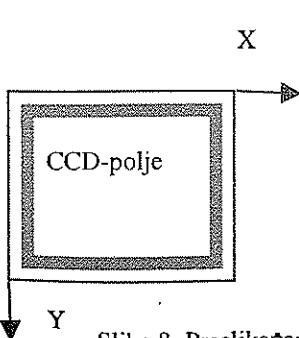


1. Fokusno sočivo
2. Servomotor za fokusiranje
3. Fokusni pogon
4. Referentni okvir
5. Prizma za lomljenje zraka
6. 10x uvećanje
7. Optika širokog ugla
8. Okretna pentaprizma
9. Interna CCD-kamera
10. Okular
11. eksterna CCD-kamera

Slika 7: Tijelo durbina TM3000V-a [11]

2.2.14. Referentni okvir

Unutarnja orijentacija [10] sistema kamere ostvaruje uz pomoć referentnog okvira (4, sl.7). On se sastoji iz pravokutne oznake od $0,69 \times 0,46 \text{ mm}^2$ koja je čvrsto montirana na ravni slike objektiva, što odgovara linijskoj plati običnog teodolita.



Referentno polje obuhvata mjerno područje durbina i preslikava se ujedno sa svakom scenom na CCD-polje. Da bi se povisio kontrast prilikom lokaliziranja referentnog okvira može biti osvijetljen sa okularne strane infracrvenim svjetlom. Obratno ovo osvijetljenje smanjuje kontrast scene na strani objekta, tako da se u ekstremnom slučaju vidi samo referentni okvir. Zbog toga se referentni okvir osvijetljava radi određivanja unutarnje orijentacije, ali ne za mjerenje koordinata slike cilja.

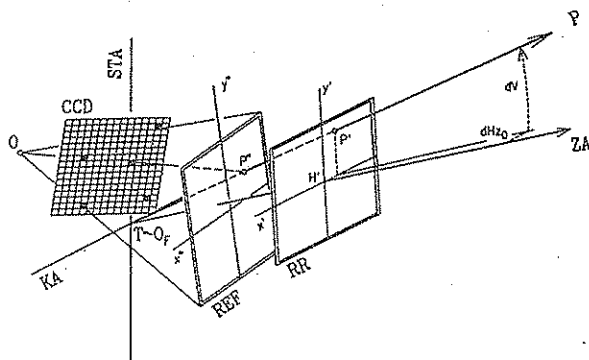
Slika 8: Preslikavanje referentnog okvira na CCD-polju

Referentni okvir zamjenjuje nitni križ prema definiciji vizurne osi [8]; tačka probijanja vizurne osi kroz ploču je samo fiktivna tačka sjecišta dijagonala u referentnom okviru- četverougao. Nedostatak nitnog križa otežava manualno, centrično određivanje cilja. Kad je ovaj poželjan mora biti postignut preko upravljanja pravilnim krugom putem odrednica koordinata slike na kutovima okvira i tačkama cilja. Pozicija durbina se zato tako dugo mijenja dok se tačka cilja ne poklopi sa dijagonalnom tačkom sjecišta.

Da bi se omogućilo preslikavanje bogato kontrastima i sigurno automatsko lokaliziranje referentne oznake, u slici mora biti više piksela. Time oznaka pokriva dijelove preslikanog prostora objekta. Referentni okvir koji uokviruje scenu smeta manje nego centralno preslikani nitni križ.

Iz preslika interne reference se izračunavaju parametri transformacije (ne metarski) piksel koordinata u metarskom jednog sistema koji je okrenut ispred kamere. Referenca služi nalaženju veličina translacije, rotacije i mjernih jedinica, što se putem križa u sredini slike ne može zasigurno odrediti. Četvorokutni okvir definira fiksnu tačku, četverougao iz kojeg sigurno proizilaze parametri transformacije.

