Optički postupak digitalizacije oblika projiciranjem kodiranog svjetla

Drvar, Nenad

Doctoral thesis / Disertacija

2008

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:201677

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

OPTIČKI POSTUPAK DIGITALIZACIJE OBLIKA PROJICIRANJEM KODIRANOG SVJETLA

DOKTORSKI RAD

Mr. sc. NENAD DRVAR

ZAGREB, 2007.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

OPTIČKI POSTUPAK DIGITALIZACIJE OBLIKA PROJICIRANJEM KODIRANOG SVJETLA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Akademik STJEPAN JECIĆ

Mr. sc. NENAD DRVAR

ZAGREB, 2007.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 531.7

Ključne riječi: digitalizacija prostornog oblika, metoda kodiranog svjetla, varijabilni parametri kalibracije, sustav sa više kamera, problem jednoznačnosti, slobodni kalibar

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: STROJARSTVO

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Mentor rada: akademik Stjepan Jecić

Broj stranica: 186

Broj slika: 98

Broj tablica: 4

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 82

Datum obrane: _____

Povjerenstvo:

Dr.sc. Vedran Mudronja, red.prof. – predsjednik povjerenstva

Akademik Stjepan Jecić – voditelj doktorskog rada

Dr.sc. Mirko Butković, red.prof. Tehničkog fakulteta, Rijeka – član povjerenstva

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

ZAHVALA

Ponajprije, želio bih izraziti najveću zahvalnost svom mentoru, akademiku Stjepanu Jeciću, što mi je omogućio bavljenje ovim izuzetno zanimljivim i iznimno aktualnim područjem, kao i na pruženoj podršci, razumijevanju i strpljenju.

Veliku zahvalnost dugujem i dr. M. Gomerčiću koji je unatoč prenatrpanom radnom vremenu uspijevao pronaći vremena za konzultacije te nesebično proslijediti vrijedne informacije iz industrije.

Nadalje, ugodna mi je dužnost zahvaliti se abecednim redom svim kolegama i suradnicima sa Katedre za eksperimentalnu mehaniku na svakodnevnoj ugodnoj suradnji, strpljenju zbog opstrukcije labosa te asistiranju prilikom provođenja eksperimenata i obrade rezultata: Ante, Gordane, Janoš - velika vam hvala. Ne smijem izostaviti niti prof. M. Husnjaka i prof. D. Semenskog kojima također zahvaljujem na podršci.

Dodatno bih se želio zahvaliti i prof. V. Mudronji, voditelju Katedre za mjerenja i kontrolu pri FSB-Zagreb, na razumijevanju i ustupljenom vremenu na kontaktnom trokoordinatnom mjernom sustavu korištenom prilikom izrade ovog rada.

Posebno bih istakao g. T. Hercigonju iz tvrtke Topomatika d.o.o. koji mi je prijateljski izašao u susret i nesebično ustupio sustav Atos kako bih na vrijeme uspio dovršiti sve eksperimente, na čemu mu posebno zahvaljujem.

Na kraju, veliko hvala i mojoj obitelji.

U Zagrebu, studeni 2007.

Autor

SADRŽAJ

str.

Predgovor IV

Sažetak VI

Summary VII

Ključne riječi VIII

Popis važnijih oznaka IX

Popis slika X

Popis tablica XIV

1. Uvod 1

1.1. Definicija problema 1

1.2. Cilj rada 4

1.3. Hipoteza rada 5

1.4. Opis istraživanja 5

1.5. Dosadašnje spoznaje 6

2. Metoda projekcijskog kodiranog nekoherentnog svjetla 8

2.1. Modeliranje optičkog preslikavanja korištenjem jedne kamere 9

2.2. Modeliranje optičkog preslikavanja korištenjem dviju kamera 13

2.3. Metoda epipolarne ravnine 14

2.4. Metoda izjednačavanja zrakovnog snopa 18

2.5. Kalibracija sustava 21

2.6. Rješavanje problema jednoznačnosti 22

2.7. Računanje objektnih koordinata 29

3. Dvostruko projiciranje nekoherentnog kodiranog svjetla 31

3.1. Kalibracija sustava 32

3.2. Rješavanje problema jednoznačnosti ... 33

4. Kritički osvrt ... 37
4.1. Analiza vanjskih faktora ... 39
4.1.1. Karakteristike mjernog objekta ... 40
4.1.2. Okolišni utjecaji ... 51
4.1.3. Tehnološki utjecaji ... 57
4.1.4. Rukovanje mjernom opremom ... 60
4.1.5. Programska podrška ... 61
4.1.6. Ljudski faktor ... 64
4.1.7. Zahtjevi naknadne obrade podataka ... 64
4.2. Analiza unutrašnjih faktora ... 66
4.2.1. Utjecaj strukturnih elemenata mjernog uređaja ... 66
4.2.2. Utjecaj načina definiranja mjerne točke i mjernog volumena ... 72
4.2.3. Utjecaj kalibracije sustava ... 75
4.2.4. Utjecaj programske podrške ... 77

5. Rješavanje problema jednoznačnosti ... 78
5.1. Vremensko kodiranje ... 80
5.2. Objektno kodiranje ... 83
5.3. Direktno kodiranje ... 85

6. Geometrija triju kamera ... 87

7. Geometrija četiriju kamera ... 94

8. Sustav s više kamera ... 97
8.1. Razrada sustava ... 98
8.1.1. Poopćeni prikaz mjerne procedure ... 99
8.1.2. Odabir matematičkog modela ... 99
8.1.2.1. Odabir konfiguracije sustava ... 101
8.1.3. Odabir metode za rješavanje problema jednoznačnosti ... 105

8.1.3.1. Rješavanje problema jednoznačnosti kod sustava s više kamera 108
8.1.4. Određivanje stereoparova u slici 113
8.1.4.1. Određivanje stereoparova 4-3-2 triangulacijom 120
8.1.4.2. Princip 1,2,3,4 referentne kamere 123
8.1.5. Volumetrijska kalibracija slobodnim kalibrom 128
8.2. Struktura mjernog programa 133
8.3. Mjerna procedura 139
8.3.1. Priprema mjernog objekta 139
8.3.2. Podešavanje optičkih elemenata projektora i kamera 140
8.3.3. Određivanje unutrašnjih i vanjskih parametara odabranog matematičkog modela postupkom inicijalne kalibracije 144
8.3.4. Rješavanje problema jednoznačnosti projiciranjem unakrsno kodiranog svjetlosnog uzorka 145
8.3.5. Računanje objektnih koordinata 146
8.3.6. Povezivanje rezultata mjerenja iz različitih orijentacija mjernog objekta 146
8.3.7. Prikaz i obrada rezultata mjerenja 147
8.4. Korištena oprema 147

9. Eksperimentalni dio 147
9.1. Kalibracija planarnim kalibrom 147
9.2. Kalibracija slobodnim prostornim kalibrom 151
9.3. Kalibracija slobodnim kalibrom s pomaknutom kamerom 153
9.4. Digitalizacija oblika piramidalne konstrukcije 155
9.5. Digitalizacija oblika polukugle 158
9.6. Digitalizacija modela ljudske glave 164
9.7. Digitalizacija strojnog elementa 169

10. Zaključak 174
11. Literatura 178
12. Kratki životopis 185

PREDGOVOR

Počeci razvoja optičkih digitalizacijskih metoda za određivanja oblika i njihove promjene na Katedri za eksperimentalnu mehaniku FSB Zagreb datiraju još od početka devedesetih godina prošlog stoljeća. Razvoj je temeljen na suradnji s Institutom za motornu tehniku i eksperimentalnu mehaniku TU Braunschweig i poduzećem GOM mbH. Prvenstveno je usmjeren na razvoj pasivnih i aktivnih sustava druge vrste, čiji prikaz donosi poglavlje 2. Iz te suradnje proizašao je sustav ATOS kojeg karakterizira kruta konstrukcija zadužena za fiksiranje položaja dviju CCD kamera u konvergentnoj orijentaciji s centralno postavljenim projektorom. Ovaj sustav, u svojim različitim varijantama i danas, više od petnaest godina kasnije, jedan je od iznimno dobro prihvaćenih sustava ove vrste u svijetu. Primjenu je pronašao u svim aspektima industrijske proizvodnje, znanstvenim, geološkim i svemirskim istraživanjima, medicini, arheologiji i sl. Proširenje sustava druge vrste nastaje u ovoj instituciji krajem devedesetih godina prošlog stoljeća, uvođenjem dodatnog projekcijskog uzorka okomitog na uzorak koji projicira standardni sustav ATOS druge vrste. Ova modifikacija omogućila je nezavisno određivanje obje slikovne koordinate u svakoj od kamera, te je poglavljem 3 dan prikaz relevantnih dijelova ovog sustava. Usporedno s razvojem projekcijskih sustava dolazi i do prepoznavanja potrebe za dodatnom edukacijom studenata strojarstva, budućih korisnika ovih sustava, što je i meni omogućeno kroz nastavu eksperimentalne mehanike. Sustavi o kojima ovdje govorim nastali su kao sprega multidisciplinarnih saznanja. Za njihov razvoj i ispravnu primjenu potrebno je poznavati principe fotogrametrije, optike, obrade slike, mjeriteljstva, matematike i raznih tehnika programiranja. Sva ova područja nisu bila u dovoljnoj mjeri pokrivena na ovoj instituciji, što se donekle promijenilo prije nekoliko godina uvođenjem specijalističkih smjerova i novih predmeta koji se ciljano bave ovim sustavima, u čemu sam i sam imao prilike sudjelovati. S tim u vidu, na temelju sedmogodišnjeg iskustva u radu s projekcijskim sustavima, poglavljem 4 koje je usko vezano uz moj magistarski rad donosim kritičku usporedbu sustava druge i treće vrste s obzirom na unutrašnje i vanjske utjecajne parametre koji utječu na performanse sustava. Osnovna razlika između sustava druge i treće vrste je u izmijenjenom načinu rješavanja

problema jednoznačnosti, stoga su poglavljem 5 sistematizirani postupci rješavanja problema jednoznačnosti, primjenjivi u projekcijskim sustavima, te istaknute njihove relativne prednosti i nedostaci. Široko područje primjene projekcijskih sustava dovodi do sve većih zahtjeva za ergonomijom primjene, brzinom rada, kvalitetom i prostornom raspodjelom točaka u digitaliziranom oblaku točaka. U tom smislu prepoznato je da se na temelju sustava treće vrste može razviti sustav s proizvoljnim brojem kamera koji dopušta njihovo proizvoljno pozicioniranje, a koji za kalibraciju ne zahtijeva kalibracijski objekt strogo definiranog oblika i rasporeda markera. Poglavljima 6 i 7 prikazano je modeliranje triju, odnosno četiriju kamera na temelju proširenja principa epipolarne ravnine koje koriste sustavi druge vrste, dok je poglavljem 8 prezentiran razvoj novog sustava koji zadovoljava prethodno spomenute zahtjeve. Prikazan je utjecaj broja kamera, kalibracije slobodnom kalibrom i različitih načina analize snimljene slike na broj i raspodjelu točaka u oblaku točaka. Prikladnim algoritmima smanjen je broj pogrešno pronađenih stereoparova i predložena apsolutna procedura koja pojednostavnjuje i ubrzava rješavanje problema jednoznačnosti kod unakrsnog projiciranja. Eksperimentima su na nekoliko ilustrativnih primjera prikazane mogućnosti novog sustava.

SAŽETAK

U radu je razmatrana problematika razvoja optičkog sustava koji digitalizaciju oblika površine provodi projiciranjem nekoherentnog kodiranog svjetla. Cilj je razvoj fleksibilnog sustava s proizvoljnim brojem kamera koji će imati mogućnost variranja vanjskih parametara kalibracije. Želi se poboljšati prilagodljivost sustava mjernom zadatku, smanjiti broj potrebnih projekcija za digitalizaciju kompletnog mjernog volumena te postići povećanje prostorne rezolucije bez povećanja rezolucije kamera. Eliminirat će se potreba za specijalnim planarnim kalibracijskim objektima, odnosno ostvariti mogućnost kalibracije sustava s više kamera slobodnim kalibrom. Primjena metode izjednačenja zrakovnog snopa omogućila je variranje vanjskih parametara kalibracije te modeliranje proizvoljnog broja kamera. Mogućnost promjene orijentacije kamera dovodi do veće slobode u prilagođavanju projekcijskog sustava zadanom mjernom zadatku. Eksperimentalno je dokazano da se sustav sa četiri kamere u više konfiguracija može kalibrirati korištenjem mjernog objekta kao slobodnog kalibracijskog objekta. Povećanje broja kamera dovodi do ujednačavanja unutrašnjih parametara kalibracije, što je posebno izraženo kod slobodnog prostornog kalibracijskog objekta. Predloženom apsolutnom metodom određivanja stereoparova za unakrsno projicirane svjetlosne uzorke vremenskog faznog pomaka i Gray koda, eliminirana je potreba za dvostrukim pretraživanjem faznih slika, te utjecaj diskontinuiteta. Ubrzano je indeksiranje stereoparova, svaki piksel u korištenoj kameri kodiran je jedinstvenim kodom, neovisno o susjednim pikselima i susjednim kamerama. Kombinacijom amplitudnog filtriranja slike parcijalnih faza i gradijentnog filtriranja slike apsolutnih faza eliminirana su kritična područja, te smanjen broj pogrešno identificiranih stereoparova. Uvođenjem 1,2,3,4 načina analize povećana je prostorna rezolucija, odnosno definicija površinskih detalja. Uvođenjem 4-3-2 postupka triangulacije omogućeno je trianguliranje i onih točaka koje nisu istovremeno vidljive u svim kamerama, a njihovom kombinacijom postignuta je i mogućnost digitalizacije površina djelomično zasjenjenih površinskim artefaktima. Provedenim eksperimentima pokazalo se da je povećanje broja kamera i mogućnost variranja vanjskih parametara orijentacije kamera dovelo do povećanja potpunosti digitalizacije površine, odnosno do smanjenja neophodnog broja projekcija u odnosu na sustave prethodnih tipova.

SUMMARY

This dissertation discusses development of the optical system that performs digitalization of surfaces by projecting non-coherent coded light patterns. The aim of this paper is development of the flexible system that could utilize arbitrary number of cameras that will have the possibility of altering external calibration parameters. System should be able to adapt to the scanned object, require lower number of projections to digitalize object compared to similar systems, and increase the spatial resolution without the need for the actual camera resolution increase. The need for the special planar calibration objects will be eliminated by providing means to calibrate multi camera system with free-form object. The utilization of bundle adjustment method provided means to calibrate and model multiple camera system with variable external calibration parameters. The possibility of changing camera orientation led to a greater freedom when it comes to adjusting projection system to the measurement task. It is experimentally demonstrated that four camera system can be calibrated by using measuring object as free-form calibrating object. Increased number of cameras led to balancing internal calibration parameters, whose convergence is faster when utilizing free-form calibration object. Proposed absolute method of determining stereo pairs, for cross-projected temporal phase shifting and Gray code patterns, eliminates the need for twofold phase image scanning and the influence of discontinuities. Stereo pair indexing is speed up and each pixel in utilized cameras can be coded by unique number, regardless of neighboring pixels and cameras. By combining amplitude filtering of partial phase images and gradient filtering of absolute phase images critical image areas were detected and removed. That reduced number of stereo pair identification errors thus reducing number of outliers. By introducing 1,2,3,4 analysis, spatial resolution and surface details definition are improved. Triangulation in 4-3-2 order allowed determination of object points that are not at the same time visible in all utilized cameras. Combination of both methods made it possible to digitize points that are partially occluded by surface artifacts. Conducted experiments demonstrated that the increase of number of utilized cameras and the possibility to vary their external parameters increased surface digitalization completeness by reducing number of projections, compared to two or single camera systems.

KLJUČNE RIJEČI

HRVATSKI	ENGLESKI
digitalizacija prostornog oblika	shape digitalization
metoda kodiranog svjetla	coded light method
varijabilni parametri kalibracije	variable calibration parameters
sustav sa više kamera	multi camera system
problem jednoznačnosti	uniqueness problem
slobodni kalibar	free form calibration object

POPIS VAŽNIJIH OZNAKA

Mala slova

$a(x,y,t)$	- srednja vrijednost svjetloće piksla
c	- konstanta kamere, pikseli
d	- duljina bazne linije, mm
$\mathbf{p},\mathbf{p'}$	- koordinate stereoparova, pikseli
$s(x,y,t)$	- srednja vrijednost svjetloće piksla
$\mathbf{t}$	- vektor translacije, mm, piksli
x, y, z	- koordinatni sustav kamere, piksli
x_0, y_0	- slikovne koordinate glavne točke snimanja
$\Delta x, \Delta y$	- kompenzacijski parametri odstupanja od centralne projekcije
z	- predmetna duljina, mm

Velika slova

$A_{1\cdots3}$	- radijalno simetričnu distorziju
B_1	- nejednolikost mjerila uzduž osi x i y
B_2	- neokomitost osi x i y
$C_{1\cdots3}$	- izobličenje slike kao posljedicu neravnine senzora u kameri
$D_{1\cdots10}$	- nepravilno izobličenje slike i radijalno nesimetrična distorzija objektiva
$\mathbf{E}$	- esencijalna matrica
$\mathbf{F}$	- fundamentalna matrica
$I(x,y,t)$, $I_{1\ldots4}$	- intenzitet svjetloće piksla
$\mathbf{P}$	- projekcijska matrica kamere
$\mathbf{Q}$	- kvadrifokalni (četverožarišni) tenzor
$\mathbf{R}$	- matrica rotacije koordinatnog sustava
$\mathbf{T}$	- trifokalni (trožarišni) tenzor
X, Y, Z	- objektne (prostorne) koordinate, mm
X^*, Y^*, Z^*	- pomoćni koordinatni sustav, mm

Grčka slova

$\varphi(x,y,t)$	- relativna faza u promatranom pikslu
$\delta(x,y,t)$	- faza u promatranom pikslu
σ_z	- standardna devijacija pogreške određivanja koordinate z

Oznake u tekstu

LEM-FSB	- Laboratorij za eksperimentalnu mehaniku pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Zagreb
TMU	- Trokoordinatni mjerni uređaj

POPIS SLIKA

str.

Slika 2.1. Projekcijski digitalizacijski sustav "Atos" 8

Slika 2.2. Princip projekcijskog senzora "Atos" 9

Slika 2.3. Uz definiciju koordinatnih sustava 10

Slika 2.4. Veza slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljne orijentacije kamere 11

Slika 2.5. Triangulacija položaja točke P primjenom dvije kamere....14

Slika 2.6. Princip epipolarne ravnine 16

Slika 2.7. a) standardni Atos kalibracijski objekt b) prikaz točaka korištenih prilikom kalibracije s linijom za definiciju mjerila....22

Slika 2.8. Princip metode vremenskog faznog pomaka: a) projicirani uzorci pomaknuti za $\pi/2$, b) prikaz kontrolirane promjene svjetloće u nekom pikselu 25

Slika 2.9. a) Detalj parcijalnih faza na površini objekta, b) pilasti uzorak uzduž horizontalnog presjeka prema slici a). 26

Slika 2.10. Ponavljanje parcijalnih faze u a) lijevoj i b) desnoj kameri.....26

Slika 2.11. Princip metode Gray koda 27

Slika 2.12. a) Detalj Gray koda, b) stepenasta raspodjela svjetloće uzduž pravca u slici a)....28

Slika 2.13. Parcijalne, stepenaste i apsolutne faze izračunate kombinacijom metode vremenskog faznog pomaka i metode Gray koda....28

Slika 2.14. Apsolutne faze u a) lijevoj i b) desnoj kameri 29

Slika 2.15. Uz princip računanja objektnih koordinata....30

Slika 3.1. Ilustracija dvostrukog projiciranja kod sustava s dvije kamere 31

Slika 3.2. Položaji kamera u odnosu na kalibracijski objekt za vrijeme kalibriranja sustava....32

Slika 3.3. Ilustracija projekcije apsolutnih faza u dva međusobno okomita smjera a) vertikalno, b) horizontalno....34

Slika 3.4. a) Ilustracija dvosmjernog kodiranja, b) zbrojene horizontalne i vertikalne faze 35
Slika 4.1. Zasjenjenost senzora površinskim artefaktom kod laserskog sustava 43
Slika 4.2. Uz utjecaj površinske geometrije 44
Slika 4.3. Djelomična rekonstrukcija kocke 45
Slika 4.4. Gubitak definicije točke zbog prodiranja projicirane zrake u osnovni materijal 46
Slika 4.5. Uz definiciju komponenata površinskih refleksija 47
Slika 4.6. Refleksija svjetla s lambertske površine 48
Slika 4.7. Refleksija svjetla sa refleksne površine 48
Slika 4.8. Simulacija odziva a) lambertske i b) refleksijske površine 48
Slika 4.9. Utjecaj sekundarnih refleksija: a)slika modela, b) parcijalne faze, c) apsolutne faze, d)intenzitet jedne od projekcija Gray koda prikazan pseudo-bojama 50
Slika 4.10. Lom stakalca s projekcijskim uzorkom 52
Slika 4.11. Ilustracija utjecaja preosvijetljenja a) detalj površine sa ispravnim (gore) i preosvijetljenim (dolje) uzorkom vremenskog faznog pomaka b) područja očekivanih pogrešaka uslijed preosvjetljenja c) promjena parcijalnih faza uslijed preosvjetljenja 55
Slika 4.12. Utjecaj prašine a) u slici Gray koda, b) u slici apsolutnih faza 56
Slika 4.13. Utjecaj pomaka stakalca u slici a) vertikalnih faza b) horizontalnih faza 72
Slika 5.1. Prikaz metoda rješavanja problema jednoznačnosti 79
Slika 5.2. Uzorak Gray koda 81
Slika 5.3. N-ary kodovi izvedeni na temelju Hilbertove krivulje drugog reda 82
Slika 5.4. Objektno kodiranje linijama poznate raspodjele i intenziteta 83
Slika 5.5. DeBrujin uzorci, primjer objektnog kodiranja a) oblikom i b) bojom 84
Slika 5.6. Objektno kodiranje bojom 84
Slika 5.7. Direktno kodiranje a) intenzitetima sive i b) bojom 86
Slika 6.1. Konvergentna postava triju kamera 87
Slika 6.2. Trifokalna ravnina 88
Slika 6.3. Nedostaci epipolarnog pristupa 88

Slika 6.4. Uz definiciju trifokalnog tenzora 90
Slika 6.5. Točka-linija-linija 91
Slika 6.6. Točka-linija-točka 92
Slika 7.1. Primjer definicije točke u kameri C''' preko presjecišta tri ravnine 96
Slika 8.1. Postava sustava 102
Slika 8.2. Podešavanje udaljenosti: a) pogrešno, b) ispravno. 103
Slika 8.3. a) horizontalno i b) vertikalno pozicioniranje mjernog objekta 104
Slika 8.4. Ilustracija a) vertikalnih i b) horizontalnih apsolutnih faza 107
Slika 8.5. Ilustracija horizontalnih i vertikalnih faza za a) jedan i b) dva susjedna reda piksela 110
Slika 8.6. Apsolutne faze za a) dva reda piksela i za b) cijeli model 112
Slika 8.7. Razvoj slike u pravac, prelazak u jednodimenzionalni prostor 112
Slika 8.8. Diskontinuiteti nastali a)filtriranjem b) zasjenjenjem niže razine višom razinom 115
Slika 8.9. Filtriranje diskontinuiteta u faznim slikama amplitudnom modulacijom iznosa a) 0, b) 10, c) 20, d) 30 116
Slika 8.10. Rezultati filtriranja gradijentnim filtrom: a) nefiltrirano, b) filtrirano, c) oblak točaka bez pogrešnih osjeta 119
Slika 8.11. Oblak točaka koje su ispravno kodirane u sve četiri kamere čija je devijacija triangulacije manja od a) 1σ, b) 2σ, c) 3σ, d) 4σ. 122
Slika 8.12. Oblak točaka trianguliran 4-3-2 metodom čija je devijacija triangulacije manja od a) 1σ, b) 2σ 122
Slika 8.13. Ilustracija pronađenih stereoparova s jednom referentom kamerom a) referentna kamera 1, b) kamera 2, c) kamera 3, d) kamera 4 124
Slika 8.14. Kamera 2 kao referentna kamera 125
Slika 8.15. Oblak točaka koje su ispravno vidljive u sve četiri kamere izračunate preko četiri referentne kamere. 126
Slika 8.16. Oblak točaka za 4-3-2 triangulacijski model izračunatih preko četiri referentne kamere 127
Slika 8.17. Uvećan detalj slike 8y omeđen pravokutnikom 127
Slika 8.18. Utjecaj 1,2,3,4 analize na prostornu razlučivost 128

Slika 8.19. a) primjeri kodiranih točaka, b) položaji kamera pri kalibraciji jedne kamere slobodnim planarnim kalibrom 130
Slika 8.20. Položaji kamera u odnosu na slobodni kalibar tijekom kalibracije sustav sa 4-3-2 metodom 131
Slika 8.21. a) detalj pripremljene površine brodice, b) oblak kalibracijskih točaka s ilustracijom položaja kamere 132
Slika 8.22. Dijagram toka mjerne procedure 133
Slika 8.23. Dijagram toka inicijalne kalibracije sustava 134
Slika 8.24. Računanje faznih slika 135
Slika 8.25. Traženje stereoparova odabranim operatorom 136
Slika 8.26. Dijagram rješavanja problema jednoznačnosti 136
Slika 8.27. Rješavanje problema jednoznačnosti u kombinaciji sa 4-3-2 metodom 137
Slika 8.28. Rješavanje problema jednoznačnosti ako su u sve četiri kamere ispravno pronađeni stereoparovi 138
Slika 8.29. Primjena moiré efekta prilikom izoštravanja kamera 141
Slika 8.30. Projekcija 9 točaka za izoštravanje projektora 142
Slika 8.31. Podešavanje orijentacije četiriju kamera 143
Slika 9.1. Detalj planarnog kalibracijskog objekta 150
Slika 9.2. Kalibracija planarnim kalibrom 151
Slika 9.3. Prostorni kalibar s kodiranim točkama 153
Slika 9.4. Kalibracija slobodnim prostornim kalibrom 154
Slika 9.5. Kalibracija slobodnim prostornim kalibrom s pomaknutom kamerom 2 156
Slika 9.6. Stepenasta piramidalna konstrukcija 157
Slika 9.7. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na piramidalni model snimljena sa četiri kamere u pravokutnoj postavi s centralno postavljenim projektorom a) kamera 1, b) kamera 2, c) kamera 3, d) kamera 4. 158
Slika 9.8. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na model kugle; snimljeno sa četiri kamere u pravokutnoj postavi s centralno postavljenim projektorom a) kamera 1, b) kamera 2, c) kamera 3, d) kamera 4. 161