2.3. Koordinatni sistemi i preslikavanje među njima



Slika 9: Koordinatni sistemi u videoteodolitu [16]

- STA: uspravna osa
- KA: nagnuta osa
- ZA: vizirna os
- T: tačka sjecišta STA, KA i ZA
- CCD: senzorsko polje CCD-kamere
- O: projekcioni centar CCD-kamere
- O_F: projekcioni centar preslikavanja durbina (variabla)
- REF: ravan okvira referencije (x'', y'')
- RR: rektificirana ravan okvira referencije (x', y')
- P: tačka cilja
- dHz₀: prostorni otklon u ravni kroz KA i ZA
- dV: vertikalni otklon
- H': glavna tačka
- P'': slika tačke cilja u ravni referentnog okvira
- P': fiktivna tačka slike u rektificiranom okviru ravni

Principijelno se pravci do tačke cilja mjere optičkim teodolitom. Ugradnja CCD-kamere u tok ulaza zraka teodolitnog durbina znači da ovi pravci ne mogu bit mjereni u uobičajenom sistemu teodolitnih osovina [16]. Videoteodolit naprotiv obuhvata jednim snimkom cijelo ciljno područje. Svaka tačka koja se preslikava negdje na CCD-polju se može uzeti kao tačka cilja. Videoteodolit stoga dozvoljava određivanje pravaca ciljevima koji nisu centrično postavljeni. Iz koordinata tačke cilja u matricu slike CCD-polja se određuju dimenzije otklona, koje uzimaju u obzir ekscentrično obuhvatanje ciljeva. Slika 9 pokazuje koordinatne sisteme koji proizilaze iz proračuna: optički sistem durbina preslikava tačku P (ekscentrično) na ravan referentnog okvira REF. Objektiv CCD-kamere preslikava ravan referentnog okvira na senzorno polje kamere. Za mjerenje se koristi digitalizirana slika CCD-kamere koja se radi ograničene veličine senzornih elemenata i tačaka uglova referentnog okvira označava indicijama (red i stupac) u slici matrice.

Određivanje pravaca obuhvata:

- određivanje indicija na slici matrice (pikselkoordinate),
- transformaciju indicija koordinata slike,
- preslikavanje CCD-polja od ravni referentnog okvira na rektificiranu ravan referentnog okvira i
- transformaciju u sistem teodolitnih osovina.

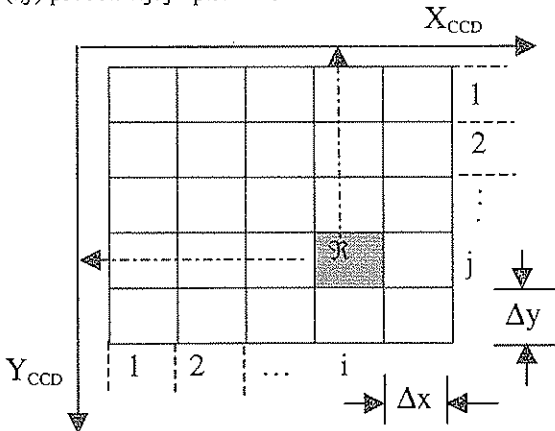
U sljedećim poglavljima se detaljnije obrađuju pojedine slike i transformacije.

2.3.1. Sa CCD-polja na ravan referentnog okvira

Jedna tačka \mathfrak{R} je u digitalnoj slici definirana kroz indicije reda i stupca elemenata matrice slike (vidi sliku 10):

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}(i, j) \quad i, j \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Par (i, j) predstavljaju pikselkoordinate tačke \mathfrak{R} .



Slika 10: Matrica slike i koordinate [16]

Pošto senzorski elementi u slici matrice imaju poznate mjere Δx odnosno Δy i redovno su poredani u redove i stupce, pikselkoordinate mogu biti transformirane u metrične, ravne i pravokute koordinate. Ovo uspijeva uopćeno putem ravne afine transformacije čime se različita mjerenja senzornih elemenata prenose u pravcu redova i stupaca, kao i jedne moguće neortogonalnosti između redova i stupca (4). Ova transformacija glasi uopćeno:

$$\begin{aligned} x_{\text{CCD}} &= \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 \\ y_{\text{CCD}} &= \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 \end{aligned} \quad (i, j) \in \mathbb{N} \quad (2)$$

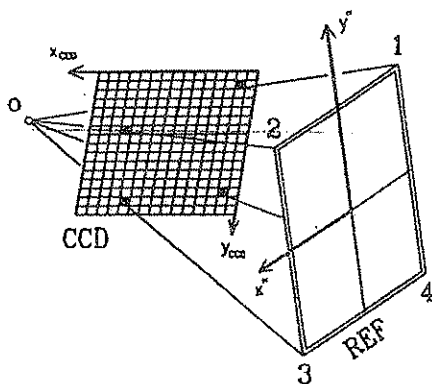
Time se određuju koordinate tačke središta svakog piksela (i, j) . Jednačina (2) opisuje prijelaz iz pikselkoordinata u koordinate slike. Radi naprednog indiciranja elemenata slike iz vanjskog lijevog u vanjski desni stupac i iz gornjeg ka donjem redu usvojeni koordinatni sistem na slici 11 je matematički negativan sistem.

Digitalna obrada slike pokazuje u normalnom slučaju nepune pikselkoordinate kao istaknute tačke (npr. sjecište, središnja tačka). Osim toga određivanje takvih tačaka u matricama slike uspijeva sa subpiksel- tačnosti [10]. Stoga se pikselkoordinate vode u realnoj vrijednosti, što je opravdano radi tijesne veze sa jednim metričkim koordinatnim sistemom (vidi jednačinu (2)):

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}(i, j) \quad i, j \in \mathbb{R} \quad (3)$$

Digitalna slika nastaje kroz centralnu projekciju iz preslika prostora objekta na ravan referentnog okvira u CCD-sensor (vidi sliku 12). Izračunavanje koordinata slike na ravni referentnog okvira slijedi po [10]:

$$x'' = \frac{\gamma_1 x_{\text{CCD}} + \gamma_2 y_{\text{CCD}} + \gamma_3}{\epsilon_1 x_{\text{CCD}} + \epsilon_2 \gamma_2 y_{\text{CCD}} + 1} \quad y'' = \frac{\delta_1 x_{\text{CCD}} + \delta_2 y_{\text{CCD}} + \gamma_3}{\epsilon_1 x_{\text{CCD}} + \epsilon_2 \gamma_2 y_{\text{CCD}} + 1} \quad (4)$$



Slika 11: preslikavanje ravni referentnog okvira na CCD-polje [16]

Prijelaz iz matematički negativnog koordinatnog sistema slike u matematički pozitivan sistem uspijeva uz pomoć refleksije ogledala na X_{CCD} -osi. Zamjenom predznaka γ_2, δ_2 i ϵ_2 u jednačini (4) se može sprovesti ova refleksija.

Stavi li se dalje (2) u (4), formira prikladno i koeficijente od i i j drugačije nazove, dobije se veza između pikselkoordinata i koordinata u sistemu referentnog okvira u sljedećoj, jednostavnoj formi:

$$x'' = \frac{a_1 i + a_2 j + a_3}{c_1 i + c_2 j + 1} \quad y'' = \frac{b_1 i + b_2 j + b_3}{c_1 i + c_2 j + 1} \quad i, j \in \mathbb{R} \quad (5)$$

Vidi se: formalni pokušaj centralne projekcije CCD-polja na ravan referentnog okvira (5) modelira prijelaz pikselinidicija na koordinate slike kao refleksija ogledala sistema koordinata slike i projekcija na ravan referentnog okvira.

Transformacija prema (5) sadrži 8 neovisnih parametara koji su određeni sa 4 odgovarajuće tačke u oba ravna sistema. Kao odgovarajuće tačke služe kutne tačke referentnog okvira čije se koordinate nalaze u digitalnoj slici preko obrade slike [4] i čije koordinate su u sistemu ravni referentnog okvira poznate iz kalibriranja [11].