Slika 9.9. Triangulirane samo one točke koje su vidljive u sve četiri kamere s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000, b)20 162
Slika 9.10. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000, b)20 163
Slika 9.11. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 1σ i gradijentom a) 20000 b)20 164
Slika 9.12. Triangulacija kombinacijom 1,2,3,4 analize i 4-3-2 triangulacije za točke čija je devijacija triangulacije a) 4σ, b) 1σ. 165
Slika 9.13. Model ljudske glave 166
Slika 9.14. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na model ljudske glave 167
Slika 9.15. Triangulirane samo one točke koje su vidljive u sve četiri kamere s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000 b)20 168
Slika 9.16. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000, b)20 169
Slika 9.17. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 1σ i gradijentom a) 20000, b)20 169
Slika 9.18. Triangulacija kombinacijom 1,2,3,4 analize i 4-3-2 triangulacije za točke čija je devijacija triangulacije 1σ 170
Slika 9.19. Strojni element 171
Slika 9.20. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na strojni element 172
Slika 9.21. Profil strojnog elementa 172

POPIS TABLICA

Tablica 9.1. Unutrašnji parametri za slučaj kalibracije planarnim kalibrom 151
Tablica 9.2. Unutrašnji parametri za slučaj kalibracije slobodnim kalibrom 154
Tablica9.3. Unutrašnji parametri za slučaj kalibracije slobodnim kalibrom i pomaknutom kamerom 1 156
Tablica 9.4. Usporedba digitaliziranih promjera 173

1. Uvod

1.1. Definicija problema

Razvoj projekcijskih aktivnih sustava prve vrste za beskontaktnu digitalizaciju prostorne geometrije statičkih objekata započeo je usporedo s intenziviranjem razvoja elektroničkih računala (početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća) i to s razvojem digitalizacijskih sustava sastavljenih od konvergentne postave jednog projektora i jedne kamere. Pod pojmom projekcijskih aktivnih digitalizacijskih sustava misli se na one mjerne sustave koji jednoznačno definiranje prostornog položaja trenutno promatrane mjerne točke na površini mjernog objekta provode projiciranjem nekog svjetlosnog uzorka, te se koordinate objektne mjerne točke određuju relativno u odnosu na trenutni koordinatni sustav korištenog mjernog sustava. Uloga projektora kod sustava prve vrste bila je na jednoznačan način definirati relativan položaj pojedine mjerne točke na snimci površine mjernog objekta. Na temelju opažanja intenziteta svjetloće promatrane mjerne točke, ostvarenog digitalnom kamerom (odnosno digitalnim fotoaparatom), provodila se rekonstrukcija prostornih koordinata mjerne točke postupkom triangulacije. Opisana postava zahtijevala je poznavanje relativne orijentacije kamere u odnosu na projektor te korekcije eventualnih utjecaja korištenih optičkih komponenata na izobličenost snimljene slike. Procedure potrebne za određivanje parametara matematičkog modela nekog sustava u fotogrametriji općenito se opisuju pojmom *kalibracija sustava* (eng. *system calibration*), a provode se pomoću posebnih kalibracijskih objekata. Provođenje postupka kalibracije sustava nužan je korak u procesu određivanja parametara orijentacije elemenata sustava potrebnih za dobivanje mjernih informacija iz 2D slika. Kod sustava prve vrste, kao kalibracijski objekt koristio se posebno priređen planarni objekt poznate geometrije (prilagođene željenom mjernom volumenu i odabranim optičkim elementima), za koji se tijekom procesa kalibracije pretpostavljala apsolutna krutost. Neki autori koriste specifične kalibracijske objekte s kontroliranim ili općenitim pomakom [1,2,3,4,5], pa u ovom području ne postoji standardiziranost. Relativna orijentacija kamera – projektor određena kalibracijom, kod sustava prve vrste tijekom provođenja mjerenja nije se smjela mijenjati, jer to sustavi opisane izvedbe nisu mogli detektirati iz informacija dostupnih tijekom procesa mjerenja. Konačnost dimenzija kalibracijskog objekta, uz točnost njegove

izrade, te točnost ostvarenih pomaka, uvjetovale su dimenzije mjernog volumena kao i očekivanu mjernu nesigurnost i rezoluciju mjernog sustava. Proširenje opisanih sustava došlo je u vidu razvoja sustava druge vrste (poglavlje 2), dodavanjem druge kamere, dok se svrha projektora svela samo na jednoznačno kodiranje položaja mjerene točke. Projektor se uobičajeno nalazi smješten centralno u prostoru između kamera, te i dalje služi za jednoznačno definiranje slikovnih osjeta položaja mjerne točke na površini mjernog objekta u svakoj od kamera. Korištenjem dodatne kamere omogućeno je određivanje ukupno četiriju slikovnih osjeta (od potrebnih triju osjeta u vidu prostornih koordinata objektne točke), te se time postupkom kalibracije izravno gubi potreba za određivanjem relativne orijentacije pojedine kamere i projektora. Postupkom kalibracije sada se određuju samo parametri međusobne relativne orijentacije kamera, dok se orijentacija i položaj projektora nužno ne kalibriraju. Rekonstrukcija prostornog položaja mjerne točke uobičajeno se provodi postupkom triangulacije, gdje se virtualno unatraške projicira zraka svjetla iz svake od kamera, te se mjesto njihovog presjecišta proglašava izmjerenom objektnom mjernom točkom (detaljnije u poglavlju 2). Radi se o postupku za čije je provođenje potrebno prethodno poznavanje relativnog položaja korištenih kamera (poznatih kao vanjski parametri kalibracije), kao i parametre koji opisuju geometriju optičkih elemenata kamere i njihov utjecaj na distorziju snimljene slike (unutrašnji parametri kalibracije). Kod sustava s dvije kamere rješavanje problema jednoznačnosti pronalaženja istog slikovnog opažaja mjerne točke u svakoj od kamera potpomognuto je upravo poznavanjem geometrije sustava te konstrukcijom epipolarne ravnine, čija je geometrija izravna posljedica kalibracije sustava (ravnina koja prolazi projekcijskim središtima objektiva i odabranom objektnom mjernom točkom, poglavlje 2). Kalibracijski objekti pritom su i dalje pretežno planarni [6,7,8,9,10,11,12,13], s površinski nanesenim posebnim pravilnim optičkim markacijama unaprijed poznate geometrije. Jednaka ograničenja kao kod sustava s jednom kamerom (glede krutosti sustava i zavisnosti veličine kalibracijskog objekta i ukupnog mjernog volumena) vrijede i kod ovih tipova mjernih sustava.

Teoretskim modelima opisanih digitalizacijskih sustava prve i druge vrste zajednička je potreba za nepromjenjivošću vanjskih i unutrašnjih parametara kalibracije tijekom provođenja mjerenja, nakon što je ona jednom provedena. Nezadovoljavanje ovog uvjeta dovodi do pojave sustavnih pogrešaka mjerenja, koje se tijekom samog postupka mjerenja ne mogu kvantificirati (npr. promjena mjerila) [14,15]. Na zahtjev krutosti nepovoljno utječu mnogi unutrašnji i vanjski faktori, npr. toplinski utjecaji nastali uslijed zagrijavanja tijela projektora, neodgovarajuća krutost same noseće konstrukcije sustava te eventualne neželjene

pojave vibracija. Uzevši u obzir potrebu za mobilnošću spomenutih digitalizacijskih sustava, kao i potrebu za mjerenjem oblika u gotovo svim granama današnje proizvodnje, ovo je jedan od limitirajućih faktora primjene. Primjerice, da bi se promijenio mjerni volumen bilo bi potrebno provesti kompletnu rekalibraciju mjernog sustava te posjedovati odgovarajući kalibracijski objekt. Kod nekih izvedaba sustava toplinski utjecaji poništavaju se zasebnim izvorom svjetla koji je sa sustavom spojen svjetlovodom, odnosno korištenjem ventilatorski hlađenih izvora svjetla. Time je upravo jedan od izvora vibracija smješten u sam mjerni senzor. U dosadašnjem izlaganju nisu posebno prikazani vrsta i način projiciranja svjetla, budući da u većini slučajeva projektori nisu kalibrirani te se koriste samo za jednoznačno definiranje položaja mjerne točke. Jednaka diskusija odnosila bi se i na sustave koji projiciraju neki od uzoraka laserskog koherentnog svjetla, kao i na sustave koji projiciraju nekoherentno svjetlo koje kodiranje mjerne točke provodi preko geometrijski pravilnih ili nepravilnih uzoraka te uzrokovanja kontrolirane sinusoidalne promjene svjetloće. Pregled projekcijskih uzoraka donosi poglavlje 5.

Sljedeća generacija, digitalizacijski sustavi treće vrste (poglavlje 3) koji su do sada samo idejno razrađeni na ovoj instituciji [16], te prema dostupnim podacima nisu međunarodno verificirani u vidu daljnje razrade predloženog modela, uvela je dvostruko projiciranje nekoherentnog kodiranog svjetla u dva međusobno okomita smjera uz zadržavanje konvergentne postave dviju kamera. Time je uz korištenje metoda vremenskog faznog pomaka i metode Gray koda iz postupka jednoznačnog prepoznavanja položaja slikovnih osjeta mjerne točke eliminirana potreba za konstrukcijom epipolarne plohe pri rješavanju problema jednoznačnosti, budući da su sada svakoj od točaka na mjernom objektu pridijeljene dvije različite faze za čiju identifikaciju u svakoj od kamera nije potrebno poznavati vanjske parametre kalibracije. Ovakvim pristupom otvara se mogućnost promjene vanjskih parametara kalibracije tijekom samog procesa mjerenja, odnosno javlja se efekt samokalibracije sustava (napomena: u fotogrametriji se pod pojmom samokalibracije uobičajeno smatra samo postupak konverzije mjerila iz slikovnog u metrički mjerni sustav, korištenjem informacija o veličini CCD čipa ili filma, dok se ovdje pod tim pojmom misli na šire određivanje svih vanjskih i unutrašnjih parametara kalibracije). Predefiniranost matematičkog modela i eliminacija fiksne geometrijske veze uz jednostavniji način rješavanja problema jednoznačnosti dovela je do eliminacije onog dijela sustavnih kumulativnih pogrešaka koje su vezane uz zahtjev nepromjenjivog iznosa vanjskih parametra kalibracije mjernog sustava tijekom ukupnog vremena provođenja procesa mjerenja. Izostaje i potreba trianguliranja položaja objektnih točaka na temelju unaprijed poznate geometrije

sustava, jer se cijeli postupak određivanja kalibracijskih parametara sustava i samog mjerenja objektnih koordinata može provesti u jednom koraku, izravno metodom izjednačavanja zrakovnog snopa (eng. *bundle adjustment*). Mogućnost variranja vanjskih parametara kalibracije, koji prema dostupnoj literaturi do sada nisu korišteni u konstrukciji nekog projekcijskog 3D digitalizatora, svakako bi trebala proširiti mogućnosti primjene ovih uređaja. Posebno stoga što je u svijetu razvoj digitalizacijskih sustava izravno potican od strane privrede, koja nerijetko pred digitalizacijske sustave postavlja zahtjeve koje s trenutnim konstrukcijskim rješenjima još uvijek nije moguće u potpunosti ispuniti. Pritom se oni, primjerice, odnose na digitalizaciju izrazito reljefnih površina s visokom prostornom rezolucijom u što kraćem vremenskom periodu i sa zadanom točnošću, uz istovremeno postojanje velikih lokalnih površinskih zaobljenja ili diskontinuiteta te potrebe digitalizacije izrazito refleksnih površina karakterističnih za visoko obrađene industrijske izratke.

1.2. Cilj rada

Cilj predložene disertacije je razvoj četvrte generacije digitalizacijskih sustava sa četiri kamere, koji će imati mogućnost ostvarivanja varijabilnih vanjskih parametara kalibracije uz zadržavanje fiksnih unutrašnjih parametara. Želi se ostvariti mogućnost kalibracije sustava s više kamera slobodnim kalibrom koji bi se, slično kao kod kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja mogao prilagoditi gabaritima i specifičnostima oblika proizvoljnog mjernog objekta. Dodatno se želi iskoristiti utjecaj pojave samokalibracije na povećanje fleksibilnosti i sveobuhvatnost novog sustava, uz istovremenu eliminaciju utjecaja krutosti konstrukcije i toplinskih utjecaja izvora svjetla na performanse novog digitalizacijskog sustava.

1.3. Hipoteza rada

Novom izvedbom sustava omogućit će se fleksibilnost (vanjskih) parametara kalibracije, a povećanje broja osjeta zbog povećanja broja kamera dovest će do predefiniranosti sustava jednadžbi modela projekcijskog sustava, i time omogućiti njegovu samokalibraciju. Očekuje se da će se povećanjem broja osjeta eliminirati potreba za planarnim kalibracijskim objektom strogo definirane geometrije i omogućiti bolja volumetrijska kalibracija. To bi se trebalo pozitivno odraziti i na performanse digitalizacije trenutnog mjernog volumena novog sustava. Pretpostavka je da je predloženi sustav izvediv u praksi te konstrukcijski manje zahtjevan od ekvivalentnih kontaktnih mjernih uređaja. Također se pretpostavlja da povećanje broja osjeta kroz povećanje broja korištenih kamera neće bitno produžiti vrijeme digitalne obrade podataka.

1.4. Opis istraživanja

Provedeno istraživanje je teorijsko-eksperimentalnog karaktera. Sastoji se od nekoliko zasebnih cjelina: prvi korak u istraživanju bio je provesti kritički osvrt na postojeće metode digitalizacije s primjenom dviju kamera i jednostrukim i dvostrukim projiciranjem kodiranog svjetla. Poglavlje 2 donosi prikaz principa sustava druge vrste s jednostrukim projiciranjem kodiranog svjetla i matematičke modele metode epipolarne linije, kao i metode izjednačavanja zrakovnog snopa. Poglavlje 3 donosi prikaz principa sustava treće vrste s unakrsnim projiciranjem kodiranog svjetla. Kritički osvrt, poglavlje 4, donosi usporedbu sustava obuhvaćenih poglavljima 2 i 3. Temeljen je na analizi unutrašnjih i vanjskih utjecajnih faktora, prethodno definiranih u mom magistarskom radu [17]. Slijedi prikaz metoda za rješavane problema jednoznačnosti, poglavlje 5. Mogućnost proširenja sustava metodama koje proizlaze iz epipolarnog principa prikazano je poglavljima 6 i 7. Poglavlje 8 donosi razradu teoretskog modela novog projekcijskog sustava sa četiri kamere, baziranog na proširenju sustava s dvije kamere i unakrsnim projiciranjem svjetla. Prikazan je način apsolutnog rješenja problema jednoznačnosti za slučaj unakrsnog projiciranja, gradijentno filtriranje diskontinuiteta i ruba, slobodni prostorni kalibracijski objekt i metode analize snimljene slike preko više referentnih kamera, odnosno triangulacija preko više kamera.

Eksperimentalnim dijelom koje donosi poglavlje 9 testirana je postavljena hipoteza. Ispitan je utjecaj kalibracije novog sustava s više kamera na unutrašnje parametre kamera za ravninski i prostorni kalibar, te mogućnost variranja vanjskih parametara kamera. Na prikladnim modelima ispitani su i diskutirani načini analize slike, definirani poglavljem 8. Algoritam teoretskog modela i potrebne funkcije ugrađene su u postojeći programski paket *Atos_fsb*.

1.5. Dosadašnje spoznaje

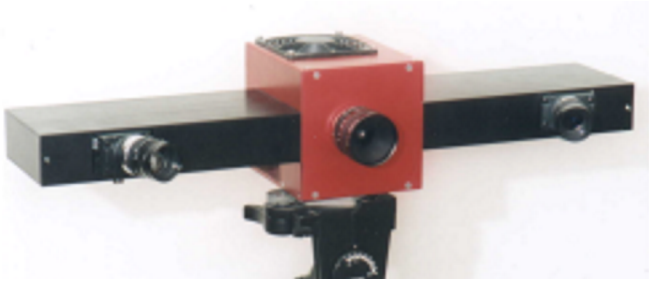
Prema dostupnoj literaturi [1-15,18] i ostvarenim kontaktima, a vezano uz primjenu aktivnih optičkih digitalizacijskih sustava, pokazalo se da predloženi pristup još nije u predloženom obliku adekvatno istražen na međunarodnom planu. Istraživanja su većinom usmjerena na optimiranje projiciranih optičkih uzoraka (poglavlje 5), odnosno doprinosa rješavanju problema jednoznačnosti, te na modeliranje kamera i pripadajuće optike s ciljem eliminacije nepoželjnih distorzijskih utjecaja na snimljenu sliku i efekte refleksije. Po pitanju izražavanja očekivane točnosti, tj. mjerne nesigurnosti, kroz istraživanje provedeno u mom magistarskom radu [17], pokazalo se da uslijed velikog broja vanjskih i unutrašnjih utjecajnih faktora na sam postupak i rezultate mjerenja osim njemačkih VDI/VDE 2634 preporuka još uvijek ne postoji općeprihvaćena procedura niti odgovarajući prostorni etalon na međunarodnom nivou, pomoću kojega bi se mogla uspoređivati sljedivost i mjerna nesigurnost projekcijskih digitalizacijskih sustava. Vezano uz kalibraciju sustava i za očekivane točnosti, planarni kalibracijski objekti se i dalje većinom koriste za kalibraciju sustava te se pokušava na temelju izvedenih invarijanti matematičkog modela kamere minimizirati potreban broj snimaka potreban za provođenje kalibracije [19] . Također, pokazalo se da postojeći sustavi koji koriste više od dvije kamere, a većinom se tu radi o laserskim projekcijskim sustavima, zapravo interno funkcioniraju kao više odvojenih triangulacijskih sustava s dvije kamere koji su preko inicijalne kalibracije sinkronizirani u jedan. Time se poboljšala brzina i potpunost mjerenja, ali se principijelno i dalje radi o digitalizatorima druge vrste, kao što je opisano u definiciji problema. Primijećeno je, međutim, da za razvoj pasivnih digitalizacijskih sustava s više kamera vlada veći interes istraživača, te su razvijeni teoretski modeli sustava s tri ili četiri kamere (poglavlja 6 i 7). Radi se i na modelima s više divergentno postavljenih kamera radi digitalizacije okolnog prostora. Niti ovdje se pristup rješavanju principa jednoznačnosti

nije promijenio u odnosu na klasično opisivanje relativnog položaja preko konstrukcije epipolarne plohe za svaki od parova kamera. Većini autora koji se bave pasivnim sustavima točnost mjerenja geometrije nije primaran problem, budući da je razvoj ovih sustava motiviran brzim razvojem robotike i strojnog vida, te je cilj omogućiti približno prepoznavanje geometrije i orijentaciju u prostoru u što kraćem vremenskom periodu.

Na domaćem planu je situacija po pitanju razvoja projekcijskih sustava bitno drugačija, jer je razvoj sustava s dvije kamere i unakrsnim projiciranjem svjetla upravo inicirao i razvio domaći autor [16] na temelju sustava druge vrste, u vidu sustava treće vrste opisanog uvodnim poglavljem. Također je provedeno i preliminarno mjerenje sustavom sa četiri kamere, koje je pokazalo da bi ovaj smjer razvoja mogao predstavljati novi doprinos i poticaj mjeriteljskoj zajednici, kako bi se očekivane točnosti ostvarive današnjim projekcijskim digitalizacijskim sustavima još više približe onima koje postižu kontaktni mjerni sustavi, te da se fleksibilnost vanjskih parametara kalibracije iskoristi za nov način volumetrijske kalibracije.

2. Metoda projekcijskog kodiranog nekoherentnog svjetla

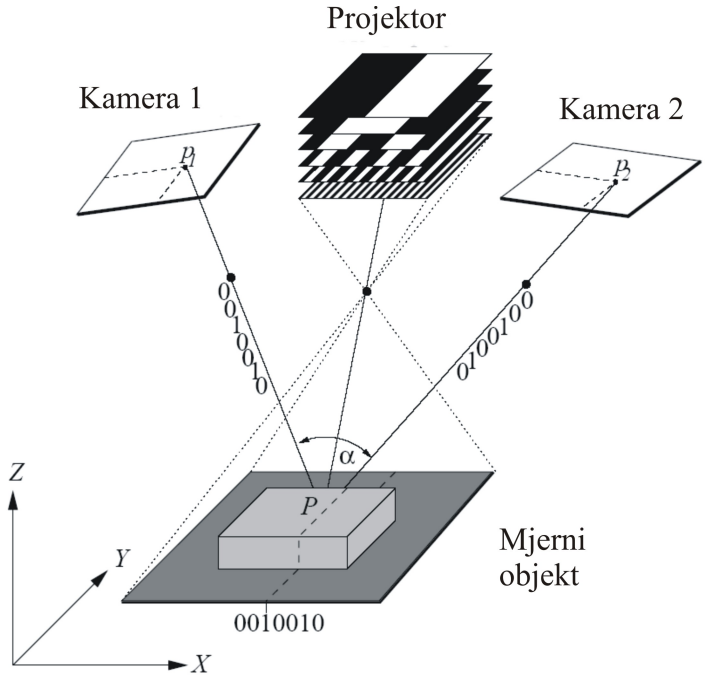
Projekcijski sustav *Atos (slika 2.1.),* čiji će se principijelni teoretski model ovdje prikazati, pripada porodici aktivnih projekcijskih digitalizatora oblika druge vrste. Sastoji se od konvergentne konfiguracije dviju kamera, te centralno postavljenog nekoherentnog projektora kodiranog svjetla. Kamere su identične, dvije 8-bitne (256 razina svjetloće) monokromatske Sony XC-75CE, temeljene na CCD čipu rezolucije 768x582 piksela. U osnovi su analogne (CCD generira analogni sinusoidalni signal koji se prenosi u računalo), te se konverzija intenziteta svjetla u digitalni signal provodi preko 4-kanalnog 8-bitnog ICPCV digitalizatora ugrađenog u mjerno računalo. Krutom izvedbom omogućeno je da relativna orijentacija kamera, kao i parametri objektiva sustava ostaju fiksni tijekom svih procesa mjerenja. Projektor koristi nekoherentni halogeni izvor svjetla jačine 200W, te projicira rasterski uzorak u vertikalnom smjeru, približno okomito na zamišljenu liniju koja spaja projekcijska središta kamera. Projektor je zračno hlađen ventilatorom, dok kamere nisu dodatno hlađene. Iz komercijalnih razloga, kompletan osnovni matematički model ovog mjernog sustava vjerojatno nikada neće biti u potpunosti publiciran. Stoga će ovaj prikaz teoretskog modela biti temeljen na radu M. Gomerčića [16], koji je aktivno sudjelovao prilikom konstrukcije navedenog sustava.



Slika 2.1. Projekcijski digitalizacijski sustav "Atos"

Spomenuti je sustav zasnovan na kombinaciji triangulacije i projiciranja rasterskog uzorka linija, korištenjem nekoherentnog izvora svjetla. Prema slici 2, u pojednostavljenom smislu, metoda funkcionira na način da centralno postavljen projektor slijedno projicira unaprijed određenu rastersku strukturu na površinu mjernog objekta. To će omogućiti jednoznačnu prostornu rekonstrukciju površine na temelju analize snimaka snimljenih s lijevom i desnom

kamerom. Projektor služi kao pomoćno sredstvo za rješavanje problema jednoznačnosti, odnosno prepoznavanje identičnih slikovnih osjeta objektne mjerne točke (stereoparova) u svakoj od kamera. Određivanje objektnih koordinata provodi se postupkom triangulacije [20], pri čemu jedan vrh zamišljenog trokuta čini odabrana objektna mjerna točka, a ostala dva vrha su položaji slikovnih osjeta objektne mjerne točke u svakoj od kamera.

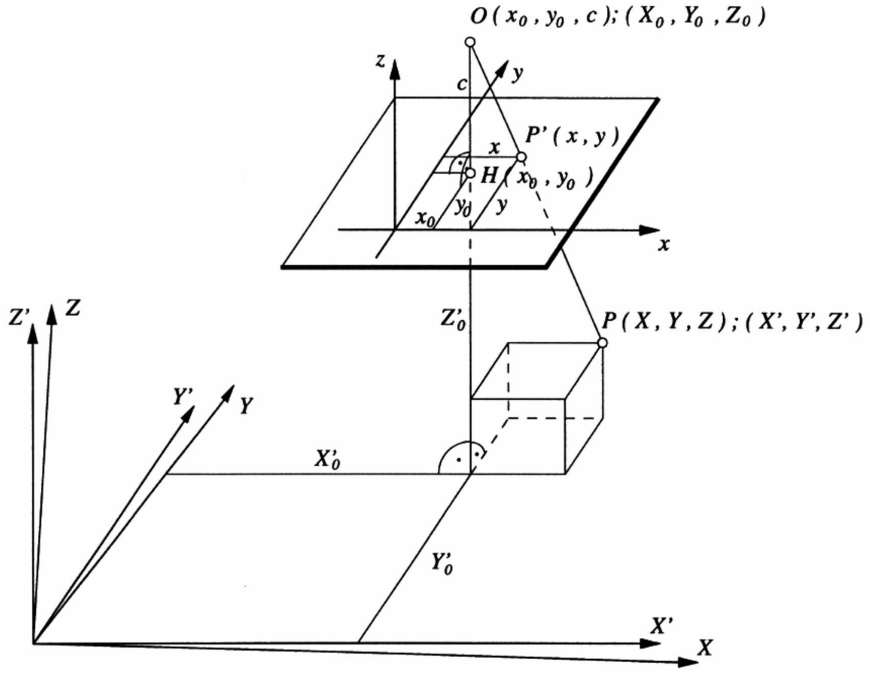


Slika 2.2. Princip projekcijskog senzora "Atos", (izvor: http://www.gom.com)

2.1. Modeliranje optičkog preslikavanja korištenjem jedne kamere

Poznavanje zakonitosti optičkog preslikavanja prostornog 3D objekta u dvodimenzionalno područje snimljene slike omogućit će definiciju transformacije objektnog koordinatnog sustava (X,Y,Z) (*slika 2.2.*) u slikovni koordinatni sustav svake od korištenih kamera. Budući da za neku objektnu mjernu točku svaka od kamera omogućuje po dva osjeta u svom slikovnom koordinatnom sustavu, a objektna mjerna točka je definirana trima prostornim koordinatama, ovaj predefinirani model sustava druge vrste ne zahtijeva poznavanje relativnog položaja projektora u odnosu na položaje kamera.