2.3.2. Rektificiranje ravni referentnog okvira

Slika 9 pokazuje željeni položaj referentnog okvira:

ravan referentnog okvira RR stoji uspravno na vizurnu os, dijagonalna tačka sjecišta referentnog četverokuta se poklapa sa glavnom tačkom H' , što znači sa tačkom proboja vizurne osi kroz ravan RR osa x' koordinatnog sistema u ravni referentnog okvira je paralelna sa kosom osom KA.

Medutim položaj referentnog okvira REF se u stvari razlikuje zbog neizbježne greške u montaži željenog položaja kroz tri translacije i tri rotacije.

Translacija u pravcu kose osovine (odnosno u pravcu x') izražava se kroz grešku u vizurnoj osi. Ona se, kako je poznato, može odrediti i nanošenjem popravke na očitane pravce direktno uzete u obzir [12]. Translacija u pravcu y' -ose je greška visinskog indeksa. Nakon što se ona odredi pomjeranje se može uzeti u obzir putem računске popravke očitane zenitne daljine. Translacija u pravcu vizurne osi izražava se u grešci mjerenja. Ova greška se uzima u obzir kod kalibriranja parametra otklona.

Rektificiranje referentnog okvira, što znači projekcija preslika durbina sa stvarne ravni referentnog okvira na REF na ravan RR željenog položaja, treba samo korigirati pomjeranje obje ravni jedne naspram druge.

Preslikavanje objektnog prostora na ravan referentnog okvira je centralana projekcija sa centrom O_F koja se ne poklapa sa sjecištem T teodolitne osovine. Da bi se dobile fiktivne tačke slike u rektificiranoj ravni referentnog okvira, projicira se sa istim centrom O_F sa REF na RR. Radi se o perspektivnom presliku između dvije ravni. Ovo preslikavanje se formalno opisuje dvjema jednačinama prema formi (4), jer je mjesto poticanja koordinatnih sistema identično, a time otpadaju konstante u brojniku, kako se jednostavno vidi:

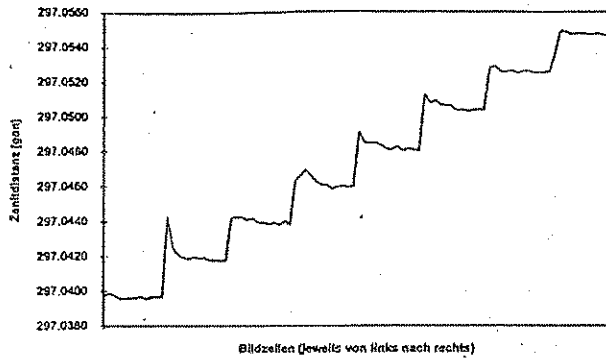
$$x' = \frac{a_1 x'' + a_2 y''}{c_1 x'' + c_2 y'' + 1} \quad y' = \frac{b_1 x'' + b_2 y''}{c_1 x'' + c_2 y'' + 1} \quad (6)$$

Do istog rezultata dovodi i strogo izračunavanje tačke proboja pravih $O_F P$ sa ravni RR. Ako se u ovaj obračun uvedu diferencijalna okretanja $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, dobije se veza za malo okretanje ravni jedne prema drugoj:

$$x' = s \frac{x'' + \omega_3 y''}{\omega_2 x'' - \omega_1 y'' + s} \quad y' = \frac{-\omega_3 x'' + y''}{\omega_2 x'' - \omega_1 y'' + s} \quad (7)$$

- x'', y'' koordinate tačke slike u REF ravni
 x', y' koordinate fiktivne tačke slike u REF ravni
 s vidno polje: udaljenost između objektivne udaljenosti variable projekcionog centra O_F i ravni referentnog okvira REF (odgovara izvedenom c (D))
 ω_1, ω_2 okretanje oko x , odnosno y
 ω_3 okretanje oko vizurne osi

Može se pokazati da se kod okretanja oko vizurne osovine, dakle ugao ω_3 , uticaji grešaka mogu mjeriti na pravcima otklona iz vrijednosti piksela. Da kod korištenog videoteodlita TM3000V okretanje referentnog okvira dolazi do rasporeda po veličinama, na koje se mora obratiti pažnja, pokazano je mjerenjima u diplomskom radu [16]. Pokazuje se da je horizontalni ugao varirao prilikom spuštanja jedne tačke sa promjenom u y , vertikalni ugao sa promjenom u x , na osnovu okretanja referentnog okvira.