U dijelu fotogrametrije koji se bavi ovim digitalizacijskim sustavima definirana su dva glavna koordinatna sustava (*slika 2.3*): objektni ili prostorni koordinatni sustav (X,Y,Z) koji je globalnog karaktera i u odnosu na koji se određuje vektor položaja mjerne točke na površini objekta, te slikovni (ravninski) koordinatni sustav (x,y) preko kojega se definiraju slikovni položaji projekcija mjernih točaka u ravnini slike (odnosno ravnini filma ili CCD čipa unutar kamere). Također je uobičajena praksa korištenje tzv. pozitivne projekcije ravnine slike (pod ravninom slike podrazumijeva se ravnina čipa ili filma u kameri), koja se prema *slici 3* nalazi između projekcijskog središta O i mjernog objekta, umjesto iza projekcijskog središta O (kao što je to slučaj u stvarnosti kod realnih kamera). Ponekad teoretski modeli koriste normaliziranu pozitivnu projekciju ravnine slike, pri čemu je udaljenost ravnine slike od projekcijskog središta objektiva jedinična. Zbog pretpostavke da je površina CCD senzora u kameri zapravo planarna, ovaj model kamere ne može detektirati eventualno odstupanje navedene površine od idealne ravnine, niti kontrolirati pravilnost položaja pojedinih elemenata CCD čipa unutar njegove matrice.



Slika 2.3. Uz definiciju koordinatnih sustava

Zavisnost slikovnih i objektnih koordinata za proizvoljnu orijentaciju jedne kamere izvodi se *(prema slici 2.3.)* tako da se rotacijom globalnog koordinatnog sustava (X,Y,Z) u prostoru on

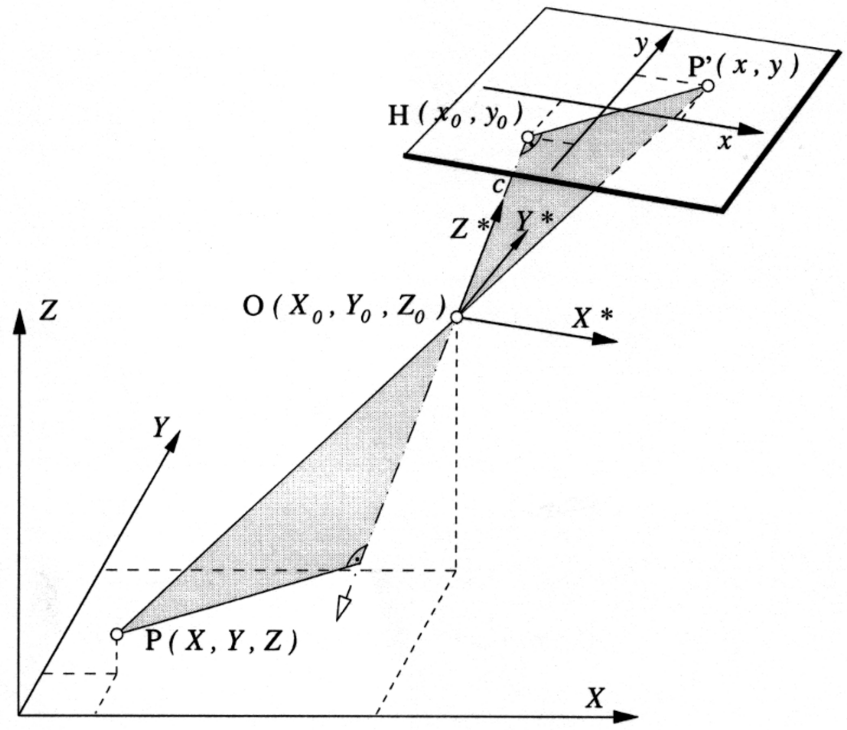
dovodi u položaj (X',Y',Z'), paralelan sa slikovnim koordinatnim sustavom kamere (x,y,z). Transformacija je definirana preko:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

gdje je **R** matrica transformacije, čiji su faktori i pripadajući smisao kutova zakreta prikazani u [16] str. 10.

Translacijom ovog pomoćnog koordinatnog sustava u projekcijsko središte objektiva *(slika 2.4.)* i zbog jasnoće prikaza korištenjem negativne projekcije (suprotno *sl. 2.3.*) i jednadžbe 2.1, prema *slici 2.4.* proizlazi veza u obliku:

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$



Slika 2.4. Veza slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljne orijentacije kamere

Veza između slikovnih koordinata P'(x,y) preslikane objektne točke P(X,Y,Z) preko transformiranih objektnih koordinata slijedi iz uvjeta kolinearnosti u obliku:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \frac{c}{Z_P^*} \begin{bmatrix} X_P^* \\ Y_P^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

gdje su x_0 i y_0 slikovne koordinate glavne točke snimke H (pomak optičke osi iz središta slikovnog područja uzrokovan nesavršenošću okomitosti optičke osi objektiva i ravnine CCD senzora u kameri), a Δx i Δy kompenzacijski parametri odstupanja od centralne projekcije, prilikom čega se, uslijed distorzije slike zbog nesavršenosti izrade objektiva, objektna točka P, projekcijsko središte objektiva O i slikovni položaj točke P' ne nalaze na istom pravcu definiranom točkama P, O i P'. Jedan od pristupa modeliranju kompenzacijskih parametara predložen je prema [21]:

$$\begin{aligned} \Delta x = {} & A_1\left(r^2 - r_0^2\right)x + A_2\left(r^4 - r_0^4\right)x + A_3\left(r^6 - r_0^6\right)x + \\ & + B_1 x + B_2 y + \\ & + \left(C_1\left(x^2 - y^2\right) + C_2 x^2 y^2 + C_3\left(x^4 - y^4\right)\right)x/c + \\ & + D_1 xy + D_2 y^2 + D_3 x^2 y + D_4 xy^2 + D_5 x^2 y^2 \end{aligned}$$

te analogno za Δy. (2.4)

Pritom vrijedi $r^2 = x^2 + y^2$, r_0 je položaj nul-točke korekcijske funkcije. Parametri $A_{1\ldots3}$ opisuju radijalno simetričnu distorziju, B_1 opisuje nejednolikost mjerila uzduž osi x i y, a B_2 njihovu neokomitost. Parametri $C_{1\ldots3}$ opisuju izobličenje slike kao posljedicu neravnine senzora u kameri, a $D_{1\ldots10}$ nepravilno izobličenje slike i radijalno nesimetričnu distorziju objektiva.

U literaturi se jednadžba (2.3) nerijetko pojavljuje u homogenom zapisu:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{\mathrm{T}} & -\mathbf{R}^{\mathrm{T}}\mathbf{t} \\ \mathbf{0}_3^{\mathrm{T}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

gdje matrica $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ sadrži komponente promjene mjerila f_x i f_y uslijed deformacije slike u smjerovima koordinatnih osi, komponente korekcije pomaka optičke osi iz središta CCD čipa c_x i c_y te faktor distorzije slike s. Preostale dvije matrice odnose se na translaciju *t* i rotaciju koordinatnih sustava, dok se posljednja matrica odnosi na koordinate objektne točke P.

Jednadžba 2.5 obično se u literaturi nalazi u obliku: $\mathbf{x} = \mathbf{K}\left[\mathbf{R}^{\mathsf{T}} \mid -\mathbf{R}^{\mathsf{T}}\mathbf{t}\right]\mathbf{X}$ ili skraćeno, u obliku

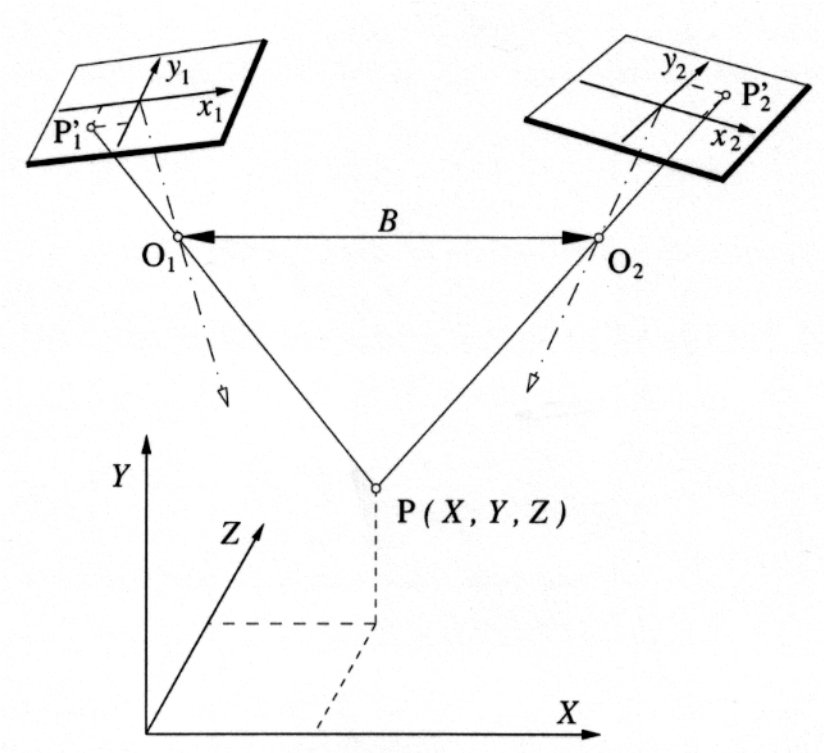
$\mathbf{x} = \mathbf{PX}$ gdje je **P** poznato kao projekcijska matrica kamere.

Iz provedene diskusije slijedi da je, uz zanemarivanje utjecaja nesavršenosti geometrije objektiva, za kompletnu definiciju modela veze između objektnih i slikovnih koordinata kod korištenja samo jedne kamere potrebno poznavati:

- šest parametara vanjske orijentacije: koordinate projekcijskog središta O(X_0,Y_0,Z_0) i kutove zakreta koordinatnog sustava kamere (ω,φ,κ), te
- tri parametra unutrašnje orijentacije: slikovne koordinate glavne točke snimanja H(x_0,y_0) i konstantu kamere *c*.

2.2. Modeliranje optičkog preslikavanja korištenjem dviju kamera

Da bi se mogao provesti postupak određivanja koordinata objektne točke, kod sustava koji se sastoje od dvije kamere konvergentne relativne prostorne orijentacije *(slika 2.5.)*, za svaku od kamera potrebno je definirati položaj i orijentaciju slikovnog koordinatnog sustava u odnosu na globalni koordinatni sustav mjernog objekta. Time je za svaku kameru potrebno odrediti i dodatnih šest parametara vanjske orijentacije.



Slika 2.5. Triangulacija položaja točke P primjenom dvije kamere

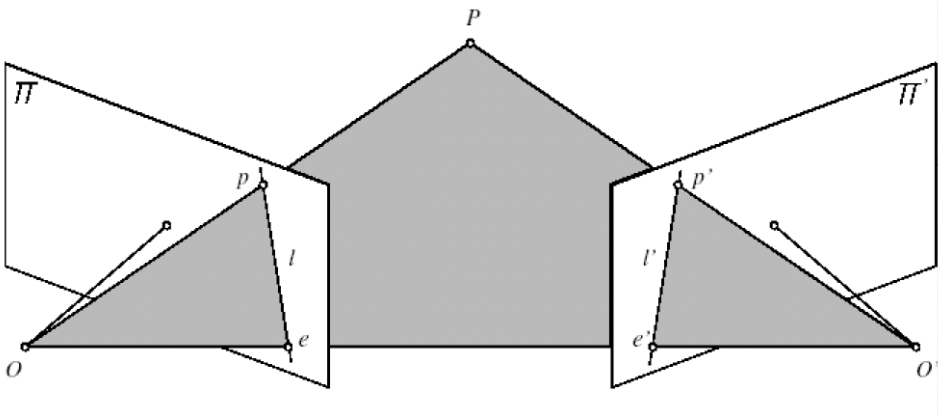
Ovi se parametri određuju postupkom kalibracije koji treba biti koncipiran tako da se, uz pretpostavku nepromjenjivosti unutrašnjih parametara svake od kamera, a preko objekta poznate geometrije, odrede relativni položaji projekcijskih središta kamera (odn. točke O_1 i O_2), dužina baze snimanja B koja predstavlja razmak kamera, te prostorni kutovi orijentacije korištenih kamera.

Pod pretpostavkom da su u svakoj od korištenih kamera jednoznačno poznate slikovne koordinate centralnom projekcijom preslikane objektne mjerne točke, moguće je principom triangulacije odrediti prostorne koordinate objektne točke P, što je shematizirano prikazano *slikom 2.5*. Uz zanemarivanje nesavršenosti optičkih komponenata, pravac koji prolazi kroz slikovnu koordinatu točke P_1' i projekcijsko središte pripadajuće kamere O_1, s pravcem koji prolazi točkama P_2' i O_2 druge kamere siječe se u objektnoj točki P, čije koordinate ovim postupkom triangulacije zapravo i određujemo. Prema [16], budući da je kod korištenja dviju kamera broj jednadžbi veze (2.3) svake od točaka za jedan veći od broja nepoznatih objektnih koordinata, opisani je model matematički preodređen. Njegovo se rješenje kod ovog sustava traži metodom minimalizacije odstupanja varijabli, tj. kao rezultat se odabire ona vrijednost

koja najmanje odstupa od izmjerenih vrijednosti. To je postupak koji je u fotogrametriji poznat kao metoda izjednačavanja zrakovnog snopa (eng. *bundle adjustment method*).

2.3. Metoda epipolarne ravnine

Geometrijska predefiniranost sustava dviju kamera može se dodatno iskoristiti i za rješavanje problema jednoznačnosti, odnosno pronalaženje slikovne koordinate neke mjerne točke u drugoj kameri korištenjem principa epipolarne ravnine. Radi se o proceduri neovisnoj o promatranom mjernom objektu a koja ovisi o unutrašnjim parametrima kamere i njihovoj relativnoj orijentaciji. Prema *slici 2.6.* i [22,23], neka se položaj objektne točke P preslikan u lijevoj kameri *Π* nalazi u točki p. Točke O i O' predstavljaju poznata projekcijska središta lijeve, odnosno desne kamere (poznati su vanjski parametri orijentacije kamera **R** i **t**). Položaj slikovnog osjeta objektne točke p' u desnoj kameri neka je pritom nepoznat, što znači da nije zadovoljen uvjet jednoznačnosti. Spojimo li pravcima točku P i O, te točke O i O', dobivena su dva pravca koja leže u istoj ravnini (pravac OO', koji prolazi točkama e, odnosno e' zajednički je svim vidljivim objektnim točkama P). Ravnina koju smo ovako definirali u literaturi je poznata kao epipolarna ravnina. Projekcija epipolarne ravnine u lijevu kameru definira epipolarnu liniju l. S obzirom na to da je na početku pretpostavljeno da u desnoj kameri nije poznato gdje se nalazi preslikana točka p′, projiciranjem epipolarne ravnine u desnu kameru dobivamo drugu epipolarnu liniju l' na kojoj će po ovoj definiciji morati ležati tražena slikovna točka p′. Ovaj će uvjet biti zadovoljen ako se točka P nalazi u vidnom polju desne kamere i njeni slikovni osjeti ne prolaze točkama e, odnosno e', te ako promatrana objektna točka nije zasjenjena unutar vidnog polja neke od kamera. Tako je, zapravo, korištenjem informacija o poznatom relativnom položaju lijeve i desne kamere problem pronalaženja pripadajućeg para točke p (tzv. stereopara) u desnoj kameri sveden s ravninskog problema (ravnina slike je dvodimenzionalna) na jednodimenzijski problem traženja točke p' uzduž epipolarne linije l' u drugoj kameri.



Slika 2.6. Princip epipolarne ravnine

Iz uvjeta koplanarnosti vektora $\overrightarrow{Op}$, $\overrightarrow{OO'}$ i $\overrightarrow{O'p'}$ slijedi :

$$\overrightarrow{Op} \cdot \left[\overrightarrow{OO'} \times \overrightarrow{O'p'}\right] = 0 . \tag{2.6}$$

Uz pretpostavku poznate relativne orijentacije kamera (tj. poznavanja komponenata rotacije i translacije), prethodnu jednadžbu možemo zapisati u matričnom obliku:

$$\mathbf{p} \cdot \left[\mathbf{t} \times \left(\mathbf{R}\mathbf{p}'\right)\right] = 0 . \tag{2.7}$$

Ako je $\vec{\mathbf{a}} \times \vec{\mathbf{b}} = [\mathbf{a}]_x \vec{\mathbf{b}}$, slijedi $\mathbf{p}^{\mathsf{T}}[\mathbf{t}]_x \mathbf{R}\mathbf{p}' = 0$, gdje je $[\mathbf{t}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}$.

Uvedemo li $\mathbf{E} = [\mathbf{t}]_x \mathbf{R}$, proizlazi:

$$\mathbf{p}^{\mathsf{T}} \mathbf{E} \mathbf{p}' = 0 . \tag{2.8}$$

Matrica **E** u literaturi je poznata kao esencijalna matrica (eng. *Essential matrix*), koja dovodi u vezu slikovni osjet objektne mjerne točke u jednoj kameri s njenim slikovnim osjetom u drugoj kameri, uz pretpostavku poznatih unutrašnjih i vanjskih parametara kalibracije. No, što ako nisu poznati parametri kalibracije? Pretpostavimo li nepoznatu kalibracijsku matricu $\mathbf{p} = \mathbf{K}\hat{\mathbf{p}}$ uz $\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-\mathsf{T}} \mathbf{E} \mathbf{K}'^{-1}$, slijedi:

$$\mathbf{p}^{\mathsf{T}} \mathbf{F} \mathbf{p}' = 0 \tag{2.9}$$

gdje je matrica **F** općenito poznata kao fundamentalna matrica (eng. *Fundamental matrix*). Fundamentalna matrica opisuje vezu stereoparova proizašlu iz poznavanja relativne geometrije konvergentnog sustava kamera, i to tako da za bilo koji stereopar $\mathbf{p} \Leftrightarrow \mathbf{p}'$ mora biti zadovoljena prethodna jednadžba. Potpunim poznavanjem parametara fundamentalne matrice moguće je preslikati proizvoljnu točku iz jedne od para kamera u epipolarnu liniju u

drugoj kameri. Kako bismo odredili potrebne parametre, napišimo prethodnu jednadžbu u normaliziranom obliku po koeficijentima:

$$(u, v, 1)\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

odnosno u obliku:

$$(uu', uv', u, vu', vv', v, u', v', 1)\begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{31} \\ F_{32} \\ F_{33} \end{pmatrix} = 0 \qquad (2.10)$$

iz čega slijedi da je problem pronalaženja relativne orijentacije kamera sveden na linearno određivanje devet parametara fundamentalne matrice, ali uz prethodno nužno poznavanje veze između stereoparova $\mathbf{p} \Leftrightarrow \mathbf{p}'$. Iz navedenog proizlazi da je potrebno poznavati slikovne koordinate devet stereoparova, kako bismo odredili parametre fundamentalne matrice. Međutim, iako se fundamentalna matrica sastoji od devet komponenata, za rješavanje nije potrebno postaviti devet jednadžbi, budući da je rank matrice **F** jednak dva, te zapravo postoji sedam međusobno nezavisnih komponenata. Teoretski bi za određivanje koeficijenata neke zadane konvergentne postave kamera bilo dovoljno poznavati sedam slikovnih osjeta i pripadajućih stereoparova. Literatura predlaže više linearnih i nelinearnih načina određivanja komponenata fundamentalne matrice i njenih numeričkih svojstava, kojih pregled donose [24-36].

2.4. Metoda izjednačavanja zrakovnog snopa

Metoda epipolarne ravnine prikazana prethodnim poglavljem definira zakonitosti preslikavanja slikovnih osjeta objektne točke $\mathbf{p} \Leftrightarrow \mathbf{p}'$ na temelju poznate fundamentalne matrice, zanemarujući pritom oblik mjernog objekta kojemu objektna točka pripada. Time je ta metoda poopćena neovisno o promatranom mjernom objektu, ali je nedostatak u pretpostavci fiksnih parametara orijentacije tijekom procesa provođenja mjerenja. Promijenimo li u nekom od međukoraka mjerenja neke od unutrašnjih ili vanjskih parametara, to će se odraziti kao sustavna pogreška koju je nemoguće detektirati, budući da su parametri fundamentalne matrice određeni inicijalnom kalibracijom sustava. Kako se znanost o fotogrametriji velikim dijelom razvijala prvenstveno poticana potrebama mjerenja u geodeziji, gdje zbog velikog nesrazmjera dimenzija fotografske opreme i mjernih objekata nije prikladno provoditi mjerenja aktivnim postupcima koji zahtijevaju fiksnu relativnu orijentaciju optičkih elemenata, razvijena je metoda izjednačavanja zrakovnog snopa. Ova se metoda određivanja relativne pozicije kamera - mjerni objekt temelji na izračunu izjednačenja odstupanja predefiniranog sustava jednadžbi. Pritom nije nužno ograničena na korištenje samo dviju kamera kao u opisanom principu epipolarne ravnine, već je moguće postići određivanje relativnog položaja kamera iz dva ili više položaja. Time ova metoda postaje prikladna za uvođenje više od dviju kamera u projekcijske mjerne sustave. Relativna orijentacija kamera provodi se uz pretpostavku da promatrani objekt tijekom procesa snimanja iz više pozicija zadržava nepromijenjenu geometriju, te da sadrži prikladne markacije potrebne za rješavanje problema jednoznačnosti. Snimanje markirane površine objekta može biti provedeno iz više pozicija s jednom te istom ili s više približno identičnih kamera.

Princip metode objasniti će se na modelu bez uključenih distorzijskih parametara [24,33,34]. Ako na temelju uvjeta kolinearnosti (prema *slici 2.3.)* postavimo vezu između koordinata projekcijskog središta objektiva i prostorne koordinate objektne mjerne točke:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \lambda_{ij} \mathbf{R}_j \begin{bmatrix} x_{ij} - x_{0j} \\ y_{ij} - y_{0j} \\ 0 - c_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_j \qquad (2.11)$$

gdje se indeks *i* odnosi na broj promatrane objektne mjerne točke, dok se indeks *j* odnosi na broj kamere (ili broj snimke ukoliko se radi o snimanju iz više pozicija pomoću samo jedne kamere). U prethodnoj jednadžbi X_i, Y_i i Z_i odnose se na prostorne koordinate objektne mjerne točke, X_{0j}, Y_{0j} i Z_{0j} odnose se na koordinate projekcijskog središta kamere, x_{ij} i y_{ij} su slikovne koordinate slikovnog osjeta objektne mjerne točke, x_{0j} i y_{0j} slikovne koordinate glavne točke snimke H, c_j je konstanta kamere. **R** je ortogonalna matrica rotacije koordinatnih sustava, a λ_{ij} mjerilo preslikavanja. Unutrašnji parametri orijentacije su x_{0j}, y_{0j} i c_j, dok su vanjski parametri orijentacije X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, te **R**. Raspišemo li jednadžbu 2.11 tako da s lijeve strane slikovne koordinate izrazimo objektne mjerne točke uz zanemarenje člana λ_{ij}, proizlazi:

$$x_{ij} = -c_j f_{ij}^x + x_{0j} = -c_j \frac{r_{11j}(X_i - X_{0j}) + r_{21j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{31j}(Z_i - Z_{0j})}{r_{13j}(X_i - X_{0j}) + r_{23j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{33j}(Z_i - Z_{0j})} + x_{0j}$$

$$y_{ij} = -c_j f_{ij}^y + y_{0j} = -c_j \frac{r_{12j}(X_i - X_{0j}) + r_{22j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{32j}(Z_i - Z_{0j})}{r_{13j}(X_i - X_{0j}) + r_{23j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{33j}(Z_i - Z_{0j})} + y_{0j} \qquad (2.12)$$

gdje su komponente $r_{11j} \cdots r_{33j}$ elementi rotacijske matrice.

Ovaj se model može primijeniti na općenite fotogrametrijske probleme, od kojih razlikujemo:

- općeniti problem kod kojega su svi parametri s desne strane u jednadžbi 2.12 nepoznati;
- određivanje vanjskih parametara kalibracije, ukoliko su poznati unutrašnji (npr. problem orijentacije metričkih kamera);
- unutrašnja orijentacija i koordinate objektne točke su poznate, a traži se vanjska orijentacija;
- poznate su samo koordinate objektnih točaka, a potrebno je odrediti parametre unutrašnje i vanjske orijentacije;
- poznati su parametri unutrašnje i vanjske orijentacije, a traže se koordinate objektne mjerne točke.

Zapišemo li (prema [24]) poopćeno jednadžbe 2.12 u obliku:

$$\mathbf{l} = f(\mathbf{x}) \quad , \tag{2.13}$$

možemo provesti određivanje **x** metodom najmanjih kvadrata po Gauss-Markovom modelu. Nakon što je (2.13) linearizirano i uveden vektor pogreške **e**, jednadžba prelazi u oblik:

$$\mathbf{l} - \mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{2.14}$$

Matrica **A** je dimenzija $n \times u$ (n je broj opservacija, u je broj nepoznatih parametara) uz $n \geq u$. Uz uvedeno očekivanje da je $E(\mathbf{e}) = 0$ i uvođenjem disperzijskog operatora *D,* proizlazi:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{l}) &= \mathbf{A}\mathbf{x}\,, \\ D(\mathbf{l}) &= \mathbf{C}_{ll} = \sigma_0^2 P^{-1}\,, \\ D(\mathbf{e}) &= \mathbf{C}_{ee} = \mathbf{C}_{ll} \end{aligned} \tag{2.15}$$

gdje je P težinski koeficijent, matrice **l** i **C** kovarijancijski operatori, a σ_0^2 faktor varijance.

Procjena **x** i σ_0^2 provodi se metodom najmanjih kvadrata uz uvjet minimuma varijance, te se dobije:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{x}} &= \left(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\right)^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l}\,, \\ \mathbf{v} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}\,, \\ \sigma_0^2 &= \frac{\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v}}{r}\,,\ r = n - u \end{aligned} \tag{2.16}$$

gdje je **v** residual.

Struktura matrice **A** ovisi o problemu koji je potrebno riješiti, odnosno o tome koji su parametri u jednadžbama (2.12) poznati, a koji se postupkom izjednačavanja zrakovnog snopa određuju.

Kako bi komponenta $\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}$ iz (2.16) bila invertibilna, potrebno je fiksirati sedam parametara, što se obično postiže ili korištenjem sedam kontrolnih točaka, ili fiksiranjem sedam prikladnih komponenata vanjske orijentacije.

Optički elementi uslijed svoje nesavršenosti (distorzije slike uzrokovane lećama ili nepravilnošću matrice CCD čipa) predstavljaju izvore sistematskih pogrešaka. Korekcija sistematskih grešaka može se provoditi prije, tijekom ili nakon provedenog mjerenja. Korekcije koje prethode mjerenju obično se oslanjaju na reduciranje podataka oslanjanjem na poznatu geometriju modela mjerenja, laboratorijske uvjete kalibracije, dok se naknadna

korekcija provodi analizom reziduala. Ovdje će se prethodno opisani postupak proširiti dodatnim parametrima, pomoću kojih se korekcija provodi simultano tijekom procesa mjerenja, čime se eliminiraju dodatni problemi analize sistematskih pogrešaka. Proširimo jednadžbe (2.12) s dodatnim parametrima u obliku:

$$x_{ij} = -c_j f_{ij}^x + x_{0j} + \Delta x_{ij}$$

$$y_{ij} = -c_j f_{ij}^y + y_{0j} + \Delta y_{ij} \qquad (2.17)$$

gdje su dodatne komponente u obliku opisanom jednadžbom (2.4) ili nekom od varijanti [24]. Dodatni parametri mogu se shvatiti kao korekcije položaja slikovnog osjeta objektne mjerne točke i položaja glavne točke snimke H.

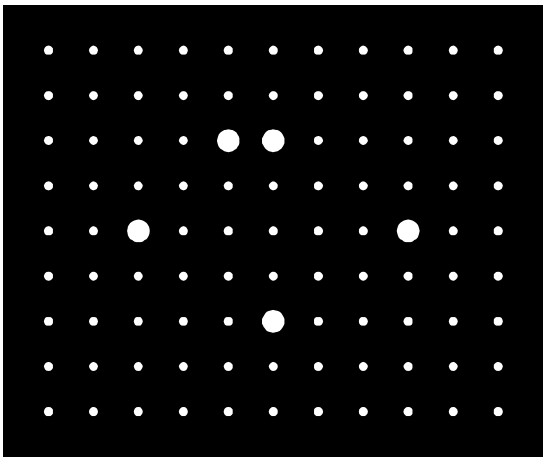
Jednadžba (2.14) sada prelazi u oblik

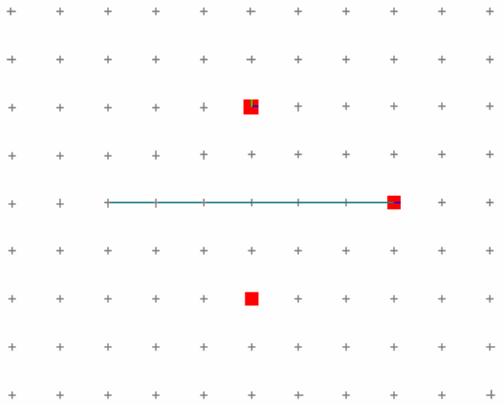
$$\mathbf{l} - \mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{A}_3\mathbf{z} \qquad (2.18)$$

gdje su $\mathbf{A}_3$ i $\mathbf{z}$ vektori dodatnih parametara.

2.5. Kalibracija sustava

Pod pojmom kalibracije sustava u fotogrametriji se podrazumijeva takav postupak koji omogućuje određivanje unutrašnjih i vanjskih parametara orijentacije kamera [36] te, eventualno, projektora. Postupak je obično prilagođen zadanoj mjernoj metodi i traženim parametrima. Projekcijski sustav *Atos* s dvije kamere kalibrira se pasivnim postupkom korištenjem specijalnog planarnog kalibracijskog objekta na čiju su površinu nanesene posebne markacije u obliku bijelih kružića na crnoj podlozi, *slika 2.7 a*). Kalibracijski objekt postavlja se u vidno polje dviju kamera koje se nalaze u konvergentnoj postavi s fiksiranim unutrašnjim i vanjskim parametrima orijentacije. Pritom su u zadanoj konfiguraciji kutovi kamera fiksirani u nekom proizvoljnom položaju, te stoga parametri njihovog relativnog položaja i orijentacije nisu poznati. U svakoj od slika snimljenih pojedinom kamerom svaki kružić predstavlja jednoznačno definiranu slikovnu mjernu točku, čiji je stereopar u susjednoj kameri jednoznačno poznat, uz pretpostavku njihove poznate raspodjele po površini kalibracijskog objekta. Za ispravno određivanje stereoparova koristi se metoda epipolarne ravnine. Za konverziju mjerila iz slikovnih u objektne koordinate dovoljno je precizno poznavati razmak dviju točaka na površini kalibracijskog objekta, *slika 2.7 b*).


a)


b)

Slika 2.7. a) standardni Atos kalibracijski objekt b) prikaz točaka korištenih prilikom kalibracije s linijom za definiciju mjerila

Postupak određivanja unutrašnjih i vanjskih parametara sustava provodi se prema [16] metodom izjednačavanja zrakovnog snopa, pri čemu se koristi princip slobodne mreže koji ne zahtijeva potpuno poznavanje relativnog položaja sviju točaka na kalibracijskom objektu. Radi se o samokalibrirajućem postupku pri kojem se svi parametri s desne strane funkcije (2.12) proglašavaju nepoznanicama. Sustav sam pronalazi optimalne parametre koji najbolje opisuju triangulacijski model. Kako je zbog velikog broja nepoznanica ovakav sustav numerički iznimno nestabilan, da bi konvergirao potrebno je definirati približne početne vrijednosti varijabli, a to su približna geometrija kalibracijskih markacija te pretpostavljene vrijednosti parametara unutrašnje orijentacije i distorzije kamera. Ovdje je nužno primijetiti da je kalibracijski objekt u potpunosti prilagođen zahtjevima kalibracije sustava (iako matematički model ne zahtijeva da kalibar bude planaran), dok geometrija mjernog objekta koji će se ovim sustavom mjeriti ne utječe na sam postupak kalibracije.

2.6. Rješavanje problema jednoznačnosti

Uz definirane parametre relativne orijentacije kamera u prostoru, pomoću principa triangulacije omogućeno je određivanje objektnih koordinata mjerne točke. Pritom pretpostavljamo da je jednoznačno poznata izravna ovisnost slikovnih i objektnih koordinata, tj. da je objektnu točku P(X,Y,Z) moguće jednoznačno prepoznati u slikovnom koordinatnom

sustavu lijeve kamere (*slika 2.5.*) kao točku P_1', odnosno kao točku P_2' u desnoj kameri. U literaturi je problem prepoznavanja stereoparova poznat kao problem jednoznačnosti (eng. *correspondence problem*). Kako tu informaciju kod proizvoljnih mjernih objekata zapravo ne poznajemo, u svrhu jednoznačnog definiranja položaja neke objektne točke, prethodno opisani pasivni postupak epipolarne ravnine proširen je uvođenjem aktivne definicije mjerne točke na površini mjernog objekta. Zamisao je da se projiciranjem nekog svjetlosnog uzorka na površinu mjernog objekta jednoznačno definira položaj objektne mjerne točke kao jednoznačno prepoznatljiv slikovni osjet u lijevoj, odnosno desnoj kameri. Poglavlje 5. donosi sažeti pregled projekcijskih rastera klasificiranih prema načinu kodiranja informacije.

Projekcijski sustav *Atos*, dostupan u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku FSB Zagreb, za rješavanje problema jednoznačnosti slikovne definicije položaja objektne mjerne točke koristi se centralno postavljenim projektorom s izvorom nekoherentnog svjetla (*slike 2.1 i 2.2*). Specijalni strukturirani svjetlosni uzorak (eng. *structured light*) projicira se na površinu mjernog objekta, čime se omogućuje približno sinusoidalna promjena svjetloće neke točke na mjernom objektu u ovisnosti o vremenu, tj. o slijedno snimljenoj snimci. Projicirani uzorak sastoji se od snopa paralelnih linija, koji svojim kontroliranim pomakom, po teoriji metode vremenskog faznog pomaka [16], pridružuje svakom pikselu pripadajuću fazu koja ovisi o položaju piksela u odnosu na ostale pruge. Princip metode vremenskog faznog pomaka bit će ovdje pojednostavljeno prikazan na modelu linijske kamere s prirastom faza u desno. Sustav *Atos* koristi padajuće faze udesno, ali su radi jasnoće prikaza prostornih grafova u slijedećim poglavljima odabrane rastuće faze udesno. Budući da se analiza snimaka vremenskog faznog koraka provodi za svaki piksel zasebno, u ovom koraku smjer stvarnog prirasta faza može se zanemariti.

Neka je iznos svjetloće I u ovisnosti o vremenu za neki piksel definiran sljedećom relacijom:

$$I(x,y,t) = s(x,y,t) + a(x,y,t)\cos[\delta(x,y,t) + \varphi(x,y,t)] \tag{2.19}$$

gdje je $s(x,y,t)$ srednja vrijednost svjetloće, $a(x,y,t)$ amplituda funkcije svjetloće, $\delta(x,y,t)$ za svaki piksel jednoznačno definirana faza, a $\varphi(x,y,t)$ dodatno nametnuta referentna faza. Prilikom mjerenja statičkih modela, za sve piksele u slici nepoznati članovi $s(x,y,t)$, $a(x,y,t)$ i $\delta(x,y,t)$ zapravo ne ovise o vremenu, već su funkcija snage korištenog izvora svjetla, te

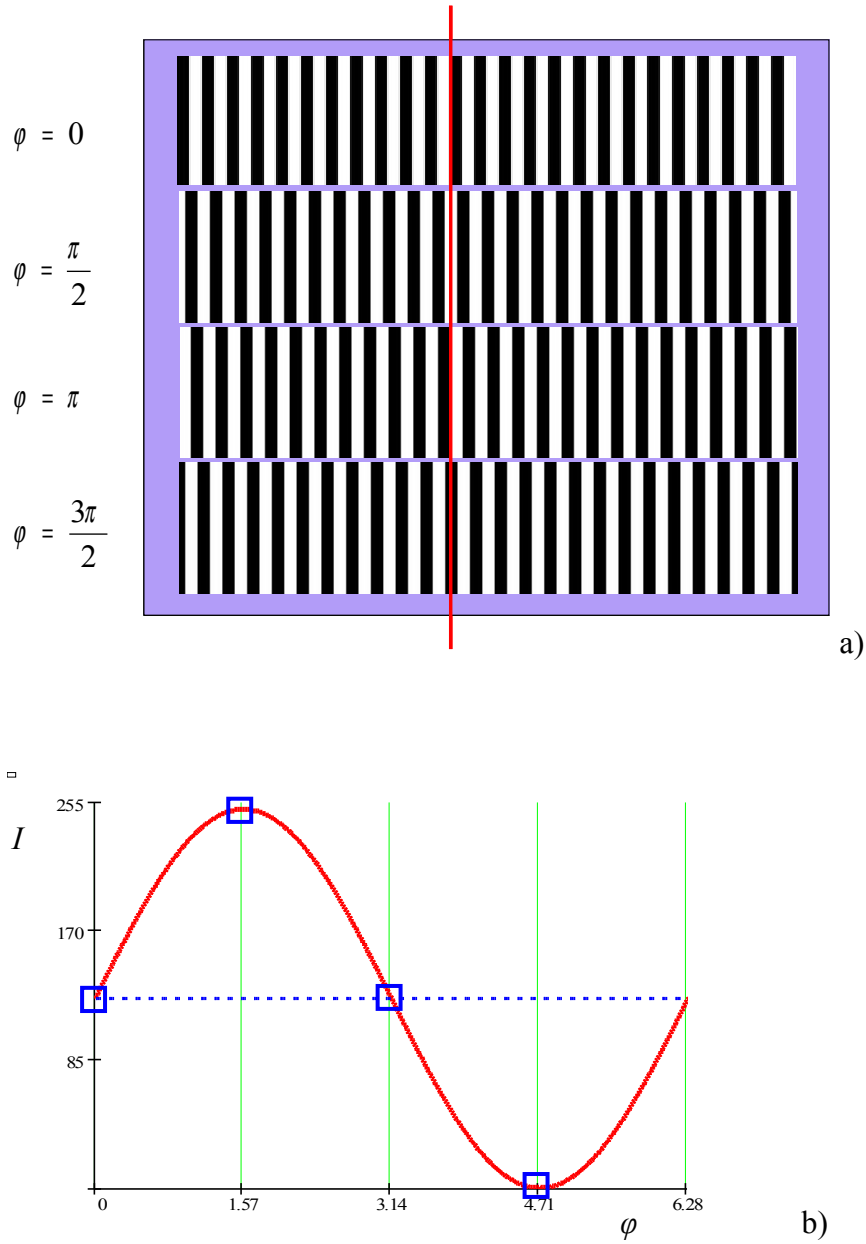
prugastog uzorka čijim se poznatim kontroliranim pomakom mijenja iznos člana $\varphi(x,y,t)$. Za rješavanje ove jednadžbe s tri nepoznanice potrebno je snimiti minimalno tri slike, ali se u praksi uobičajeno koristi predefinirani slučaj sa četiri ili više snimljenih slika. Pri tome se za slučaj od n faznih slika iznos faze $\delta(x,y)$ određuje prema [16]:

$$\delta(x,y) = \arctan \frac{\sum_{i=1}^{n} I_i(x,y) \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} I_i(x,y) \cos \varphi_i} \tag{2.20}$$

Uzmemo li za n=4, te da je prirast referentne faze $\varphi = \frac{2\pi}{n}$, gornja jednadžba prelazi u oblik

$$\delta(x,y) = \arctan \frac{I_2 - I_4}{-I_1 + I_3} \tag{2.21}$$

Slikom *2.8.a* na primjeru osvjetljavanja neke planarne površine ilustriran je princip metode vremenskog faznog pomaka za n=4, odnosno prirast referentne faze od $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Uz pretpostavku da je svjetlosni uzorak projiciran upravo paralelno s pikselima u kameri i da je u ovom primjeru slijedno pomican udesno, neka je vertikalnom linijom koja siječe sve projicirane uzorke ilustriran položaj jednog stupca piksela. Radi jasnoće prikaza, projicirani uzorci prikazani su jedan ispod drugog. Promotrimo li mjesta gdje odabrana linija prolazi svakim od uzoraka, vidjet ćemo da je tako odabrana da na prvom projiciranju prolazi upravo između svijetle i tamne linije. Ako za ovaj pojednostavljeni model uzmemo da je snimka načinjena 8-bitnom kamerom pa svijetlo polje ima iznos svjetloće 255, a tamno polje 0, za prvi uzorak piksel će poprimiti iznos svjetloće 128. Osvijetlimo li sada isti piksel uzorkom pomaknutim za $\varphi = \frac{\pi}{2}$, isti će doći u svijetlo polje i poprimiti iznos 255. U sljedećem koraku svjetloća promatranih piksela je opet 128, a u posljednjem 0. Slikom *2.8.b* dan je grafički prikaz ovog primjera s provučenom sinusoidalnom krivuljom, čija je faza zapravo nositelj mjerne informacije, a određuje se uvrštavanjem očitanih svjetloća u jednadžbu 2.21. Kod ispravno pripremljenog mjerenja iznosi srednje vrijednosti i amplitude trebali bi biti približno monotoni po cijeloj snimci. Identična procedura može se provesti za bilo koji piksel u slici, a efekt će se pokazati kao horizontalni pomak krivulje u *slici 2.8.b*.

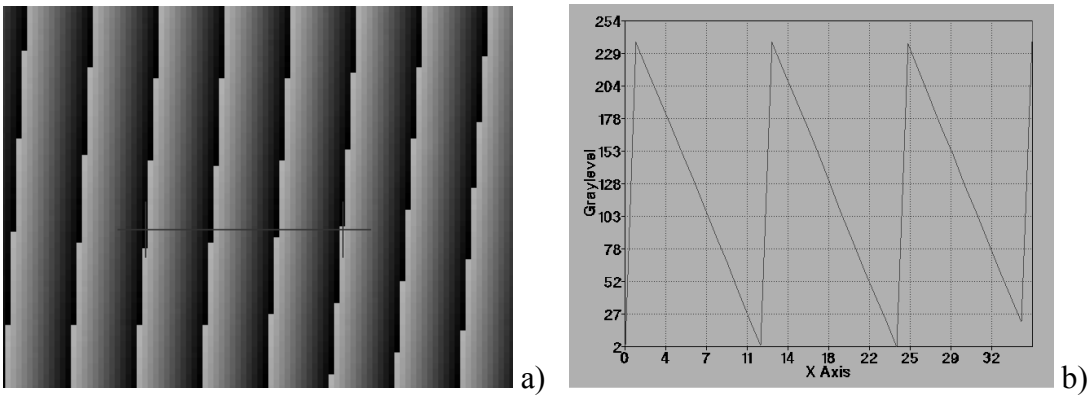


Slika 2.8. Princip metode vremenskog faznog pomaka: a) projicirani uzorci pomaknuti za $\varphi = \frac{\pi}{2}$, *b) prikaz kontrolirane promjene svjetloće u nekom pikselu*

Kao što je vidljivo iz primjera, iako se projiciranje uzoraka provodi u vremenskim razmacima koji nisu posebno mjereni, izračunata faza $\delta(x,y,t)$ zapravo neće izravno ovisiti o vremenu potrebnom za projiciranje uzoraka. U realnim uvjetima projiciranja, granični iznosi svjetloće obično se postavlja u rasponu od 30 do 230. Na ovom mjestu potrebno je napomenuti da prva verzija sustava *Atos*, dostupna u LEM-FSB-u, projicira linije koje na snimljenoj slici daju

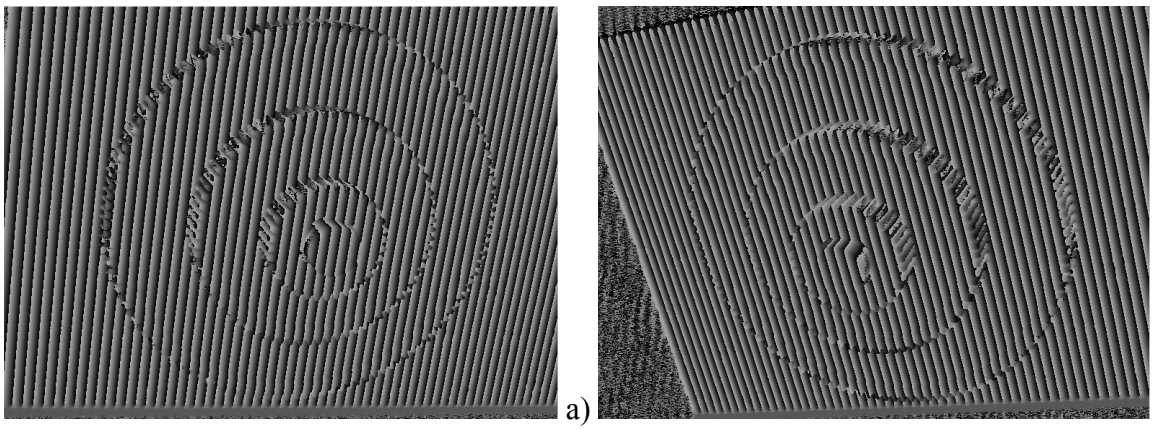
približno stepenasti svjetlosni uzorak (na *slici 2.8 a*), prikazan svijetlim i tamnim pikselima, dok prema dostupnim saznanjima novije varijante ovog senzora koriste modificirano projekcijsko stakalce koje im omogućava projekciju približno pravilnog sinusoidalnog uzorka.

Klasična *atan(*x/y*)* funkcija daje iznose od $-\pi/2$ do $\pi/2$, ne pazeći pritom na kvadrante u kojima se nalaze argumenti iz brojnika ili. nazivnika jednadžbe, što dovodi do gubitka informacija. Stoga se za računanje jednadžbe 2.21 koristi funkcija *atan2(*x,y*)* koja daje iznose od $-\pi$ do π, pa će se zbog ponavljajućeg uzorka (projicirani uzorak prema *slici 2.8*. ima konstantnu fazu) uzduž retka, a na osnovu jednadžbe 2.21, ponavljati rezultati u navedenom rasponu tvoreći tzv. pilastu sliku parcijalnih faza (*slika 2.9*).



a) b)

Slika 2.9. a) Detalj parcijalnih faza na površini objekta,
b) pilasti uzorak uzduž horizontalnog presjeka prema slici a).

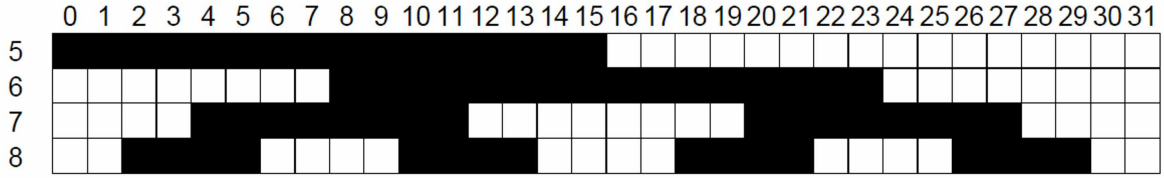


a) b)

Slika 2.10. Ponavljanje parcijalnih faze u a) lijevoj i b) desnoj kameri.

Ovaj efekt onemogućit će jednoznačnu identifikaciju neke od faza u obje snimljene slike, budući da se ista vrijednost parcijalne faze lako može ponoviti nekoliko puta uzduž promatranog retka piksela, kao što je ilustrirano na realnom modelu *slikom 2.10*.

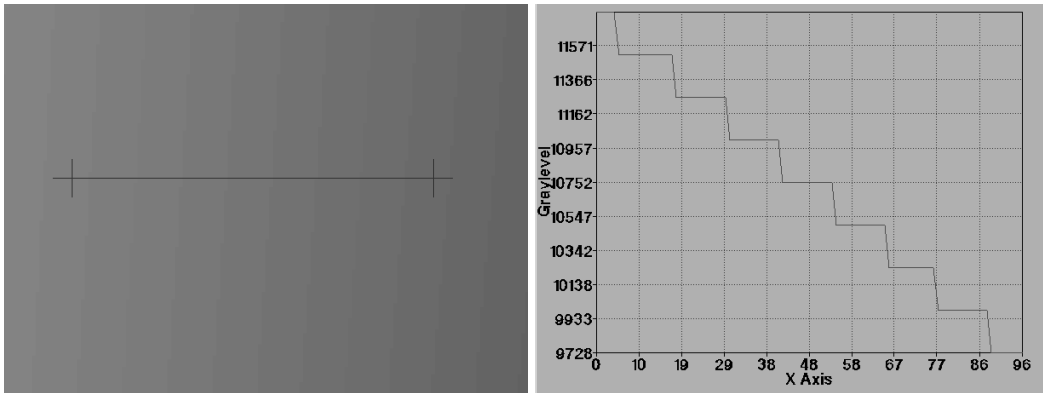
Za rješavanje ovog dodatnog problema jednoznačnosti, odnosno za jednoznačno određivanje apsolutnih faza u promatranom retku piksela, ovaj sustav koristi projekciju dodatnih binarnih uzoraka, pri čemu se projicirani snop svjetla kodira metodom Gray koda. Metoda se temelji na uzastopnom zgušnjavanju projiciranih linija. *Slikom 2.11.* na primjeru linijske kamere ilustrirano je projiciranje četiriju uzastopnih uzoraka Gray koda (linije 5 do 8). Prvi uzorak u liniji 5 dijeli sliku na dva polja, lijevo tamno i desno svijetlo. Sljedeći projicirani uzorak prikazan linijom 6 dijeli svako od ova dva polja na dva nova, tamno i svijetlo. Identična procedura provodi se u svim sljedećim projiciranjima. Ispravnim odabirom broja projiciranja ovog dodatnog projekcijskog uzorka [16] postiže se da svako područje unutar kojega su parcijalne faze bile jednoznačno definirane bude kodirano određenom kombinacijom svijetlih i tamnih područja (gdje je s 1 označen svijetli binarni kod, a s 0 tamni kod). Time je svakom od područja između sinusoidalnih pruga pridružen konstantan iznos faze jednak višekratniku 2π, tvoreći tzv. stepenastu sliku (*slika 2.12.*). Sustav projicira šest uzoraka Gray koda koji je definiran tako da je svaka od stepenica široka kao i razmak između pilastih skokova u slici 2.*8.b*. Primjena Gray koda ne doprinosi ukupnom povećanju mjerne točnosti sustava, koja je zapravo ovisna o projekciji vremenskog faznog pomaka te o broju piksela u kameri, kvaliteti digitalizacije slike i kvaliteti projiciranog rasterskog uzorka metode vremenskog faznog pomaka.