Slika 12: Zenitna daljina jedne tačke kod promjenjive pozicije durbina [16]

Na slici 12 se mogu posmatrati dva efekta:

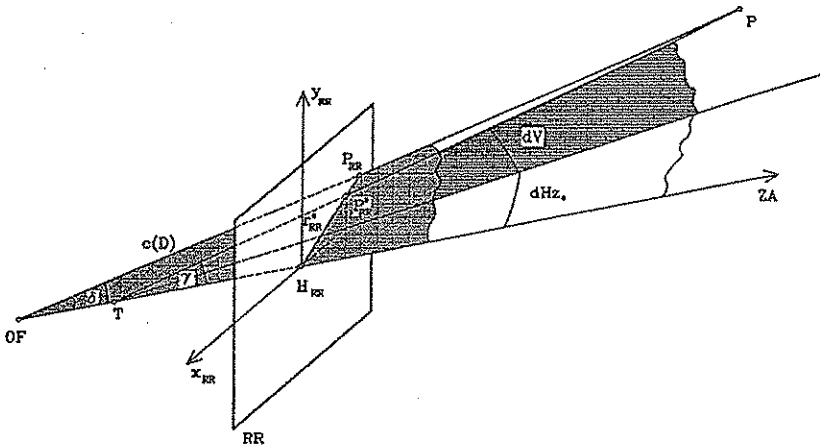
- Može se zaključiti uspon zenitne daljine u obliku stepenica prilikom posmatranja fiksnog cilja u različitim vertikalnim pozicijama ciljnog durbina. Ova promjena zenitne daljine koja je izračunata iz otklona objašnjava se na osnovu nedostatka u kalibriranju korištenih parametara otklona, budući da je očit jak uticaj zenitne daljine u strane y_{RR} - koordinate.
- U svakoj fiksnoj zenitnoj udaljenosti, dakle kod okretanja alhidade, obračuni dobiveni iz obrade slike i obračuna veličine otklona morali bi biti konstantni. Zenitna daljina malo opada, ako se alhidada okrene u smjeru okretanja kazaljki na satu. Ovaj efekat se objašnjava okretanjem referentnog okvira oko vizurne osi.

2.3.3. Izračunavanje veličine otklona

Radi ekscentričnog pozicioniranja tačke cilja P (slika 13) slika tačke P' u rektificiranoj ravni referentnog okvira RR se ne poklapa sa tačkom proboja H' (glavna tačka preslika) vizurne osi. Moraju se odrediti popravke na postavljenim pravcima i zenitnoj daljini, za koje bi se durbina morao okretati, da bi se vizurna osa poklopila sa TP . Ove popravke dH_z i dV se zovu veličine otklona [16].

Kod izračunavanja veličina otklona dolazi do slijedećeg problema: tačka sjecišta teodolitne osovine se ne poklapa sa variablним centrom projekcije O_F durbina. Može se mjeriti samo ugao δ u O_F i radijalni razmak r_{RR} između H_{RR} i P_{RR} (slika 13). Izračunavanje pravaca otklona bi morao biti određeno vrijednostima r_{RR}° i γ , koji nisu mjerljivi.

ZA	vizurna os
O_F	centar projekcije cilja durbina
T	sjecišta kose osovine, uspravne osovine i vizurne ose
H_{RR}	glavna tačka= tačka proboja vizurne osi



Slika 13. Otklon pravca i preslikavanje durbina

RR	rektificirana ravan referentnog okvira (X, y)
dHz_0, dV	otklon pravaca
$c(D)$	vidno polje

Centar projekcije O_F se mijenja sa fokusiranjem. Istovremeno se mijenja i položaj vizurne osi. Ova promjena iznosi samo 0.15mgon i ne može biti strogo modelirana. Stoga se izostavlja.