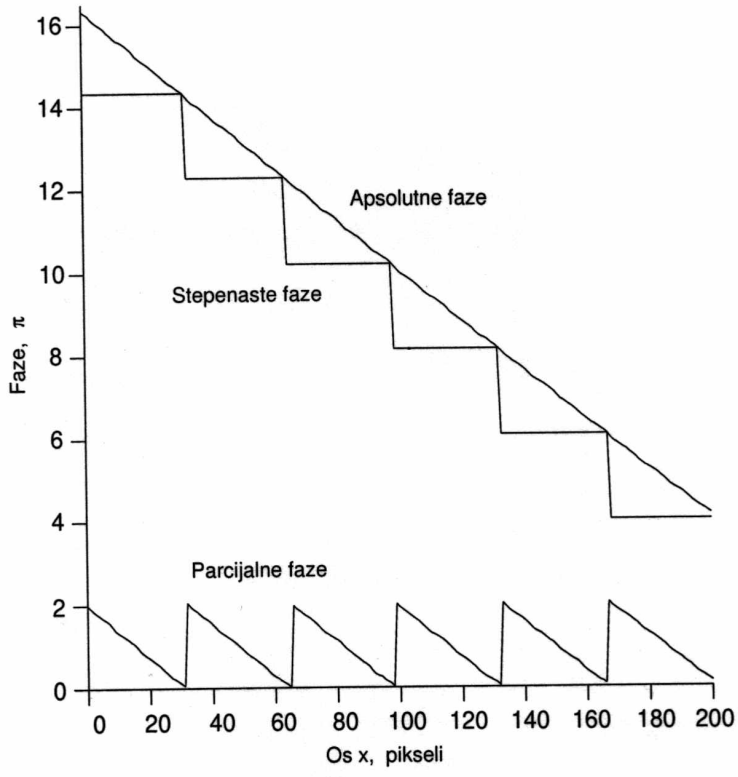
Slika 2.11. Princip metode Gray koda

Problem rekonstrukcije apsolutnih faza (*slika 2.13. i 2.14.*) u slijedećem koraku sveden je na slijedno sumiranje iznosa parcijalnih faza (pilasta raspodjela svjetloće) i Gray koda (stepenasta raspodjela svjetloće) za svaki od piksela u snimljenoj slici. Iz prikazanog je principa vidljivo da je faza koja je pridružena pojedinom pikselu rekonstruirana neovisno o

njegovom susjednom pikselu, smanjujući time utjecaj pogreške određivanja susjednih područja.

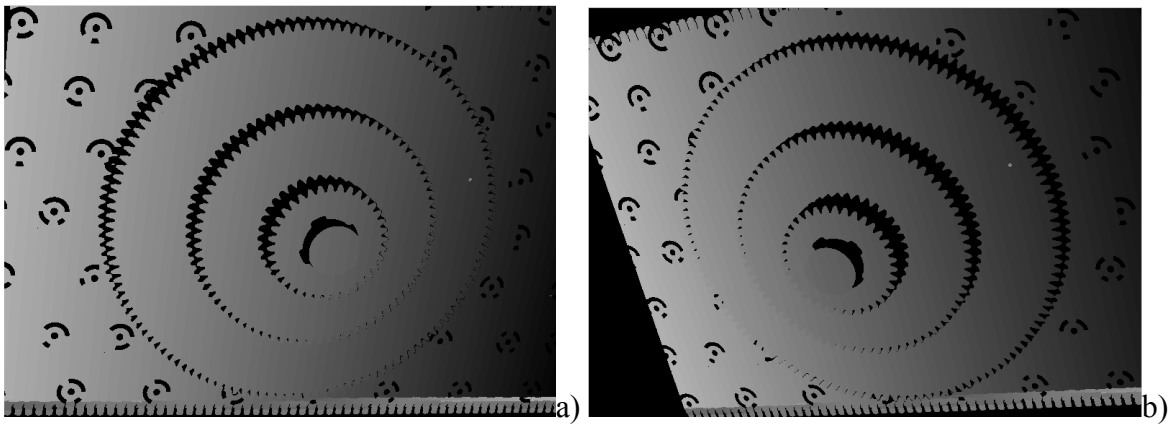


Slika 2.12. a) Detalj Gray koda, b) stepenasta raspodjela svjetloće uzduž pravca u slici a)



Slika 2.13. Parcijalne, stepenaste i apsolutne faze izračunate kombinacijom metode vremenskog faznog pomaka i metode Gray koda

Napomena: *slike 2.10. i 2.14*. preuzete su iz dviju susjednih kamera sustava sa četiri kamere (poglavlje 8) i ovdje služe samo kao ilustracija raspodjele parcijalnih i apsolutnih faza u susjednim kamerama.

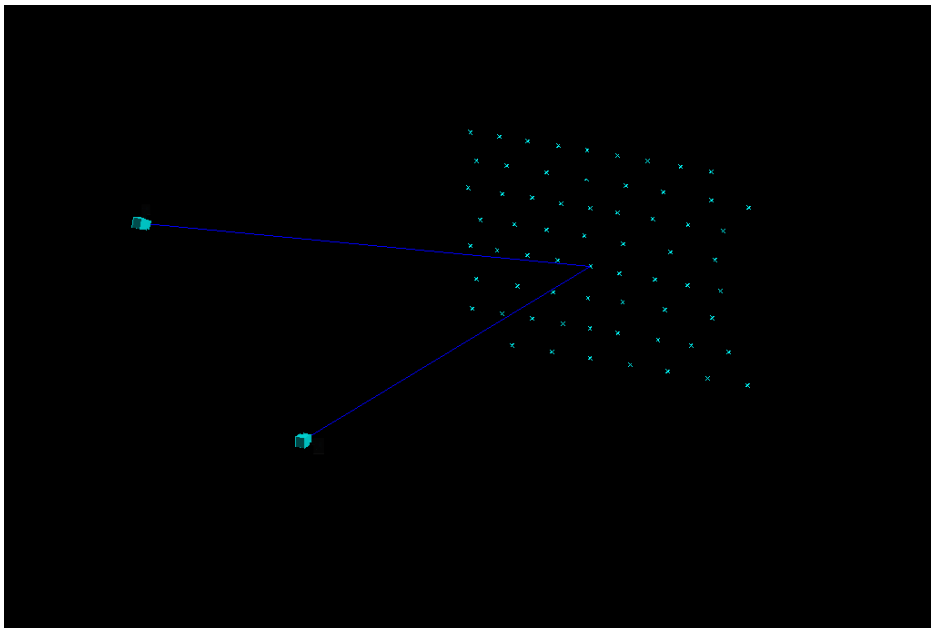


Slika 2.14. Apsolutne faze u a) lijevoj i b) desnoj kameri

2.7. Računanje objektnih koordinata

Računanju objektnih koordinata točke *P* triangulacijskim postupkom prema *slici 2.5.* može se pristupiti tek pošto su u potpunosti poznati parametri unutrašnje i vanjske orijentacije kamera, dobiveni postupkom kalibracije sustava i nakon što je riješen problem jednoznačnosti. Projekcijski sustav druge vrste, *Atos,* koncipiran je tako da se parametri orijentacije kamera (nakon što se jednom provede kalibracija pasivnim postupkom temeljenim na metodi izjednačavanja zrakovnog snopa) proglašavaju apsolutnima i nepromjenjivima tijekom svih kasnijih procesa mjerenja. Kalibraciji slijedi projiciranje svjetlosnog snopa kodiranog metodom vremenskog faznog pomaka, te metodom Gray koda. Na osnovu apsolutne slike faza izračunate za svaku od kamera nije moguće izravno riješiti problem jednoznačnosti, odnosno prepoznati koji od slikovnih osjeta točke P u jednoj od kamera (npr. točka P_1') odgovara upravo slikovnom osjetu P_2' u drugoj kameri. Razlog tome je način na koji se provodi projekcija svjetla, jer će svaki horizontalni redak u lijevoj kameri imati svaku od faza ponovljenu samo jedanput, dok će se, promatrano po stupcima, isti iznos apsolutne faze ponoviti više od jednom. U idealiziranoj, idealno okomitoj projekciji na ravninu mjernog objekta kod koje bi se vertikalni stupci CCD čipa preklopili s projiciranim linijama, svaki stupac slike sastojao bi se upravo od iste faze. Ako bi se direktno tražio piksel iste faze u drugoj kameri, on bi se nalazio negdje uzduž stupca koji ima tu istu apsolutnu fazu. Time je izravno onemogućeno direktno rješavanje problema jednoznačnosti, pa je potrebno iskoristiti metodu epipolarne ravnine za traženje pripadajućeg stereopara u drugoj

kameri. Traženi stereopar bi se u slučaju ovog idealiziranog primjera nalazio upravo na presjecištu epipolarne ravnine i onog stupca u desnoj kameri koji bi imao fazu identičnu odabranoj točki u lijevoj kameri. Kada su jednom pronađeni slikovni stereoparovi svih projiciranjem obuhvaćenih objektnih mjernih točaka, slijedi njihova prostorna rekonstrukcija, što je za jednu točku ilustrirano *slikom 2.15*.

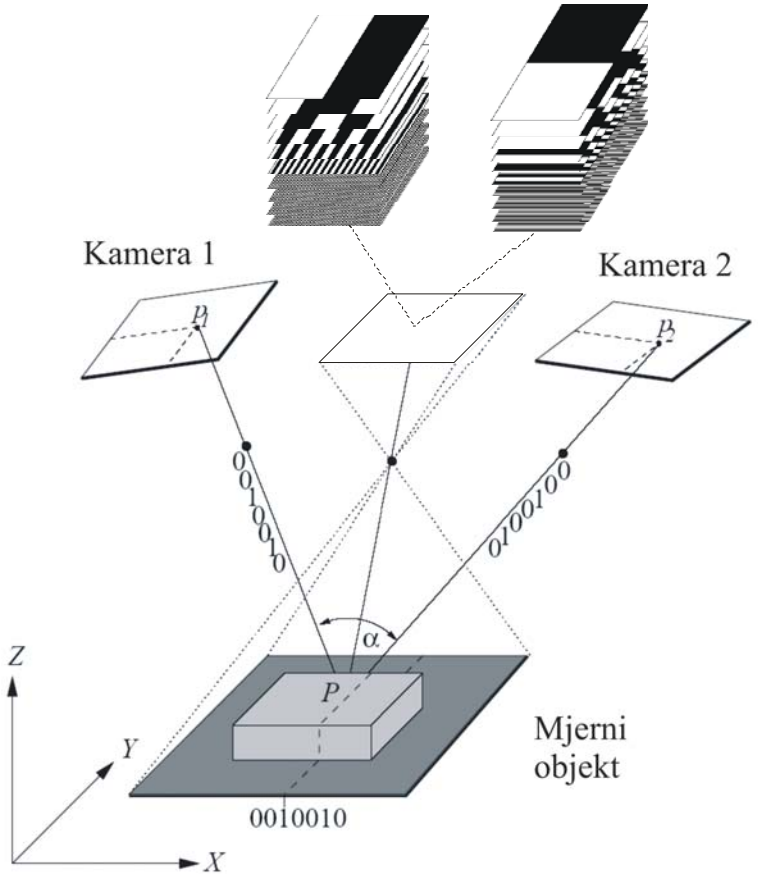


Slika 2.15. Uz princip računanja objektnih koordinata

U ovoj fazi poznata je geometrija sustava i pronađeni su stereoparovi (npr. prema *slici 2.5*. točka P_1' odgovara upravo P_2'). Računanje objektnih koordinata mjerne točke svodi se na rješavanje jednadžbi 2.12, odnosno na triangulacijski postupak unatražne projekcije zrake svjetla iz svakog od stereoparova kroz model kamere, te traženje presjecišta ovih imaginarnih zraka svjetla u prostoru mjernog volumena ovog sustava. Ovaj model sustava druge vrste osjetljiv je na promjenu parametara unutrašnje i vanjske orijentacije, budući da se njihovo optimiranje provodilo samo u početnoj proceduri kalibracije kamera. Ukoliko bi došlo do promjene u relativnoj orijentaciji nakon kalibracije i provođenja mjerenja, posljedica bi bilo neispravno pronalaženje stereopara. Tada bi kod unatražne projekcije u najboljem slučaju došlo samo do deformacije mjerila, pa nadalje sve do kompletne distorzije rekonstruiranog oblaka točaka.

3. Dvostruko projiciranje nekoherentnog kodiranog svjetla

U [16] modificiran je projekcijski postupak druge vrste (opisan u poglavlju 2.) uvođenjem dodatnog projiciranog uzorka, dok je projektor zadržao centralnu poziciju između dvije kamere u konvergentnoj postavi. Novi sustav, sustav treće vrste, dvosmjerno projicira uzorke Gray koda i vremenskog faznog pomaka (*slika 3.1.*) u dva međusobno okomita smjera. Ovime se postiže dvostruko (apsolutno) kodiranje mjerne informacije u svakoj mjernoj točki, jer svi snimljeni pikseli u svakoj od kamera poprimaju dvije vrijednosti apsolutnih faza, horizontalnu i vertikalnu.



Slika 3.1. Ilustracija dvostrukog projiciranja kod sustava s dvije kamere

Uz pretpostavku da se u periodu tijekom ili između projekcije horizontalnih i vertikalnih faza, projektor, kamere i model nisu međusobno pomicali, određivanje pripadajućeg stereopara

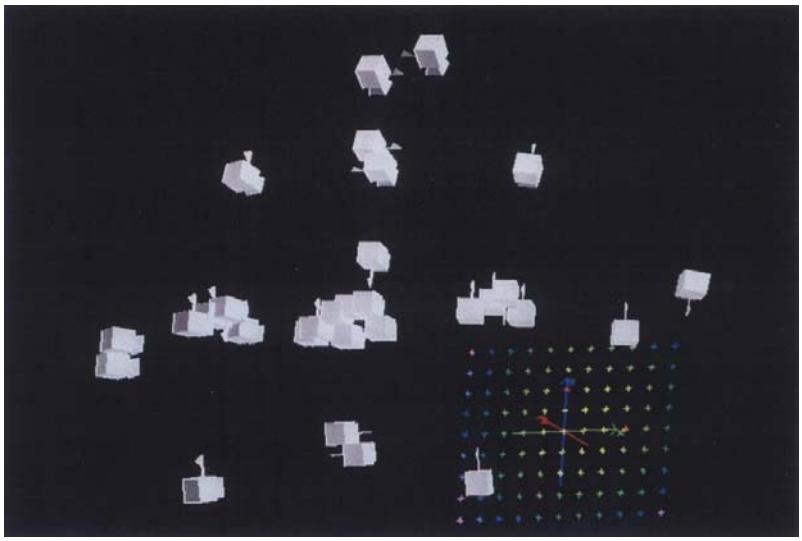
metodom epipolarne ravnine više nije nužno. Teoretski je za pronalaženje stereopara nekom pikselu iz lijeve kamere u desnoj kameri dovoljno potražiti piksel s jednakom kombinacijom horizontalne i vertikalne faze. Odabranim pristupom autor objedinjuje prednosti kodiranja metodama vremenskog kodiranja s izravnim apsolutnim jednoznačnim kodiranjem položaja, koje omogućuju metode direktnog kodiranja.

Prema [16], slikovne koordinate osjeta mjerne točke sada postaju nezavisno kodirane, te karakterom odgovaraju slikovnim koordinatama mjernih oznaka u pasivnoj stereofotogrametriji i pridonose predefiniranosti triangulacijskog modela. Opisana modifikacija omogućuje promjenu načina analize snimljenih slika, te se metoda izjednačavanja zrakovnog snopa osim kod kalibracije, sada može primijeniti i tijekom procesa mjerenja u svrhu triangulacije položaja objektne mjerne točke. Na taj način se tijekom mjerenja prema istom izvoru može dodatno optimirati i kalibriranost kamera, a donekle kompenzirati i eventualne promjene parametara kalibracije nastale utjecajem vanjskih uzroka (promjena temperature, vibracije i sl.). Autor preporučuje inicijalnu kalibraciju sustava, jer se na taj način povećava stabilnost i ubrzava konvergencija metode izjednačenja zrakovnog snopa, a potrebna je i zbog određivanja unutrašnjih parametara kalibracije kamera, pogotovo parametara distorzije objektiva.

3.1. Kalibracija sustava

Sustav se sastoji od dvije fiksne konvergentno postavljene kamere, čiji su svi parametri vanjske orijentacije desne strane jednadžbe 2.12 nepoznati. Unutrašnji parametri mogu se, kao i kod sustava *Atos* druge vrste, pretpostaviti s obzirom na poznavanje orijentacijskih parametara korištenih objektiva i kamera. Pretpostavlja se da je geometrija sustava fiksirana i modelira se kao nepromjenjiva tijekom i nakon provođenja postupka kalibracije. Kalibracijski postupak provodi se identično standardnom sustavu *Atos*, pasivnim samokalibrirajućim postupkom metodom izjednačavanja zrakovnog snopa korištenjem principa slobodne mreže s planarnim kalibracijskim objektom, *slika 3.2.*. Dimenzije planarnog kalibracijskog objekta tako su odabrane, da se poklapaju s veličinom trenutnog vidnog polja obje kamere. Na taj način postiže se optimalna kalibracija pretpostavljenih unutrašnjih parametara i distorzije objektiva, dok su

gabariti trenutnog mjernog volumena sustava određeni položajem i odabranom optikom kamera, kao i podešenom dubinskom oštrinom. Kalibracijski postupak zahtijeva da se za svaku od kamera snimi po petnaestak slika kalibracijskog objekta iz različitih orijentacija i predmetnih udaljenosti. Objektno orijentirani slikovni operatori koriste se za pronalaženje položaja markacija na površini kalibracijskog objekta. Markacije se koriste za rješavanje problema jednoznačnosti, odnosno omogućuju provođenje orijentacije pojedine kamere. Ukupna točnost kalibracije, osim o matematičkom modelu sustava i kvaliteti kalibracijskog objekta, ovisit će i o točnosti određivanja slikovne informacije. Kao kalibracijski objekt korišten je klasičan *Atos* kalibracijski objekt, planaran, s 99 matrično postavljenih nekodiranih kružnih točaka, prikazan *slikom 2.7. a*).

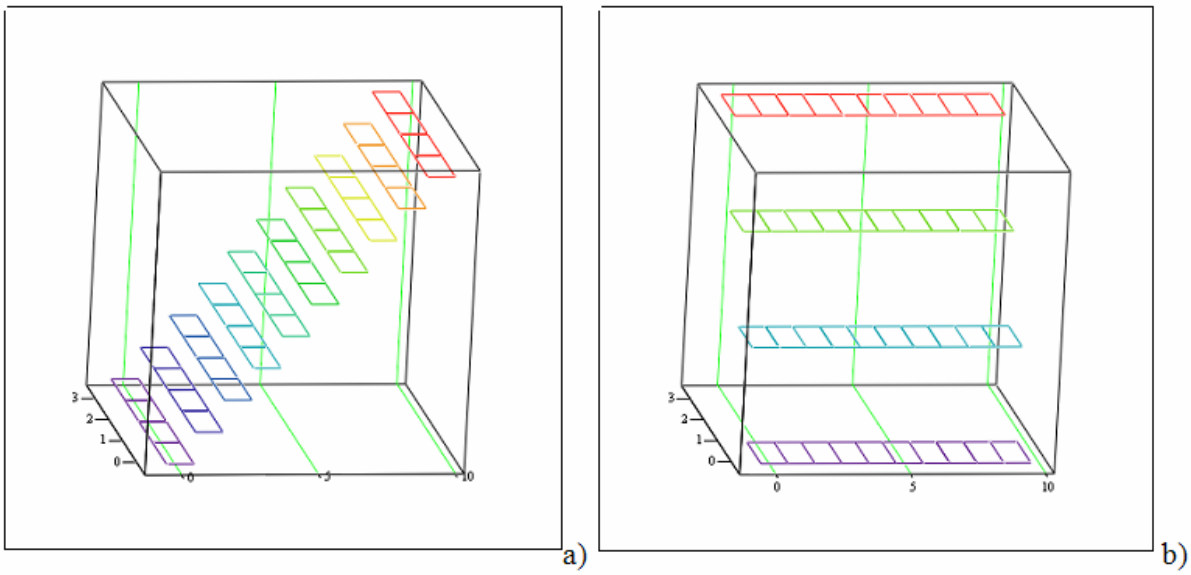


Slika 3.2. Položaji kamera u odnosu na kalibracijski objekt za vrijeme kalibriranja sustava

3.2. Rješavanje problema jednoznačnosti

Analizom snimaka kodiranog uzorka projiciranog na model u smjeru približno paralelnom s vertikalnom ravninom slike *(slika 2.2.*) po metodi opisanoj u 2. poglavlju, u ravnini slike ostvaruje se vertikalno kodiranje linearnom raspodjelom apsolutnih faza. Prirast apsolutnih faza

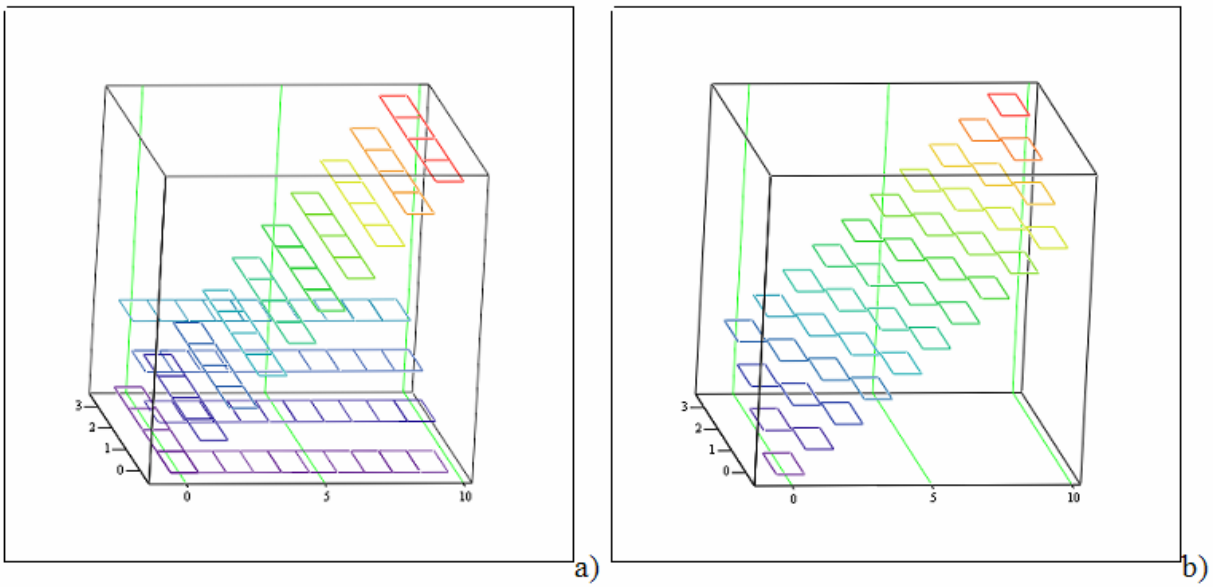
u ravnini slike u ovom primjeru prividno je linearan u smjeru okomitom na smjer projiciranih linija, kao što je to za jednu od kamera ilustrirano *slikom 3.3. a)*. Ilustracija rješavanja problema jednoznačnosti ovdje će biti provedena za četiri retka slike od po deset piksela, s fazama koje imaju prirast na desnu stranu. Horizontalna ploha u grafovima predstavlja ravninu slike, dok je iznos svjetloće linearne raspodjele apsolutnih faza u nekom od piksela prikazan u trećoj dimenziji, šareno obojanim poljima. Jednostrukim projiciranjem u vertikalnom smjeru problem jednoznačnosti nije u potpunosti riješen, budući da postoji ponavljanje istog iznosa faze uzduž četiri vertikalnih retka piksela u ravnini slike, u smjeru koji se poklapa s projiciranim linijama, *slika 3.3. a)*. Ova ilustracija projiciranja provedena je pod pretpostavkom da će se smjer projiciranja upravo poklapati sa smjerom vertikalnih piksela u slici, što u stvarnosti, zbog mogućnosti gotovo proizvoljnog položaja kamera, kao i površina mjernog objekta, naravno, nije slučaj. Sustav treće vrste riješio je ovaj dodatni problem jednoznačnosti provođenjem analogne projekcijske procedure i u smjeru okomitom na opisani slučaj, rotiranjem projektora za 90° oko osi objektiva u smjeru suprotnom od gibanja kazaljke na satu, kao što je ilustrirano *slikom 3.3.b*.



Slika 3.3. Ilustracija projekcije apsolutnih faza u dva međusobno okomita smjera a) vertikalno, b) horizontalno

Sada je svaki od piksela u snimljenoj slici istovremeno dvostruko kodiran, u horizontalnom i u vertikalnom smjeru, što je ilustrirano *slikom 3.4. a)*. Ovime je problem jednoznačnosti izravno

riješen, budući da je za prepoznavanje stereopara u ravnini slike druge kamere dovoljno odabrati neki piksel u lijevoj kameri, pročitati iznose vertikalne i horizontalne faze te potražiti njegov stereopar u desnoj kameri s jednakom kombinacijom horizontalne i vertikalne faze. Ova procedura traženja stereopara u dvije slike po kameri je potrebna, budući da bi, primjerice, kod zbrajanja iznosa apsolutnih faza u istoj kameri, dobivena ploha i dalje bila linearna. To znači da bi se isti iznos faze opet u ravnini slike ponavljao linearno, ali ovaj put pod kutom od 45° u odnosu na smjer horizontalnih, odnosno vertikalnih piksela u slici, što je ilustrirano *slikom 3.4.b*.



Slika 3.4. a) Ilustracija dvosmjernog kodiranja, b) zbrojene horizontalne i vertikalne faze

Autor uvodi dva načina određivanja stereoparova slikovnih koordinata promatranih objektnih mjernih točaka: cjelobrojno i polubrojno pretraživanje u ravnini slike. Kao referentna slika koristi se slika snimljena lijevom kamerom. Kod prve koncepcije slikovne koordinate promatranog piksela u referentnoj kameri odmah predstavljaju i koordinate slikovne mjerne točke, dok kod druge koncepcije položaj slikovne mjerne točke leži između promatranog piksela i tri njemu susjedna piksela, odnosno u ravnini slike pomaknut je za pola piksela desno i dolje. Kod kontinuiranih površina i uz poznat smjer rotacije projektora prirast faza je monoton s obzirom na projicirane pruge (*slika 3.3.*), što olakšava pretraživanje slika. Kod diskontinuiranih površina mogu se pojaviti problemi prilikom polubrojnog načina analize, jer diskontinuteti na

površini modela nemaju dodijeljenu faznu vrijednost te su njihovi u faznoj slici iznosi proglašeni nulama. Na tim mjestima operator pogrešno prekida pretraživanje i prelazi na pretraživanje slijedečeg para kodova. Ovaj problem autor rješava sortiranjem slike vertikalnih faza u horizontalnom smjeru, uz čuvanje indeksa prethodnog položaja točke u nesortiranoj slici. Na taj način postignuta je kontinuirana slika apsolutnih faza, koja omogućuje analogno pretraživanje kao kod monotonih raspodjela apsolutnih faza. Indeksi se koriste za pronalaženje stvarnog položaja stereopara u diskoninuiranoj slici. Interno, sustav informaciju o iznosu apsolutne faze kodira intenzitetom svjetloće, korištenjem slika 16bitne dubine boja.

4. Kritički osvrt

Uspješna provedba svakog mjernog zadatka ovisit će o velikom broju utjecajnih parametara [37-48], koje uslijed nepoznavanja svih teoretskih aspekata mjerne metode, kao ni svih izvora pogrešaka za trenutnu mjernu zadaću uz prethodno odabrani mjerni sustav nije moguće jednoznačno definirati prilikom planiranja mjerne zadaće, niti uzeti u obzir samim postupkom mjerenja. Stoga bi bilo naivno očekivati da već postoji ili da će u dogledno vrijeme postojati neka mjerna metoda koja bi u općenitom slučaju predstavljala idealnu metodu za prostorno digitaliziranje općenitih trodimenzionalnih mjernih objekata. Uvjet očekivane točnosti na prvi pogled predstavlja idealan parametar za usporedbu, jer je konačni rezultat mjerenja pomoću sustava druge i treće vrste zapravo oblak točaka u prostoru koji u tim mjernim točkama predstavlja diskretiziranu prostornu površinu mjernog objekta. Prostorni karakter projekcijskih mjernih metoda (kao i njihovi temeljni principi) omogućuje mjerenje ne samo prostornog položaja jedne diskretne mjerne točke na površini mjernog objekta, već velikog broja prostornih mjernih točaka, uz veliki raspon oblika i dimenzija prostornih mjernih objekata kompleksne geometrije (koji, dakako, mogu biti načinjeni od raznih vrsta materijala). Iz tog razloga navedeni je uvjet očekivane točnosti, odnosno mjerne nesigurnosti, potrebno prošireno promatrati u okvirima vanjskih utjecajnih faktora koji svojim djelovanjem izravno utječu kako na točnost određivanja pojedine mjerne točke, tako i na relativni prostorni raspored točaka izmjerenog oblaka. Odabir adekvatnog mjernog postupka za zadani mjerni zadatak treba izvršiti uzevši u obzir nerijetko zanemarenu činjenicu da je sam proces mjerenja zapravo tek početni korak u kompleksnom procesu analize oblika i funkcionalnosti nekog općenitog mjernog objekta. Potrebno je razlikovati i odvojeno analizirati kvalitetu digitaliziranih podataka koje neka mjerna metoda omogućuje, od kvalitete i prostorne potpunosti digitaliziranog oblaka mjernih točaka koje definiraju volumen koji popunjava promatrani mjerni objekt. Znači, potrebno je ne samo promatrati koja je metoda i pod kojim uvjetima korištena za neki mjerni zadatak, već i na koji je način izmjeren kompletni mjerni volumen sa zahtijevanim površinskim artefaktima, i to u najkraćem mogućem vremenu, s ostvarenom zahtijevanom točnošću određivanja mjerne točke, kao i postignutog relativnog prostornog rasporeda i gustoće izmjerenog oblaka točaka po kompletnom mjernom volumenu.

Sustav druge vrste *Atos* (poglavlje 2) na tržištu je prisutan preko deset godina, dok je sustav treće vrste (poglavlje 3) razvijen u ovoj instituciji na nivou prototipa te još uvijek nije komercijaliziran i provjeren od strane šire mjeriteljske zajednice. Oba su sustava bazirana na tehnologijama koje imaju principijelno slične korijene, ali se razlikuju u svojim konačnim izvedbama. Upravo zato, svaki će sadržavati čimbenike koji predstavljaju relativne prednosti ili nedostatke u odnosu na ostale metode, a koje je potrebno jednoznačno klasificirati kako bi se olakšao odabir prikladne mjerne metode s obzirom na trenutne zahtjeve koji su pred mjeritelja postavljeni (npr. zahtijevana razina točnosti, te raspored mjernih točaka i rezolucija mjerenja, gabariti mjernog objekta, svojstva površine, vrijeme dostupnosti modela za provođenje mjerenja i sl.). Osim idealiziranih matematičkih modela navedenih metoda, pri usporedbi mjernih metoda potrebno je kritički sagledati i utjecaj svih do sada literaturom dokumentiranih, te prilikom upotrebe u praktičnim mjerenjima s dostupnom mjernom opremom zamijećenih unutrašnjih i vanjskih utjecajnih faktora koji mogu utjecati na konačni rezultat mjerenja, kako sa stajališta točnosti metode i potpunosti digitalizacije površine, tako i sa stajališta opravdanja primjene odabrane mjerne metode za analizu zadanog mjernog problema.

Pod terminom *vanjski faktori* podrazumijevaju se svi oni utjecajni faktori koji utječu na postupak provođenja mjerenja odabranom mjernom metodom, a samim time i na kvalitetu izmjerenih podataka, ali koji nisu izravno vezani uz temeljne principe za akviziciju podataka odabrane mjerne metode. Opravdano je pretpostaviti da će utjecaj vanjskih faktora prilikom analize sustava četvrte generacije biti identičan utjecaju kao kod druge, odnosno treće generacije.

Termin *unutrašnji faktori* odnosi se pak na tehnološke principe na koje se za definiciju mjerne informacije pojedina mjerna metoda oslanja. Pritom će se podrazumijevati i realni utjecaji na kvalitetu i raspodjelu digitaliziranih mjernih točaka koji proizlaze iz stvarnih konstrukcijskih izvedbi pojedinih mjernih senzora.

4.1. Analiza vanjskih faktora

Cilj svakog mjernog procesa je odrediti potrebne mjerene karakteristike nekog mjernog objekta proizvoljne geometrije i gabarita onom najvećom mogućom točnošću koju je praktično moguće s odabranim mjernim uređajem ostvariti. Točnost pronalaženja pojedine mjerne točke ovisit će o brojnim vanjskim utjecajnim parametrima kojih se kvantitativan utjecaj uslijed njihove brojnosti, međusobne isprepletenosti i vremenske promjenjivosti nerijetko ne može jednoznačno izraziti. Prilikom analize performansi istovrsnih mjernih senzora baziranih na sličnim tehnološkim principima [49], problem usporedbe sustava je utoliko jednostavniji, s obzirom na to da će istovrsne vanjske karakteristike (npr. uvjeti okoliša, definicija mjernog zadatka, predmet mjerenja i sl.) imati sličan ili isti utjecaj na rezultat mjerenja neovisno o krajnjoj izvedbi mjernog senzora.

S obzirom na karakter uzroka vanjskih utjecaja, oni se mogu okarakterizirati kao:

- Karakteristike mjernog objekta:
  - geometrijske
  - materijalne
  - optičke karakteristike
- Okolišni utjecaji:
  - temperatura
  - vibracije
  - vlažnost
  - osvjetljenje
  - prašina i nečistoće
- Tehnološki utjecaji:
  - definicija mjernog zadatka
  - planiranje mjerenja
  - rukovanje mjernom opremom
- Programska podrška
- Ljudski faktor
- Zahtjevi naknadne obrade podataka

4.1.1. Karakteristike mjernog objekta

Općenito gledano, svaki se mjerni sustav sastoji od dvije glavne komponente: mjernog senzora čija je svrha akvizicija mjernih podataka, te predmeta mjerenja (mjernog objekta) kao glavnog nositelja mjerne informacije. Pritom predmet mjerenja predstavlja iznimno značajnu komponentu svakog mjernog sustava, jer će interakcija ovih dviju komponenata izravno utjecati na kvalitetu samog mjerenja, kao i definiciju sustavnih pogrešaka mjerne metode. Nije rijetkost u mjeriteljskoj praksi da se zbog ne(pre)poznavanja utjecaja svih relevantnih karakteristika mjernog objekta one zanemaruju, te se njihov utjecaj na mjernu nesigurnost pokušava objasniti pomoću drugih, "značajnijih" utjecaja [49]. Prema istom izvoru, uobičajeni način procjenjivanja veličine utjecaja karakteristika predmeta mjerenja kod kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja (TMU), posebno utjecaja kvalitete površine i točnosti oblika na mjernu nesigurnost rezultata mjerenja, sastoji se u analizi ponovljivosti mjerenja, ali uz varijaciju broja i rasporeda mjernih točaka prilikom provođenja mjerenja. Tako se rezultat mjerenja ne bi iskazao s visokom ponovljivošću, a da istovremeno netočnost uvjetovana nekom od karakteristika ostane neregistrirana. Tako se, zapravo, prikladnim posrednim mjerenjem uzima u obzir postojanje geometrijskih i materijalnih interakcija, ali pojedine komponente i interakcija predmeta mjerenja mjernim senzorom u različitim mjernim slučajevima pritom ostaju nedefinirani.

Karakteristike mjernog objekta mogu se sistematizirati kao:

- Geometrijske:
  - utjecaj dimenzija mjernog objekta
  - utjecaj površinske geometrije
  - utjecaj lokalnih svojstava površine
- Materijalne
- Optičke karakteristike

U daljnjem će se tekstu pretpostaviti da je predmet mjerenja odgovarajuće temperiran, tj. usklađen sa temperaturnim stanjem mjernog sustava i okoliša u kojem se provodi digitalizacija.

- **Geometrijske karakteristike mjernog objekta**

Pod terminom *geometrijske karakteristike* ovdje će se podrazumijevati svi oni utjecaji predmeta mjerenja na planiranje, kao i sam postupak mjerenja, nastali kao izravna posljedica dizajniranja oblika i geometrije površine predmeta mjerenja, te kao posljedica njegove izrade.

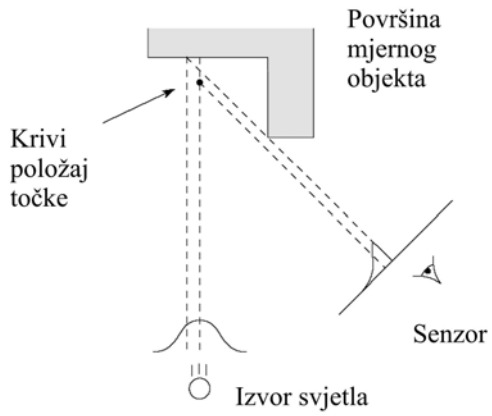
Utjecaj dimenzija mjernog objekta u izravnoj je vezi sa zahtijevanom veličinom mjernog volumena koju je potrebno osigurati prilikom postupka planiranja mjerenja za zadani mjerni senzor. Razmatrani sustavi identično definiraju mjerni volumen u užem smislu kao funkciju korištenih kamera, odabranih objektiva i odabrane konfiguracije sustava, a u širem smislu preko mogućnosti povezivanja više zasebnih projiciranja u jedno. Zbog mogućnosti povezivanja višestrukih uzastopnih mjerenja, za ukupni se mjerni volumen kod sustava druge i treće vrste može reći da je zapravo ograničen samo raspoloživim vremenom za mjerenje i stvarnim potrebama potpunosti digitalizacije kompletnog mjernog volumena. Prethodna diskusija zanemarila je nužnost transporta mjernog objekta, tj. mjernog senzora na mjesto provođenja mjerenja. Potencijalni problem mogao bi nastati ukoliko bi uslijed konstrukcijskih rješenja prilikom transporta došlo do promjene geometrije mjernog objekta ili ako bi demontaža mjernog objekta bila vremenski i financijski skuplja od cijene samog mjerenja (npr. mjerenje geometrije turbinskih lopatica in-situ), no u ovom slučaju oba sustava su podjednako kompaktna i mogu se s lakoćom transportirati već i u osobnom vozilu bez straha od oštećenja pojedinih elemenata. Nadalje, pretpostavimo situaciju u kojoj je za zadane gabarite mjernog objekta odabran odgovarajući mjerni sustav, te zadovoljavajuće riješen problem transporta. Sljedeći problem je rješavanje načina prihvata mjernog objekta [50], kako bi se tijekom mjerenja omogućila jednoznačna relativna orijentacija predmeta mjerenja i mjernog sustava, tj. jednoznačno definirala veza između koordinatnog sustava mjernog objekta i koordinatnog sustava mjernog uređaja. Izvedbe razmatranih sustava s obzirom na dimenzije, kao i masu mjernog objekta, omogućuju jednostavno relativno pozicioniranje mjernog objekta unutar iskoristivog mjernog volumena odabranog mjernog senzora. Registracija trenutnih koordinatnih sustava kod oba sustava može se vršiti upotrebom pasivnih markacija relativno na mjerni objekt, tako da prihvat mjernog objekta nije izravno vezan uz geometriju mjernog senzora. Slijedi potreba odabira pogonskih parametara sustava, tako da se s obzirom na njegove ukupne gabarite i površinske artefakte promatranog mjernog objekta odrede optimalni pogonski parametri odabranog mjernog sustava. Projekcijski sustavi s obzirom na gabarite mjernog objekta zahtijevaju definiranje geometrije optičkih elemenata, njihovog međusobnog razmaka i orijentacije. Kod oba sustava

izbor objektiva imat će identičan utjecaj na vrijeme potrebno za digitalizaciju željenih objektnih karakteristika, te samim time i na raspored i prostornu rezoluciju točaka u digitaliziranom oblaku.

Utjecaj površinske geometrije u izravnoj je vezi s postupkom planiranja mjerenja, jer se tijekom ove rane faze mjernog postupka, ovisno o lokalnoj konfiguraciji površine mjernog objekta, definira relativan položaj površine mjernog objekta i mjernog senzora. Budući da korišteni sustavi zahtijevaju da mjerna točka bude vidljiva i ispravno kodirana u obje kamere, na identičan način se planiraju položaji relativnih orijentacija sustava i mjernog objekta. Pri planiranju je potrebno uzeti u obzir utjecaj lokalne površinske geometrije mjernog objekta na smjer pristupa, te analizirati dostupnost svih željenih karakteristika odabranom mjernom senzoru, u smislu potpunosti digitalizacije mjernog objekta. Potrebno je odabrati i onu trenutnu relativnu orijentaciju mjernog senzora kojom će se omogućiti potpunost digitalizacije s obzirom na lokalne geometrijske karakteristike (rubovi, nagli prijelazi, zasjenjeni utori, pojava samorefleksije i sl.).

Pristup i utjecaj na definiciju mjerne točke. Kod ovih projekcijskih sustava, zbog njihovog beskontaktnog karaktera problem optimizacije pristupa je sveden na problem zadovoljavanja uvjeta očuvanja točnosti metode. To znači da je potrebno planirati mjerenje tako da se predmet mjerenja i mjerni senzor u svakom trenutku postave u onaj optimalni relativni položaj (pazeći pritom na predmetnu udaljenost i mjerno područje senzora), u kojem će normale promatrane površine biti u što većoj mjeri kolinearne sa smjerom projiciranog svjetlosnog snopa. Ukoliko potpunost digitalizacije nije moguće ostvariti iz jedne projekcije (npr. zbog postojanja oštrih rubova, refleksije kod izrazito zakrivljenih ploha ili provrta, zasjenjenja projicirane zrake svjetla ili zasjenjenja kamere, naglih diskontinuiteta i sl.), s obzirom na lokalne karakteristike površinske geometrije potrebno je korigirati relativnu orijentaciju u onoliko neophodnih koraka koliko je potrebno da se postigne željena potpunost digitaliziranog oblaka točaka, pod uvjetom da je područje mjerenja dostupno. Ovaj smisao određivanja relativne orijentacije senzora i površine mjernog objekta kod projekcijskih senzora direktno utječe na točnost mjerenja upravo zbog izravnog utjecaja na način definicije mjerne točke.

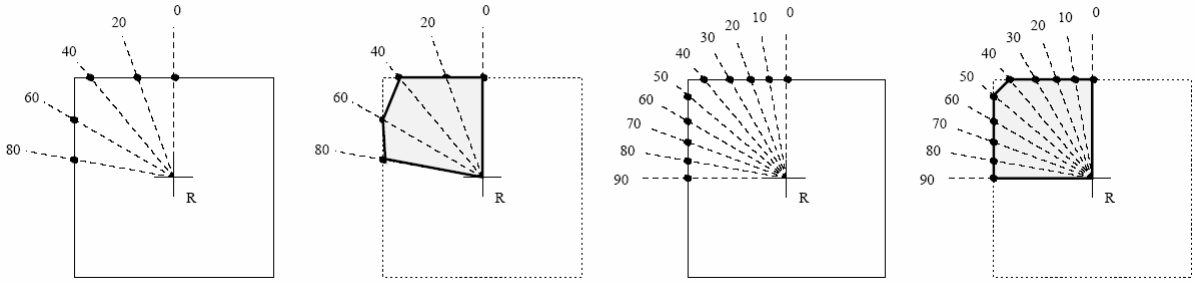
Dostupnost. Dostupna [51] je svaka ona točka na mjernom objektu koja je za zadanu optičku postavu projekcijskog sustava u nekom trenutku ispravno kodirana i koja se ispravno vidi u korištenim kamerama. Centralna pozicija projektora s bočno postavljenim kamerama karakteristična je za oba tipa razmatranih sustava, tako da će se utjecaji zasjenjenja projiciranog uzorka identično manifestirati kod oba sustava. Postojanje zasjenjenih [52] (eng. *occluded*) dijelova površine nekim od površinskih artefakata, (ili zbog elemenata prihvatnog sklopa), ograničit će vidno područje projekcijskog senzora, a time i izravno smanjiti dostupnost površine mjernog objekta. Kod laserskih sustava (*slika 4.1.*) zasjenjenost će uvjetovati prividan pomak točke, dok će kod razmatranih sustava vjerojatnije dovesti do eliminacije točke koja nije istovremeno vidljiva u obje kamere, što je svakako povoljniji slučaj. Dostupnost je za oba tipa sustava moguće povećati promjenom razmaka kamera te pomakom kompletnog sustava u neku drugu poziciju relativno u odnosu na mjerni objekt. Dodavanjem dodatnih kamera dostupnost bi se dodatno uvećala, ali ovi sustavi ih nisu u mogućnosti modelirati.



Slika 4.1. Zasjenjenost senzora površinskim artefaktom kod laserskog sustava

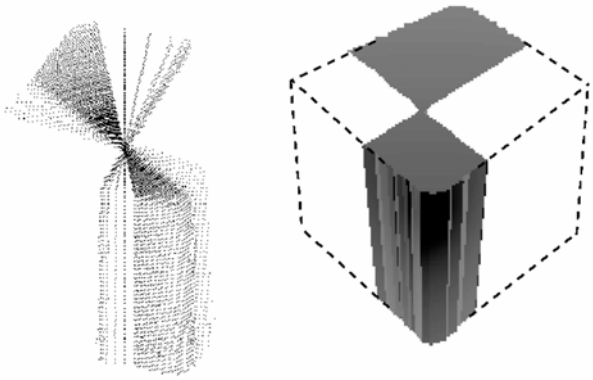
Utjecaj na prostornu rezoluciju. Kod projekcijskih metoda ovaj je utjecaj zapravo usko vezan uz definiciju pristupa, što je najjednostavnije objasniti na primjeru projiciranja laserske plohe svjetla u svrhu mjerenja površine kocke [53], čija se relativna orijentacija prema mjernom senzoru kontrolirano mijenja pomoću rotacijskog postolja (*slikom 4.2.* prikazan je tlocrt kocke s kutovima digitalizacije). Kocka je tako postavljena da jedna stranica leži na rotacijskom postolju, a laserski projektor projicira vertikalnu plohu svjetla. Prostorna rezolucija u smjeru projicirane linije pritom je definirana geometrijom optičkog detektora. Uobičajeno je da je razmak točaka duž projicirane linije isti, neovisno o rotaciji postolja (jer je u funkciji korištene kamere). U smjeru okomitom na smjer normale na projiciranu plohu

svjetla (u smjeru rotacije postolja) ovisno o brzini rotacije, a time i o promjeni udaljenosti objektnih točaka od osi rotacije, ovisit će i međusobni razmak mjernih osjeta, *slika 4.2.*



Slika 4.2. Uz utjecaj površinske geometrije

Tako bi se kod prevelikog koraka zakreta izgubila definicija oštrih bridova kocke, dok bi ostatak oplošja ipak bio zadovoljavajuće opisan, *slika 4.3.* U suprotnom slučaju, korištenjem malog kuta zakreta, bridovi kocke bit će vjernije digitalizirani uz istovremeno povećanje broja osjeta i na onim površinama koje su zadovoljavajuće opisane i u prethodnom slučaju.



Slika 4.3. Djelomična rekonstrukcija kocke

Prethodno poznavanje geometrije omogućilo bi optimiziranje procesa mjerenja s variranjem gustoće mjernih točaka na onim karakteristikama koje su za mjeritelja interesantne. Dostupni sustavi druge i treće vrste digitaliziraju scenu s po dvije identične kamere s mogućnošću korištenja identičnih objektiva. Kod projekcija iz istih relativnih pozicija u odnosu na mjerni objekt, prostorni raspored digitaliziranih točaka neke površine za oba sustava bit će vrlo sličan. Kod sustava treće vrste broj iskorištenih piksela u kameri biti će manji (582*582) nego kod sustava druge vrste (768*572), jer je projicirani uzorak pravokutnog oblika te će se kod preklopa okomitih projekcija pojaviti dio slike koji nije dvostruko kodiran. Iz toga proizlazi da će gustoća izračunatih objektnih točaka biti zadržana, dok će se preklapanjem

projiciranog uzorka smanjiti ukupan broj izračunatih točaka. Mogućnost preklapanja više odvojenih mjerenja nekog objekta u zajednički oblak točaka posredno dovodi i do lokalnog povećanja gustoće točaka na dijelovima površine. Ova područja mogu se iskoristiti za korekciju preklopa postupkom registracije. Veći problem predstavljaju preklopljena mjesta koja nastaju iz potrebe snimanja oblika nekog specifičnog detalja koji nije moguće digitalizirati iz jednog mjerenja, npr. stjenke, utore, šupljine i slične površine koje se ne vide u potpunosti istovremeno u obje kamere. Tada nerijetko dolazi do višekratne digitalizacije okolnih površina koje su ispravno vidljive već i u prvom projiciranju. U slučaju pogrešaka registracije ili pogrešno procijenjene udaljenosti sustava od modela, preklopljeni digitalizirani oblaci su međusobno malo pomaknuti te definiraju više od jedne površine. Ovakve oblake točaka potrebno je dodatno analizirati kako bi se eliminirali nepotrebni oblaci točaka, te se vrijeme gubi i prilikom digitalizacije i prilikom naknadne obrade, a bez korisnog utjecaja na prostornu rezoluciju.

Utjecaj lokalnih svojstava površine. Pod lokalnim svojstvima površine podrazumijevaju se one karakteristike koje su nastale kao posljedica obrade (npr. hrapavost, uglačanost) ili površinska svojstva odabranog materijala (npr. poroznost), a koje svojim prisustvom utječu na nesigurnost definicije mjerne točke. Pritom se ovaj efekt posredno odražava i na postupak numeričke rekonstrukcije površinske geometrije, budući da uslijed utjecaja lokalne površinske geometrije površina nije opisana minimalnim brojem osjeta.

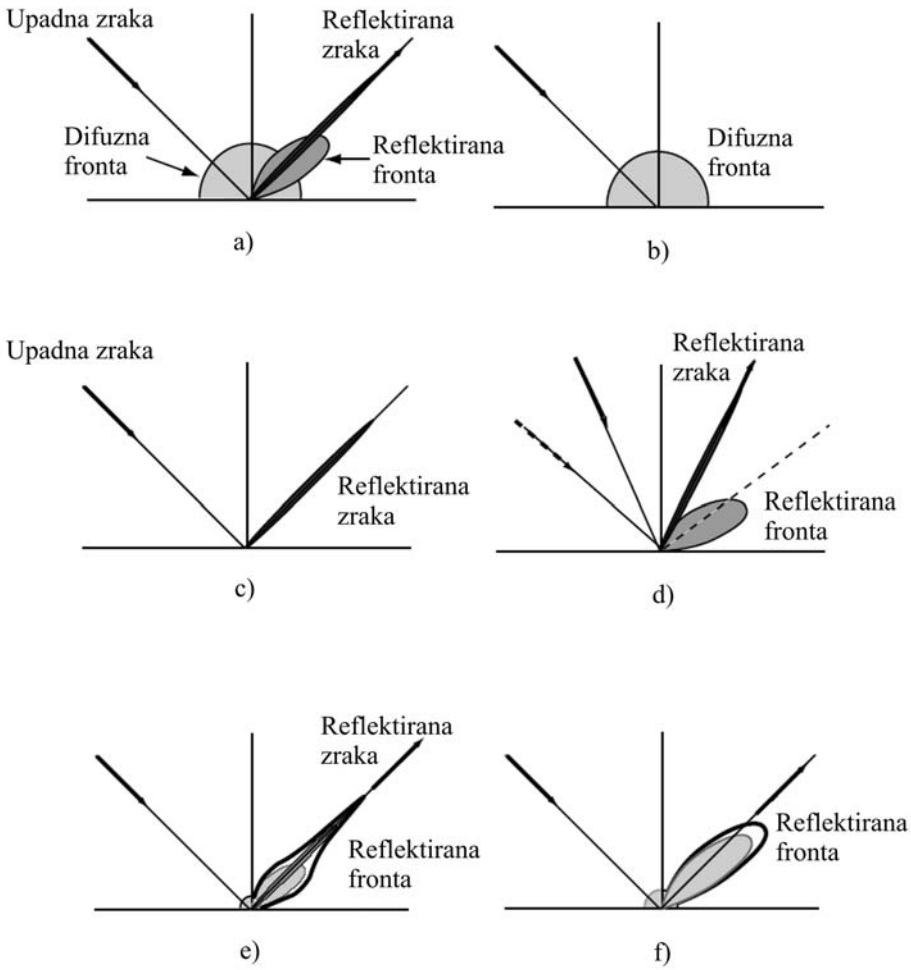
- **Materijalne karakteristike površine**

Zbog nepostojanja izravnog kontakta mjernog sustava s površinom mjernog objekta, utjecaj materijalnih karakteristika površine treba promatrati u proširenom smislu kroz vezu s interakcijom površina nekih djelomično transparentnih materijala s projiciranom zrakom [54,55]. Projiciramo li lasersku zraku na mramornu površinu (*slika 4.4.*), uslijed njene djelomične providnosti uzrokovane lokalnom nehomogenom kristaličnom strukturom površine, doći će do parcijalnog prodiranja projicirane zrake u osnovni materijal. Posljedica prodiranja je da se zbog lokalne materijalne karakteristike površine gubi Gaussova karakteristika projicirane točke, a izmjereni podaci imaju izražen šum uslijed nejednolikosti površinskih optičkih svojstava površine. Kod razmatranih sustava uvriježena praksa je tretiranje površine modela tankim difuznim slojem boje kako bi se otklonio ovaj utjecaj.