Pošto je razlika između tačke sjecišta osi projekcije T i O_F mala, može se raditi sa uglom δ i r_{RR}° u O_F , umjesto sa vrijednostima ugla γ i T i distance r_{RR}° koje se ne mogu mjeriti.

Dobije se:

$$\tan(\delta) = \frac{r_{RR}}{C}$$

r razmak između tačke sjecišta projekcionne ose i preslikane tačke na CCD-polju
 c vidno polje: razmak između CCD-senzora i O_F . C je funkcija promjenjive žarišne daljine f, odnosno pozicije fokusnog sočiva $c=c(D)=c(f)$.

Slikovna razdaljina c se u skladu sa (5) modelira polinomom drugog stepena, čiji koeficijent može biti određenom tokom kalibriranja.

$$c(D) = A_0 + A_1 \cdot D + A_2 \cdot D^2 \quad (8)$$

$c(D)$ može se takođe tumačiti kao mjerilo, koji prenese preslikavanje durbina u jednu centralnu projekciju sa centrom T .

Dalje su potrebne formule za izračunavanje veličina otklona:

$$dHz_0 = \arctan \left(\frac{x_{RR}}{c(D)} \right)$$

$$dHz = \arcsin \left(\frac{\sin(dHz_0)}{\sin(posV)} \right) \quad (9)$$

$$dV = \arctan \left(\frac{y_{RR}}{c(D)} \right)$$

D	pozicija fokusnog sočiva (izmjerena)
A_0, A_1, A_2	parametri otklona
$c(D)$	mjerni faktori
x, y	koordinate slike tačke cilja u ravni referentnog okvira
dHz_0	prostorni ugao otklona u ravni kroz nagnutne ose i vizurne ose
dHz, dV	veliĉine otklona
$posHz, posV$	odgovarajuće ĉitanje kruga
dHz, dV	odgovarajuće veliĉine otklona

Konaĉni pravci i zenitne daljine prema nekoj preslikanoj taĉki u CCD-polju se dobiju popravljanjem ĉitanja krugova oko veliĉina otklona, pri ĉemu se predznak dobije na osnovu poloŹaja durbina.

$$Hz = posHz \pm dHz$$

$$V = posV - dV$$

GEOIPP: Target Oscilations:

time: 1999-10-04 17:00:07

log comment: Test

time limit 100 s ticks per second 100 interest area 79 x 48

stop time: 17:01:471 start time: 94161 s 78 ticks stop time: 94221 s 5 ticks

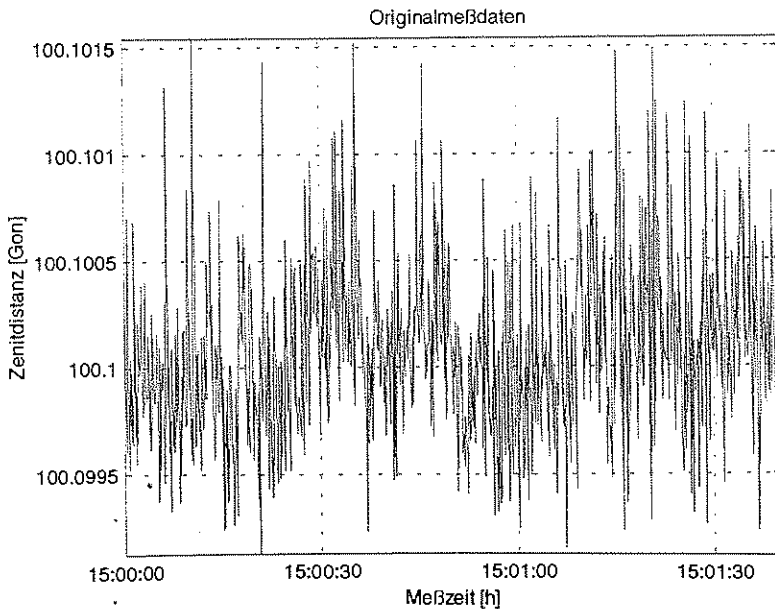
number of cycles: 1000 in 99.99 s (10.0 c/s)