Slika 4.4. Gubitak definicije točke zbog prodiranja projicirane zrake u osnovni materijal

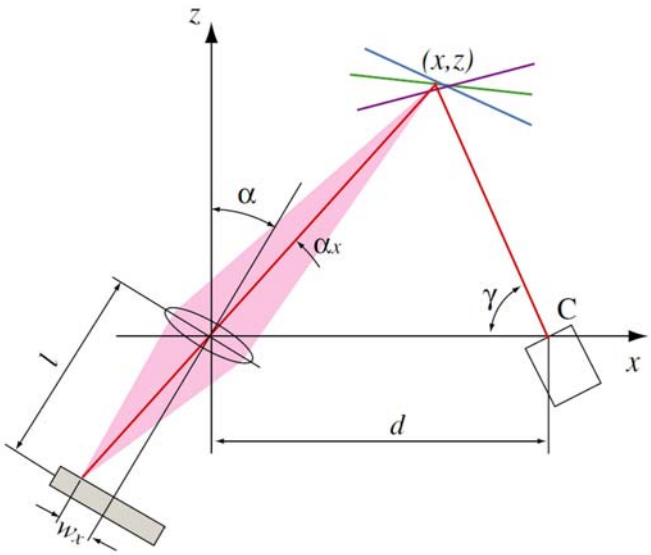
- **Optičke karakteristike površine**

S obzirom na interakciju mjernog senzora i mjernog objekta, poželjno je da provođenje mjerenja aktivnim projekcijskim senzorima bude neovisno o optičkim karakteristikama površine mjernog objekta, predmetnoj udaljenosti i uvjetima lokalnog osvjetljenja. Predmetnu udaljenost i uvjete osvjetljenja uglavnom je moguće prilagoditi trenutnim mjernim zahtjevima, dok su optička svojstva površine zapravo u funkciji materijala mjernog objekta, njegovih površinskih svojstava te korištenog izvora svjetla. Intenzitet osvjetljenja koje će sustav zabilježiti je suma intenziteta osnovnih refleksijskih komponenata [56]: difuzne fronte, reflektirane fronte i reflektirane zrake, prema *slici 4.5.a*. Difuzna fronta nastaje kao posljedica raspršivanja dijela upadne zrake, nastalog uslijed lokalnih svojstava osvijetljene površine. Pretežno refleksijska komponenta zrake koja ima izrazito usmjereni intenzitet pojavila bi se pri osvjetljavanju zrcalne površine, dok se reflektirana fronta širi u izvjesnom kutu u smjeru refleksije. Iznimka su slučajevi izrazite hrapavosti površine, kada fronta pokazuje asimetričnu distribuciju prema kutu potpuno reflektirane komponente. Prema istom izvoru, površine se s obzirom na optička svojstva mogu svrstati u pet glavnih skupina: lambertska, prikazana *slikom 4.5.b*, refleksna I i II, prikazane *slikom 4.5.c* i *d*, te hibridna I i II, prikazana *slikama 4.5.e* i *f*. Kod lambertskih je površina dominantna difuzna fronta (npr. površina gipsa pokazuje ovakva svojstva).

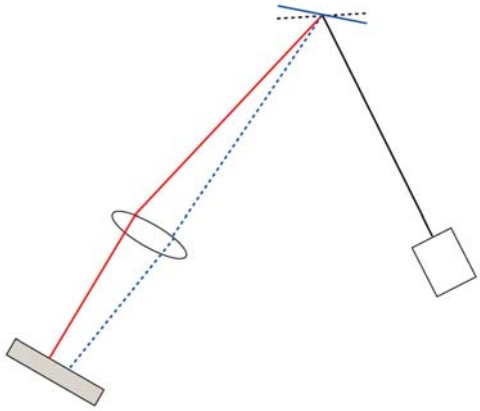


Slika 4.5. Uz definiciju komponenata površinskih refleksija

Upravo suprotnih svojstava, refleksna površina tipa I (*slika 4.5.c*) reflektira upadnu zraku u potpunosti, što se dešava prilikom osvjetljavanja zrcalnih i uglačanih metalnih površina. Sjajne površine plastičnih predmeta predstavljaju refleksni tip II, gdje se kod malih napadnih kutova javlja pretežno reflektirana fronta, a kod velikih reflektirana zraka. Hibridni tipovi predstavljaju kombinaciju svih triju refleksijskih komponenata, te će ovisno o utjecaju pojedine komponente raspodjela svjetloće odgovarati slikama *4.5.e* ili *f*. Osim oku vidljivih komponenata, postoji i komponenta zagrijavanja površine osvijetljenog modela koja ovdje nije posebno analizirana, jer efekt zagrijavanja površine modela spada u infracrveni dio spektra. Razmatrani projekcijski sustavi zahtijevaju da se projicirana zraka s vidljive površine mjernog objekta reflektira difuzno izravno u kamere mjernog sustava, kao kod lambertskog tipa površine, *slika 4.6.* Površine koje imaju izrazita reflektirajuća svojstva uzrokovale bi da se upadna zraka prema senzoru reflektira u izrazito uskoj zraci, koja ne mora nužno prolaziti kroz centar leće kao što je prikazano *slikom 4.7.*

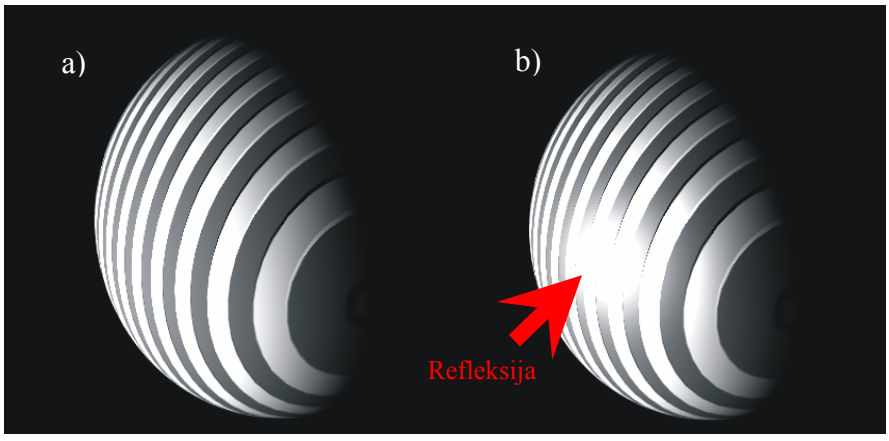


Slika 4.6. Refleksija svjetla s lambertske površine



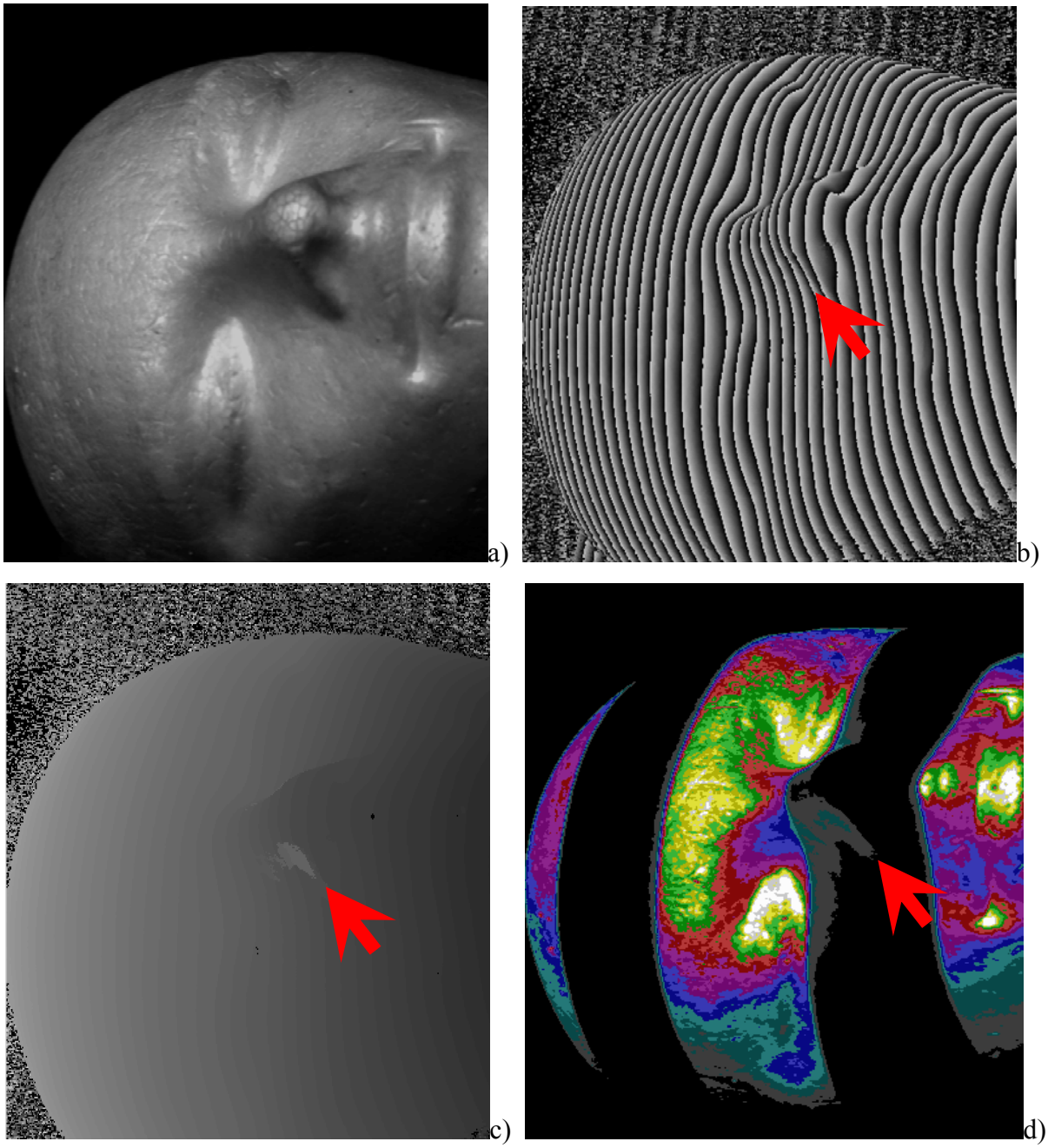
Slika 4.7. Refleksija svjetla sa refleksne površine

Opisani efekt utjecaja optičkih svojstava površine na definiciju mjerne točke zorno je prikazan *slikom 4.8.*, na primjeru osvjetljavanja kugle snopom paralelnih linija [37]. Kugla predstavlja geometrijsko tijelo koje već samom svojom geometrijom uzrokuje pojavu direktne refleksije, jer je za konvergentnu konfiguraciju kamera realno očekivati da će postojati takva točka na površini za koju će refleksijska komponenta svjetla prevladavati difuznu. Ako bi kugla imala idealnu lambertsku površinu kao na *slici 4.8.*, svaka od kamera bi snimila pravilni raster projiciranih linija, bez gubitka informacija. Efekt gubitka definicije projiciranog rastera uslijed pojave refleksije prikazan je *slikom 4.8. b*.



Slika 4.8. Simulacija odziva a) lambertske i b) refleksijske površine

Kod modela proizvoljne prostorne geometrije, osim direktnih, moguće su i pojave sekundarnih refleksija. Javljaju se kada se svjetlo višestruko odbija s neke projektorom osvijetljene površine modela na okolne površine. Kod faznih metoda koje koriste razmatrani sustavi, utjecaj je zamjetan pri analizi snimaka Gray koda, što je ilustrirano *slikom 4.9*. Ilustracija ovog efekta provedena je na približnom modelu ljudske glave načinjenom od polistirena, čija površina nije tretirana difuznim slojem boje. Kod potpuno osvijetljenog modela, uslijed direktne refleksije svjetla s površine modela izravno u kameru, radi lokalnog preosvjetljenja dolazi do gubitka definicije detalja na površini u zonama oko očiju, bazi nosa i usnama, *slika 4.9.a*. Vremenski kodiran uzorak frontalno je projiciran, te za jednu od kamera *slika 4.9.b* prikazuje sliku parcijalnih faza bez zamjetnih diskontinuiteta. Zbog velike gustoće projiciranih linija vremenskog faznog koraka (i zbog vremenskog načina analize), potencijalne refleksijske zone bile su obasjane s manje svjetla nego u *slici 4.9.a*, pa u preosvijetljenim zonama prema *slici 4.9.a* nije zamjetan utjecaj primarnih refleksija, niti sekundarnih refleksija u slici parcijalnih faza *4.9.b*. Apsolutne vertikalne faze prema *slici 4.9.c* pokazuju monotonu promjenu iz visokih (svijetlih) faza u tjemenom području u niže (tamne) faze u zoni brade modela, osim u strelicom označenoj zoni nosa, gdje dolazi do pojave lokalnog prirasta faza. Zbog sekundarne refleksije sa zone oka, područje na bočnoj strani nosa koje je u slijedu projiciranja trebalo pripadati tamnoj pruzi postaje lokalno preosvijetljeno, što je za jedan od uzoraka Gray koda označeno strelicom na *slici 4.9.d*. Radi zornijeg prikaza *slikom 4.9.d* odabran je prikaz u pseudo – bojama, koji razine istog intenziteta svjetloće zamjenjuje nekom iz spektra boja, pri čemu svjetlije boje odgovaraju jače osvijetljenim područjima. Zbog nekontroliranog lokalnog mijenjanja intenziteta projiciranih pruga, operator za analizu Gray koda daje pogrešne rezultate u slici apsolutnih faza. Analizira projiciranih uzoraka na površinu nepoznate geometrije provodi se piksel po piksel, te nije moguća detekcija sekundarnih refleksija na temelju analize svjetloće susjednih piksela. Tretiranjem površine difuznim slojem boje u kombinaciji s amplitudnim filtriranjem slike parcijalnih faza, ovaj efekt se može donekle eliminirati zato što postoji velika vjerojatnost da će zbog prostorne orijentacije zona sekundarne refleksije biti nešto lošije osvijetljena od ostatka površine, kao što se to vidi u *slici 4.9.a*.



Slika 4.9. Utjecaj sekundarnih refleksija: a)slika modela, b) parcijalne faze, c) apsolutne faze, d) intenzitet jedne od projekcija Gray koda prikazan pseudo-bojama

Efekt analogan opisanom može se pojaviti i ako u nekom području koje je osvijetljeno svijetlom prugom zbog lokalne geometrije dođe do pojave lokalnog zasjenjenja, pa program pri analizi pogrešno pretpostavi da se radi o tamnom Gray kodu.

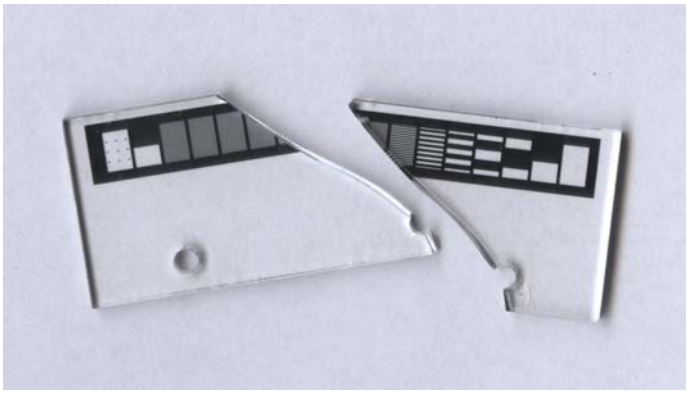
4.1.2. Okolišni utjecaji

Promatramo li kao zasebnu cjelinu sustav *mjerni objekt – senzor* u širem smislu kao neki mehanički sustav koji se nalazi u nekontroliranom okolišu, može se zaključiti da će upravo interakcija s okolišem predstavljati najizraženiji trajni vanjski utjecaj, te da će se efekti ostalih vanjskih utjecaja opisanih ovim poglavljem dodatno kompliciratи prilikom interakcije s okolišem. Proširimo li ovu definiciju sustava i na mjeritelja, lako je zaključiti da će, u općenitom smislu, utjecaj okoliša na mjernu nesigurnost rezultata mjerenja uvijek biti prisutan, dok će kvantitativna ocjena ovog doprinosa ukupnoj grešci najčešće biti teško kvantificirana uslijed velikog broja mogućih utjecajnih elemenata i njihovih interakcija. Pod utjecajima okoliša najčešće se podrazumijevaju direktni utjecaji, kao što je promjena temperature, vlažnosti, vibracija ili osvjetljenja, a koji mogu istovremeno djelovati i na elemente mjernog senzora i na sam mjerni objekt. Pritom je klasična pogreška i zanemarivanje analize utjecaja pojedinih elemenata na samog mjeritelja, te njegov osjećaj ugode.

- **Toplinski utjecaji**

Portabilnost projekcijskih sustava omogućuje njihovu upotrebu u okolišima raznolikih i nerijetko promjenjivih mikroklimatskih uvjeta. Oni, za razliku od kontaktnih TMU-a, imaju daleko manji broj pomičnih elemenata, koji su redovito malih masa u odnosu na elemente TMU-a. Budući da upravo ti pokretni dijelovi služe za izravno kodiranje mjerne informacije, može se naivno pretpostaviti da će ovaj toplinski utjecaj zapravo izravno djelovati na projekcijske karakteristike projekcijskih mjernih senzora. Halogeni, laserski i slični izvori svjetla koje projekcijski sustavi koriste za definiciju položaja mjerne točke na mjernom objektu, predstavljaju lokalni toplinski izvor unutar same konstrukcije mjernog senzora. Svaka je konstrukcija već nužno prilagođena odvođenju viška redundantne topline nastale prilikom rada svjetlosnih izvora radi očuvanja njihove temperaturne stabilnosti, a time i kontinuiranog intenziteta projiciranog svjetla. Iz navedenog slijedi da je za zadržavanje ponovljivosti identičnih temperaturnih uvjeta unutar mjernog senzora tijekom kompletnog trajanja mjerenja potrebno održati temperaturnu stabilnost izvora svjetla, kao i kompletne konstrukcije senzora. Utjecaj ovog unutarnjeg izvora topline najizraženiji je u vidu zagrijavanja optičkih elemenata koji služe za definiranje i precizno usmjeravanje strukturiranog svjetla na površinu mjernog objekta (primjerice, deformacija stakalca sa strukturom projekcijskog rastera kod projekcijskog senzora *Atos* izravno utječe na pravilnu

definiciju mjerne točke). Kod prototipne varijante sustava *Atos*, nakon otprilike sedam godina intermitentne upotrebe u ovom laboratoriju, došlo je do loma projekcijskog stakalca, *slika 4.10*.



Slika 4.10. Lom stakalca s projekcijskim uzorkom

Iz slike je vidljivo da pukotina prolazi kroz jednu od rupica kroz koje su prolazili vijci za učvršćivanje stakalca na pomični stolić. Primijećeno je da proizvođač u novijim varijantama sustava koristi stakalce bez rupica, a fiksiranje se izvodi posebnim čeljustima koja ne uzrokuju zarezna djelovanja na stakalce. CCD kamere koje se uobičajeno koriste za akviziciju slike, pri temperaturama višim od radne pokazuju tendenciju pojave šuma, kao i gubitka linearne ovisnosti upadnog svjetla o izlaznom električnom signalu iz fotoosjetljivog elementa matrice CCD čipa, ali one nisu dodatno hlađene.

- **Utjecaj vibracija**

Projekcijski sustavi, a naročito one njihove izvedbe kod kojih mjerni senzor i mjerni objekt nisu u izravnom dodiru, te stoje na odvojenim osloncima (često se projekcijski senzori pridržavaju na pomičnim fotografskim stativima, tripodima raznih izvedaba), čine praktički nemogućim izdvajanje kompletnog mjernog sustava iz njegove okoline. Ovo omogućava neželjenu pojavu relativnog pomaka senzora i mjernog objekta. Aktivni projekcijski sustavi koji koriste objektno orijentirane slikovne operatore (npr. skeletizacija laserske zrake) nemaju mogućnost detekcije pojave vibracija za vrijeme provođenja mjerenja, jer je položaj projicirane zrake, a time i mjerne točke na površini mjernog objekta, zapravo u funkciji otklona deflektorskog ogledala. Fazno orijentirani sustavi, kao što su to ovdje razmatrani sustavi, definiraju položaj mjerne točke slijednim projiciranjem svjetlosnog uzorka, što traje

izvjesno vrijeme. Ukoliko je došlo do relativnog pomaka sustava u odnosu na projiciranu površinu uslijed pogrešnog smisla osvjetljenja uzrokovanog ovim pomakom, pojavit će se skokovi u faznim slikama preko kojih je moguće detektirati eventualnu pojavu relativnog pomaka uzrokovanog vibracijama okoliša ili nedostatne krutosti stativa. Ovaj se efekt zatim može proširiti na unutarnje gibljive elemente ovih senzora (pomična ogledala, stakalca ili ventilatori), te time izravno djelovati na točnost i ponovljivost mjerenja. Kako se uglavnom radi o senzorima masa malih naspram ekvivalentnih kontaktnih TMU-a, te vitkim konstrukcijama, utjecaj vibracija potrebno je prilikom planiranja postupka mjerenja pažljivo eliminirati. Red veličina amplituda ovih okolišnih vibracija je zapravo dovoljno niskog reda da najčešće ne predstavlja izravan utjecaj na osjećaj ugodnosti mjeritelja, ali u tom smislu nipošto ne smije biti zanemaren.

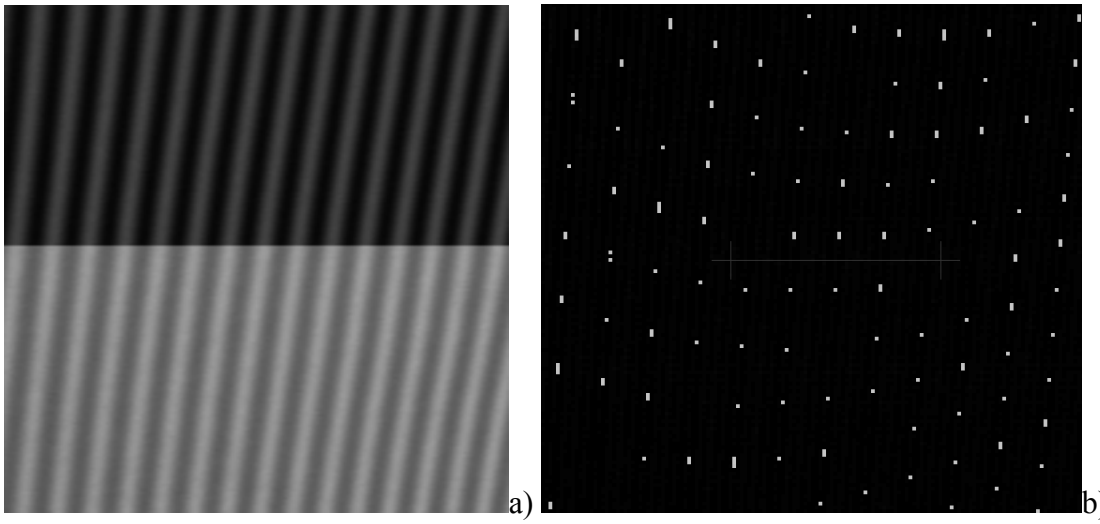
- **Utjecaj vlažnosti**

Kod projekcijskih metoda, u uvjetima naglih promjena lokalne temperature i vlažnosti (npr. unošenje senzora iz hladnog okoliša u topli prostor mjerenja ili uslijed promjene doba dana, ako se mjerenje vrši na otvorenom), utjecaj kondenzacije vlage pojavio bi se u vidu rošenja (zamagljivanja) leća, te korozijskog djelovanja na osjetljivu elektroniku mjernog senzora i pripadajućeg mjernog računala. Omogućavanjem izvjesnog perioda temperiranja na približno sobnu temperaturu, te planiranja mjerenja u prostorima kontroliranih mikroklimatskih uvjeta, utjecaj vlage na projekcijske senzore lako se može izbjeći. Projekcijska mjerenja, ovisno o kompleksnosti geometrije mjernog objekta, mogu trajati od iznimno kratkih perioda mjerenih minutama, do nekoliko sati ili dana kod iznimno velikih objekata. Sukladno tome, potrebno je uzeti u obzir i utjecaj vlage na mjerni objekt (i higroskopnost sloja boje kojom se eventualno tretira površina), kao i na mjeritelja.