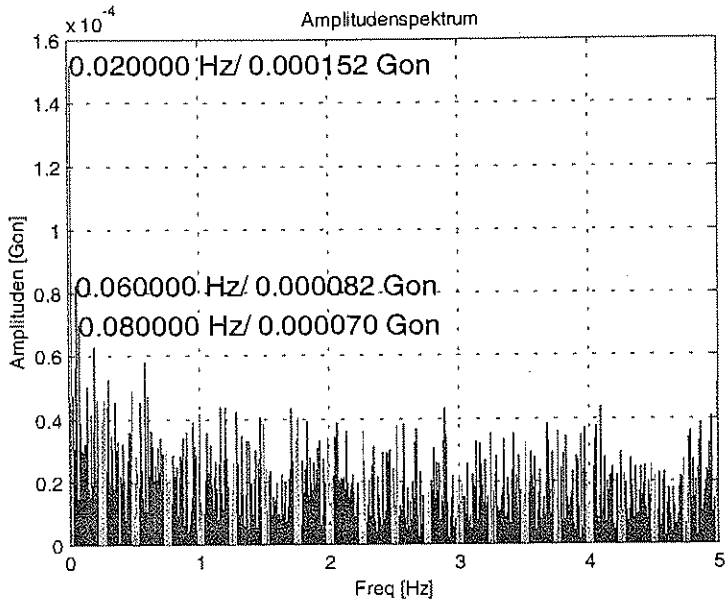
number of records 1000

time[s]	dHz[Gon]	dV[Gon]	Hz[Gon]	V[Gon]	
0.10	-0.001429	0.001293	339.064041	100.100433	00101
0.20	-0.001720	0.000628	339.063750	100.099768	01000
0.30	-0.001987	0.000766	339.063483	100.099906	11101
0.40	-0.002129	0.000474	339.063341	100.099614	01000
0.50	-0.002185	0.000990	339.063285	100.100130	11101
0.60	-0.001487	0.001563	339.063983	100.100703	01000
0.70	-0.002167	0.000705	339.063303	100.099845	11101
0.80	-0.001517	0.000383	339.063953	100.099523	01000
0.90	-0.001488	0.000769	339.063982	100.099909	11101
1.00	-0.001943	0.000569	339.063527	100.099709	01000
1.10	-0.002091	0.000902	339.063379	100.100042	11101
1.20	-0.001359	0.000511	339.064111	100.099651	01000
1.30	-0.001260	0.000839	339.064210	100.099979	11101
1.40	-0.001300	0.000497	339.064170	100.099637	01000
1.50	-0.001611	0.000592	339.063859	100.099732	11101
1.60	-0.002018	0.000828	339.063452	100.099968	01000
1.70	-0.001384	0.001542	339.064086	100.100682	11101
1.80	-0.001596	0.000544	339.063874	100.099684	01000
1.90	-0.001594	0.001110	339.063876	100.100250	11101

Dobiveni podaci nakon transformacija i rotacija, koji se memorišu u računaru (gornji prikaz).

Daljom obradom pomoću Matlab-a, Excel-a i drugih programa dobivaju se informacije o signalu i mjerenjima.





3. Zaključak

U radu se daje kratak pregled funkcija i mogućnosti učinka sa posebnostima mjernog robota videoteodolita TM3000V/VD Leica.

Hardware-ske komponente mjernog robota su opisane s tehničkim funkcijama. Velika pozornost je data transformacijama za izračunavanje centriranih pravaca kod ekscentričnog pozicioniranja tačaka cilja.

Nove grupe sa novim funkcijama, kao senzor za mjerenje dužina i kamera u boji su odlična sredstva za povećavanje produktiviteta i kvaliteta geodetskog rada.

4. Literatura

- [1] Berger, W., 1989: Entwicklung eines neuen optischen Zielverfahrens, Diplomarbeit, TU Wien
- [2] Chalupa, U., 1997: Kalibrierung von CCD-Kameras in motorisierten Theodoliten, Diplomarbeit, TU Wien
- [3] Deumlich, F., 1988: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 8.Aufl., VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- [4] Fabiankovitsch, J., 1990: Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzialbildern, Dissertation TU Wien
- [5] Huep, W., 1988: Konzeption und Einsatzmöglichkeiten eines automatischen Theodolitsystems, X. Inter. Kurs für Ingenieurmessung, München, Dümler, Bonn
- [6] Kahmen, H., Suhre, G. 1993: Ein lernfähiges tachymetrisches Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter, ZfV 108 Heft 8

- [7] Kahmen, H., et al, 1984: Ein intellegentes polares Vermessungssystem für die Beobachtung statischer und kinematischer Vorgänge, ZfV 109, Heft 11
- [8] Kahmen, H., 1984: Selbsttätig zielende tachymetrische Vermessungssysteme für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, IX. Internationaler Kurs für Ingenieurmessung, Graz
- [9] Kahmen, H., 1997: Vermessungskunde, 19.Aufl., Walter de Gruyter, Berlin, New York,
- [10] Kraus, K., 1990: Fernerkundung, Band 2, Ferd. Dümmler Verlag, Bonn
- [11] Leica, 1991: WILD TM3000, Gebrauchsanweisung, Leica Heerbrugg AG, Heerbrugg
- [12] Lenz, R., 1989: Image Data Acquisition with CCD Cameras, Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna 1989, Grün / Kahmen (Editors), Wichmann Verlag
- [13] Roic, M., 1996: Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, TU Wien
- [14] Tompsett, M. F. et al 1971.: Charge Coupled Imaging Devices: Experimental Results; IEEE Tran. Electr. Dev.; Vol. 18.
- [15] Ueffenkamp, V. 1993: Conception of digital turning and tilting camera, Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich 1993, Grün / Kahmen (Editors), Wichmann Verlag
- [16] Wieser, A., 1995: Überwachungsmessungen mit Videotheodoliten, Diplomarbeit TU Wien

Zahvaljujem se mojim prijateljima i kolegama Uni.-Ass. Dipl.-Ing. Anton Niessner rukovodiocu grupe za obradu slika sa videoteodolitem na Institutu za inženjersku geodeziju i Dipl.-Ing. Hauke von Webern naučnom saradniku projekta, koji su mi svojim savjetima i prijedlozima pomogli da uspješno završim ovaj rad.

Takođe se zahvaljujem Mag. Denisi Gibović, koja je prevela ovaj rad sa njemačkog na bosanski jezik.

Measurement Robots for Geodetic Applications

Abstract

In this report a review about the first measurement robot, i.e. the GEOROBOT, and in particular the video theodolit TM3000V/VD is given. Starting from the description of the development of the GEOROBOT system, the system design of a video theodolite will be described in detail. The main system components are the servo motors, CCD camera, framegrabber, targets and the reference frame. Afterwards the coordinate systems of the sensors and their relationship will be discussed. The relationship between the different systems can be obtained by transformations. Finally the transformed data is summarized and the results of measurements with the video theodolite are presented.

Sažetak

U ovom radu dat je kratak pregled o mjernim robotima zvani Georobot a naročito o videoteodolitu TM3000V/VD. Detaljno je predstavljena izgradnja sistema o videoteodolitima sa odgovarajućim komponentama (CCD-Kamera, servomotori, karta za obradu slika, ciljne markice, referentni okvir,...). Posebnju pažnju sam posvetio koordinatnim sistemima senzorskih komponenata dakle transformacijama između njih.

Rad završava pregledom dobivenih podataka nakon transformacije.