- **Utjecaj osvjetljenja**

Projekcijski sustavi osjetljivi su na ovaj vanjski utjecaj jer prilikom varijacije intenziteta svjetla iz okoliša dolazi do interakcije s projiciranim uzorkom i time do izravnog utjecaja na pravilnu definiciju mjerne točke. Ovi utjecaji se u nekoj mjeri mogu kompenzirati korigiranjem intenziteta projiciranog svjetla (npr. ako je vanjsko osvjetljenje jednolikog intenziteta koji se ne mijenja s vremenom). Promjenjivost intenziteta osvjetljenja okoliša tijekom procesa mjerenja može uzrokovati povremeni gubitak definicije rastera na površini mjernog objekta uslijed preosvijetljenosti, kao i do neželjenih refleksija, a time i greške u definiciji mjerne točke. Rasteri temeljeni na vremenskom faznom pomaku koji se koriste kod

razmatranih sustava analiziraju položaj mjerne točke na osnovu redoslijeda izmjene svijetlih i tamnih područja, a ne njihovog intenziteta. Stoga su manje osjetljivi na kontinuirano povećanje intenziteta svjetloće od direktnih ili objektnih metoda. U preosvijetljenim zonama dolazi do promjene amplitude, dok je utjecaj na faze nešto slabije izražen. U provedenom eksperimentu u znatnijoj mjeri ovaj utjecaj pojavio se lokalno samo kod ekstremnih preosvjetljenja. Gornjom polovicom *slikom 4.11.a* ilustriran je ispravan, a donjom preosvijetljen raster vremenskog faznog koraka za isto slikovno područje, dok je na *slici 4.11.b* uvećan detalj razlike parcijalnih faza za rastere iz *slike 4.11.a*. Bijele točke predstavljaju mjesta skokova parcijalnih faza kao posljedice preosvjetljenja, dok su tamna mjesta ona mjesta na slici na koje preosvjetljenje nije u većoj mjeri utjecalo. Razlike u parcijalnim fazama postoje i u tamnim područjima, što je za horizontalni pravac na *slici 4.11.b* ilustrirano *slikom 4.11.c*. Preporuka je projiciranje provoditi u prostoriji s kontroliranim osvjetljenjem, po mogućnosti osvijetljenoj toplim izvorima svjetla. Osim na kvalitetu definicije projiciranog rastera, utjecaj varijacije intenziteta, zajedno s nepovoljnim upadnim kutom, djeluje i na sposobnost korištenih kamera za ispravnu digitalizaciju promatrane scene. Rasvjeta koja je uobičajena u industrijskim pogonima u vidu neonskih rasvjetnih tijela nema kompletan spektralni raspon kao dnevno svjetlo ili topli izvori kao što su npr. halogene lampe. Stoga, prilikom digitalizacije slike dolazi do pojave neželjenih artefakata i distorzije boje u snimljenoj slici, te je neonska rasvjetna tijela poželjno izbjegavati. Laserski projekcijski sustavi zbog svoje izrazite monokromatičnosti manje su osjetljivi na ovaj utjecaj od sustava koji se koriste nekoherentnim izvorima svjetla. Osim na mjerne uređaje, utjecaj osvjetljenja izražen je i na mjeritelja, koji je nerijetko izložen monotonoj kontroliranoj rasvjeti. To kod nekih ljudi izaziva osjećaje nelagode i depresije, dok se kod ekstremnih slučajeva reakcije na frekventni raspon hladnih izvora mogu pojaviti epileptički napadaji kod izrazito osjetljivih osoba. Primjerice, projekcijskim senzorima koji projiciraju nekoherentno svjetlo, upravo radi smanjenja promjene intenziteta svjetloće iz okoliša uzrokovane dnevnim sunčevim mijenama, odgovara polumračna prostorija. Mjeritelj koji radi s takovim senzorom je s jedne strane izložen monotonoj rasvjeti okoliša, a s druge strane intenzivnoj lokaliziranoj rasvjeti iz mjernog senzora, koja se pritom i periodički mijenja, pa je opet realno postojanje smetnji na njegov osjećaj ugodnosti i ergonomičnosti radnog mjesta. U tom smislu treba ovdje spomenuti i iracionalni strah koji ljudi nerijetko ispoljavaju prema laserskim izvorima svjetla, iako su klase izvora svjetla koji se koriste u ovim uređajima uglavnom prilagođene ljudskom vidu.

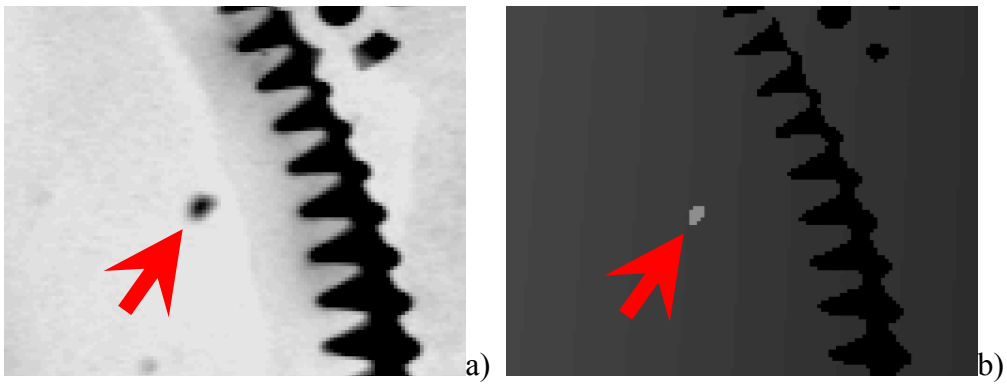


Slika 4.11. Ilustracija utjecaja preosvijetljenja a) detalj površine sa ispravnim (gore) i preosvijetljenim (dolje) uzorkom vremenskog faznog pomaka
b) područja očekivanih pogrešaka uslijed preosvjetljenja
c) promjena parcijalnih faza uslijed preosvjetljenja

- **Utjecaj prašine i drugih izvora nečistoće**

Projekcijski sustavi imaju daleko manje gibljivih dijelova od mehaničkih mjernih uređaja, ali postojanje prašine u okolišu u izvjesnoj mjeri utječe na prolazak projiciranog svjetla kroz zračnu barijeru do površine mjernog senzora, te njeno taloženje na optičkim površinama objektiva utječe na kvalitetu snimljene slike ili projicirane zrake. Ova kontaminacija nastaje kao posljedica lokalne nečistoće mjerne lokacije, te nerijetko kao posljedica tretiranja

površine modela difuznim slojem boje koja je lako raspršiva u zraku. Budući da razmatrani sustavi omogućuju izmjenu objektiva ovisno o zahtijevanom mjernom volumenu, prilikom demontaže objektiva s tijela kamere nerijetko je šupljina kamere, pa i sama površina fotoosjetljivog čipa, izravno izložena utjecaju prašine, koja svojim prisustvom smeta pravilnoj digitalizaciji promatranog efekta. Zrnca prašine se s površine čipa ne smiju mehanički uklanjati, a čak i pri pokušaju čišćenja komprimiranim zrakom treba biti iznimno oprezan jer postoji opasnost od kontaminacije vodenim kondenzatom iz kompresora. Prašina koja stoji na leći kamere ili projektora periodički utječe na sve snimljene slike na istom mjestu u slici. Ako prašina nije u samoj zoni izoštrenosti objektiva i ako nije zahvaćena znatna površina objektiva, zbog svjetlosnih zraka koje prolaze pokraj kontaminirane površine utjecaj na intenzitet snimljenog svjetla bit će slabije izražen. Kod primjene faznih metoda u slici parcijalnih faza za očekivati je da će se ovaj utjecaj javiti u vidu lokalnog smanjenja amplitude. Korišteni projektor sastoji se od stakalca s metalizacijom nanesenim rasterom, koje je izravno izloženo okolišnoj atmosferi zbog potrebe odvođenja topline nastale zagrijavanjem izvora svjetla. Prašina koja u sebi sadrži masne čestice lako se hvata na zagrijanu površinu stakalca, a toplina izvora svjetla još više utječe na njeno učvršćivanje na samoj površini stakalca. Zbog fine strukture metaliziranih linija mehaničko uklanjanje prašine ne dolazi u obzir. Projiciranje svjetla kroz kontaminirano stakalce projektora neće imati periodički karakter jer se utjecaj prašine kao mutne zone može pojaviti na bilo kojem mjestu bilo kojeg uzorka. *Slikom 4.12.a* pokazan je detalj jedne od slika Gray koda na čijem se svijetlom polju pojavila prašina.



Slika 4.12. Utjecaj prašine a) u slici Gray koda, b) u slici apsolutnih faza

Slika parcijalnih faza je u ovom slučaju kontaminacije bila ispravna, dok je na slici apsolutnih faza kontaminirano mjesto vidljivo kao lokalni skok u faznoj slici nastao zbog

zbunjivanja pogrešnim kodom operatora za analizu Gray koda, *slika 4.12.b*. Ovisno o projiciranom uzorku, fazni efekt također se može razlikovati od prikazanog. Nije poznato kako sustav drugog reda filtrira ovaj problem, dok programska podrška prototipnog sustava treće vrste pretpostavlja da je projekcijsko stakalce čisto. Ne smije se zanemariti ni utjecaj na mjeritelja koji je izravno pod utjecajem kontaminirane atmosfere, te su moguće pojave alergijskih reakcija, a time i utjecaja na ugodnost radnog mjesta.

4.1.3. Tehnološki utjecaji

- **Definicija mjernog zadatka**

Ispravna definicija svakog mjernog zadatka zahtijevala bi postojanje iscrpne tehničke dokumentacije kojom su jednoznačno definirane karakteristične mjerne točke, tj. one objektne karakteristike (npr. ravnine, provrti, utori i sl.) čiju je geometriju potrebno poznavati kako bi se u daljnjem tijeku obrade (nakon što su sve potrebne mjerne točke izmjerene) iz dobivenih podataka željena geometrija mjernog objekta mogla u potpunosti rekonstruirati. Postojanje odgovarajuće, ili barem približno odgovarajuće dokumentacije prikladne za primjenu s navedenim senzorima, može se očekivati u onim granama industrije koje digitalizacijske mjerne senzore kontinuirano koriste kao mjerno sredstvo na određenom vlastitom proizvodu, zanemarujući pritom karakter mjerenja, odn. pitanje radi li se o kontroli kvalitete izrade postojećeg (npr. dimenzijska kontrola lijevanih strojnih dijelova i sl.), o mjerenju unikatnog modela (npr. modeliranje geometrije automobilske šasije), stvara li se potpuno nova dokumentacija ili se provode korekcije postojeće na temelju dokumentacije geometrijski sličnog proizvoda. Današnje vrlo široko područje primjene kontaktnih, a posebno beskontaktnih projekcijskih mjernih senzora na probleme i modele za koje još uopće ne postoji tehnička dokumentacija (koja će se napraviti upravo na temelju digitaliziranih podataka), zapravo mijenja smisao pojma definicije mjernog zadatka. Sada se, zapravo, taj termin u proširenom smislu odnosi na iterativni postupak tijekom kojega je potrebno da mjeritelj (bazirano na njegovom vlastitom mjeriteljskom iskustvu s korištenom mjernom opremom i saznanjima o svrsi i načinu primjene rezultata mjerenja) vrši definiciju referentnih površina i položaja mjernih točaka na površini mjernog objekta čija je geometrija do tada bila nepoznata. Također, mjeritelj treba iskustveno definirati položaj mjernih točaka preko kojih će se izvršiti definicija svih potrebnih geometrijskih karakteristika, kako bi se numerički

mogla opisati površina kompletnog mjernog objekta ili samo traženih lokalnih karakteristika. Kompleksnost ovog postupka ovisit će dodatno i o broju mjernih točaka (te njihovom rasporedu u promatranom mjernom volumenu), koje se s korištenim mjernim senzorom po jednom mjerenju mogu odrediti. Tako je kod projekcijskih postupaka planiranjem zapravo potrebno optimizirati broj pojedinačnih mjerenja, te putanju mjernog senzora, kako bi se trenutnim fiksnim mjernim volumenom korištenog senzora što efikasnije pokrila kompletna geometrija mjernog objekta (jer prostorna rezolucija ovisi o korištenoj metodi i senzoru), te u tom smislu definirati pojedinačne položaje relativne orijentacije mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt.

- **Planiranje mjerenja**

Postupkom planiranja mjerenja [57], kojeg su zahtjevi zadani prethodnim postupkom definicije mjernog zadatka, potrebno je optimalno definirati položaj i međusobnu relativnu raspodjelu mjernih točaka po površini mjernog objekta, kao i način prihvata predmeta mjerenja unutar mjernog volumena mjernog senzora, uzevši u obzir i potrebu za eventualnom manipulacijom mjernim objektom tijekom mjerenja. Planiranjem je potrebno u potpunosti definirati proces mjerenja na takav način da bi se uz što manji broj mjernih osjeta zadana površina mogla zadovoljavajuće opisati sa što većom točnošću, u najkraćem vremenu potrebnom za provođenje mjerenja [49]. Oprečnost ovih zahtijeva bit će moguće zadovoljiti samo uz uvjet da su unaprijed poznate mogućnosti i ograničenja vezana uz tehnologiju na kojoj se bazira korišteni mjerni sustav za prikupljanje mjernih točaka, tj. da su poznati utjecaji unutrašnjih i vanjskih faktora, te orijentaciono poznata geometrija mjernog objekta.
Princip planiranja mjerenja preko definicije zamjenske geometrije, korišten za diskretno opisivanje geometrije mjernog objekta prilikom digitalizacije površine mjernih objekata s nekom od projekcijskih mjernih metoda, nije nužan. Razlog tome je mogućnost projekcijskih metoda da u jednom mjerenju (misli se na jedno projekcijsko mjerenje iz nekog trenutnog relativnog položaja senzora i mjernog objekta) izmjere veliki broj mjernih točaka na površini, te time kvalitetnije opišu geometriju promatrane površine (u smislu potpunosti).

Postupak planiranja mjerenja kod projekcijskih metoda stoga obuhvaća sljedeće korake:

- definiranje veličine mjernog volumena za pojedine mjerne korake, tj. definiranje prostorne rezolucije mjernog senzora,

- optimiziranje trenutnog relativnog položaja mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt za pojedini korak digitalizacije, a na osnovu zahtjeva postavljenih mjernim zadatkom i geometrijom mjernog objekta,
- planiranje prihvata mjernog objekta,
- tretiranje površine mjernog objekta.

U slučaju mjerenja oblika projekcijskim metodama, pojam mjerenja dobiva prošireni smisao, jer se i iz samo jednog relativnog položaja mjernog senzora digitaliziranjem površine mjernog objekta dobije veliki broj prostornih mjernih točaka koje predstavljaju promatrani segment geometrije mjernog objekta. Tako je potrebno razlikovati mjerenje iz jedne trenutne relativne pozicije od slijednog mjerenja kompletnog mjernog objekta. Pri tome se kao rezultat mjerenja dobije oblak točaka (koji opisuje površinu mjernog objekta), snimljen iz različitih orijentacija mjernog senzora oko mjernog objekta. Veliki broj digitaliziranih točaka, odnosno velika prostorna rezolucija projekcijskih metoda, umanjuje potrebu za diskretizacijom geometrije prilikom planiranja mjerenja, budući da se ovdje mjerenja mogu planirati na način da se iz više preklapajućih mjerenja površina mjernog objekta digitalizira tako da bude u potpunosti prekrivena mjernim točkama. Zbog specifičnosti utjecaja konstrukcije mjernog senzora na raspored i kvalitetu digitaliziranih mjernih točaka, osim planiranja relativnog položaja senzora da bi se uspješno mogao digitalizirati kompletni mjerni volumen, potrebno je uzeti u obzir i karakter izvora svjetla koji projekcijska metoda koristi za definiciju mjerne točke, a samim time i utjecaj materijala, optička svojstva površine mjernog objekta, površinske geometrijske artefakte, potrebu digitalizacije kompletnog mjernog volumena (površine koje nisu vidljive uslijed samozasjenjenja ili zasjenjenja senzora), te način prihvata mjernog objekta. Budući da ne postoji direktni kontakt između mjernog senzora i površine mjernog objekta, diskontinuiteti i nagle promjene geometrije neće utjecati u tolikoj mjeri na brzinu i potpunost mjerenja kao što je to slučaj prilikom planiranja putanje mjernog senzora kod kontaktnih metoda. Kod projekcijskih sustava koji mehanički kontroliraju relativan položaj mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt, predznanje o geometriji ne igra presudnu ulogu, budući da je relativnu putanju senzora ili mjernog objekta moguće planirati za zadanu veličinu mjernog volumena koji je konstrukcijski dopušten (konačne dimenzije rotacijskog postolja kod nekih laserskih mjernih senzora). Oni sustavi koji nemaju mehanički kontrolirano relativno pozicioniranje senzora, zahtijevaju uvođenje optičkih karakteristika preko kojih će biti izvršeno određivanje relativne orijentacije u koju je senzor doveden manualno ili preko robotskog manipulatora. Položaj, broj, dimenzije i oblik

navedenih optičkih karakteristika potrebno je kod planiranja mjerenja takvim sustavima optimalno planirati po površini i u neposrednom okolišu mjernog objekta, kako bi se omogućila digitalizacija kompletnog mjernog volumena uz optimalan broj mjerenja i minimalan gubitak informacija o površinskim artefaktima mjernog objekta, uslijed nanošenja markera na samu mjernu površinu.

4.1.4. Rukovanje mjernom opremom

Uspješnost provođenja nekog mjernog procesa, te samim time i provedba naknadne analize podataka dobivenih nekim mjernim postupkom ovisit će, osim o tehnološkim karakteristikama korištene mjerne opreme, te ergonomičnosti korištenja opreme i pripadajućeg upravljačkog programa, i o do tada stečenom iskustvu operatera u korištenju odabrane mjerne tehnologije. Misli se na operaterovo poznavanje i razumijevanje temeljnih principa tehnologije na kojoj se bazira digitalizacijski senzor korištenog mjernog uređaja, upoznatost s utjecajem geometrijskih, mehaničkih i optičkih karakteristika mjernog objekta, na planiranje i sam rezultat mjerenja, operaterove mjeriteljske sposobnosti, njegove sposobnosti prostorne vizualizacije i shvaćanja međusobne interakcije različitih vanjskih utjecaja, kao i sposobnost usvajanja novih tehnologija, te otvorenost za suradnju s konstruktorom, odnosno CAD dizajnerom. Kroz pojednostavljenje programskih upravljačkih paketa (vezano uz upravljanje mjernim senzorom, planiranje mjerenja i kalibraciju potrebnih parametara mjernih sustava), te specijalizacije pojedinih mjernih senzora za mjerne zadaće prema specifičnim zahtjevima od strane naručitelja i krajnjih korisnika mjerne opreme, tendencija je proizvođača mjerne opreme smanjiti vrijeme potrebno za svladavanje temeljnih principa korištenja. Nije rijetkost da upravo proizvođač pruža specijalizacijske tečajeve i organizira tzv. *users meetings* (sastanke svojih korisnika s prezentacijama novih tehnologija i komparativnim mjerenjima, npr. GOM User Meeting) za isporučenu mjernu opremu. Time je kroz pravilnu edukaciju mjeritelja, konstantnim držanjem koraka s trenutnim stanjem tehnološkog razvoja korištene metode i kroz poboljšanje razmjene informacija između proizvođača i korisnika, donekle povećana mjeriteljska svijest, tj. umanjen utjecaj ljudske pogreške na sam rezultat mjerenja i podignuta razina ergonomičnosti i ekonomičnosti rukovanja pojedinim mjernim sustavima.

4.1.5. Programska podrška

Ovisnost modernih mjernih metoda o računalima i pripadajućoj programskoj podršci, bilo kroz rješavanje matematičkih modela za definiciju mjerne točke, bilo kroz kontrolu mehaničkih funkcija mjernih uređaja, programsku podršku svrstava u ne tako strogo definiranu domenu vanjskih, odnosno unutrašnjih utjecajnih faktora [49]. Radi se o jedinom dijelu mjernog uređaja koji je moguće nadograditi i modificirati bez velikih troškova vremena i novca, kao i potrebe za fizičkom zamjenom određenih konstrukcijskih elemenata. Zbog tako velike sprege temeljnih principa mjernih metoda i njima pripadajućih mjernih programa, nerijetko se upravo programskim paketima i algoritamskim rješenjima pripisuju zapravo nerealne mogućnosti za nadilaženje fizičkih limita same metode kojom se akvizicija podataka provodi, zaboravljajući pritom na uzročno-posljedičnu vezu između sustava za akviziciju, obradu i analizu podataka. S druge strane, upravljački program je zapravo veza između mjeritelja i mjernog sustava, te je tu interakciju sa stajališta mjerne nesigurnosti također potrebno uzeti u obzir prilikom razvoja pojedinih modula mjernog softvera.
Razdvajanjem pojedinih funkcionalnosti mjernog softvera na međusobno nezavisne elementarne zadaće (kalibracija, planiranje mjerenja, upravljanje mjerenjem, obrada rezultata), postaje jasniji smisao utjecaja pojedinih dijelova korištene programske podrške na mjernu nesigurnost mjerenja nekim mjernim senzorom.

Sustav za kalibraciju. Potreba za provođenjem postupka kalibracije zajednička je svim kontaktnim i projekcijskim mjernim metodama. Tim se postupkom, koji je specifičan za pojedinu metodu, tj. mjerni senzor, a provodi se neposredno prije samog mjerenja, na temelju kalibracijskih objekata unaprijed poznatih karakteristika određuju pogonski parametri matematičkih modela koji su nužni za provođenje mjerenja uz mjernu nesigurnost procijenjenu na temelju kalibracije. Nerijetko su korišteni kalibracijski objekti po svojim geometrijskim ili optičkim karakteristikama zapravo prilagođeni promatranom mjernom senzoru, pretpostavljajući pritom da na zadovoljavajući način omogućuju definiciju potrebnih pogonskih parametara u nekom zadanom mjernom volumenu promatranog senzora. Kalibracija razmatranih sustava provodi se istim kalibracijskim objektom, prikazanim *slikom 2.7*. Poznato je [49] da će se pouzdana procjena mjerne nesigurnosti rezultata dobiti jedino u slučaju kada se mjerna strategija kalibracijskog postupka prilagodi trenutnom realnom mjernom problemu. To bi teoretski zahtijevalo izradu specifičnih kalibracijskih objekata za svaki mjerni objekt, te razvoj adekvatnih poopćenih numeričkih modela za svaki od mjernih

sustava kojima bi se kalibracija mogla provoditi preko općenito zadane geometrije kalibracijskog objekta. Kod kontaktnih mjernih metoda, ovaj pristup može se realizirati u smislu konstrukcije trokoordinatnih komparatora [49], primjenjivih na mjerenja velikih serija proizvoda.

Sustav za planiranje mjerenja. Poznavanje efekata koji se javljaju prilikom interakcije mjernog senzora s površinom mjernog objekta, te njihovih utjecaja na mjernu nesigurnost (npr. utjecaj promjene smjera kontakta ticala mjernog senzora kod kontaktnih mjernih senzora [49] ili refleksije svjetla sa zakrivljenih površina kod projekcijskih mjernih senzora), može se preko odgovarajućih programskih algoritama upotrijebiti u svrhu planiranja optimalne trajektorije mjernog ticala, odnosno planiranja trenutne relativne orijentacije mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt. Uz uvjet da su okvirna geometrija, te svojstva površine mjernog objekta prilikom planiranja poznati, kao i tehnološki utjecaji korištenog mjernog senzora u promatranoj mjernoj zadaći, sustavom za planiranje definirali bi se optimalni parametri provođenja mjerenja uz minimaliziranje mjerne nesigurnosti. Zbog velikog broja mogućih vanjskih i unutrašnjih faktora koje bi takav algoritam trebao uzeti u obzir prilikom planiranja mjerenja nekih novih mjernih objekata dotad nepoznate geometrije, većina proizvođača mjernog softvera (naročito kod projekcijskih metoda) nema ovaj programski modul u vlastitom softveru, te se taj posao najčešće uz određene preporuke prepušta samom mjeritelju.

Sustav za upravljanje mjerenjem. Programska podrška za proces upravljanja mjerenjem načelno se za sve tipove mjernih senzora može podijeliti na modul za interakciju s korisnikom, te modul za upravljanje mjernim uređajem. Modul za interakciju s korisnikom trebao bi, uz intuitivnost i ergonomičnost korištenja, pregledno sadržavati podatke koji su relevantni za trenutni stadij provođenja mjerenja. Budući da se mjeritelj tijekom procesa mjerenja najduže zadržava upravo u dodiru s ovim programskim modulom, njegova brzina odziva, jasnoća prikaza rezultata mjerenja na ekranu te količina pažnje koju mjeritelj mora posvetiti samom njegovom korištenju i planiranju sljedećeg koraka utjecat će izravno na stupanj mjeriteljeve koncentracije i ugodnosti pri radu s odabranim mjernim uređajem, a samim time i na njegovu sposobnost planiranja daljnjeg postupka mjerenja.
Općenito, programski modul za upravljanje mjernim uređajem zapravo ima dvojaku funkciju: njime se vrši upravljanje pokretnim (mehaničkim) i nepokretnim (elektroničkim) dijelovima mjernog uređaja, kao i konverzija informacija prikupljenih senzorima u koordinate mjernih

točaka prikladne za daljnju obradu. Budući da je svaki mjerni uređaj (od ovdje promatranih tipova mjernih uređaja) specifičan po svojim konstrukcijskim rješenjima, upravljački dio programske podrške također je vezan uz pojedini mjerni uređaj, tako da time taj dio programske podrške ne ulazi u ovu analizu. Što se pak tiče onog dijela upravljačkog programa kojim se vrši izračun prostornih koordinata mjernih točaka na temelju digitaliziranih podataka mjernim senzorom, nužno je postojanje jasne granice između podataka dobivenih na temelju čistog mjerenja i podataka dobivenih naknadnim digitalnim filtriranjem. To znači da je bitno, u smislu razdvajanja programa na zasebne module, da digitalizirani podaci, kada napuštaju ovaj modul, nisu podvrgnuti nikakvim postupcima filtriranja (osim obrade osnovnim algoritmom) koji bi doveli do prividnog smanjenja rasipanja rezultata. Odvajanjem pojedinih zadaća koje se tiču upravljanja mjernim uređajem na zasebne module postignuto je i smanjenje direktnog utjecaja ljudskog faktora na samu mjernu proceduru za vrijeme koje je senzoru potrebno za samu akviziciju podataka. Međutim, upravo za vrijeme trajanja samog postupka mjerenja korisnik postaje samo pasivni promatrač mjerenja, te je stoga vrijeme koje protekne do sljedeće potrebe za njegovom interakcijom zapravo kritično po njegov stupanj koncentracije. Ovisno o karakteristikama mjernog objekta, proces mjerenja može potrajati i do nekoliko sati (prema vlastitim iskustvima s projekcijskim metodama, prilikom digitaliziranja kompletne geometrije nekog mjernog objekta, kreće se između dva i šest ili više sati), te se to vrijeme praznog hoda tijekom kojega mjeritelj ima pasivnu ulogu kod metoda kodiranog svjetla može kretati od dvadesetak do četrdesetak sekundi, ovisno o parametrima metode. Veliki broj ponavljajućih pauza koje su duže od mjeriteljevog praga tolerancije (iz vlastitog iskustva autora podnošljivo je čekati do nekih 30 sekundi) dovode do zamora, a time i do sklonosti pogreškama. Zadatak je programera prikladnim prilagodbama reducirati ovo vrijeme čekanja na najmanju moguću mjeru, te korisniku omogućiti automatizaciju često ponavljajućih radnji.

Sustav za obradu rezultata. Temeljna svrha nekog mjernog softvera je omogućiti za korisnika što transparentniji, u potpunosti ili djelomično automatiziran način prikupljanja željenih podataka na nekom mjernom senzoru (uz zadržavanje općenitosti primjene zadanog mjernog uređaja). U tom smislu korišten mjerni softver ne treba sadržavati module za daljnju obradu rezultata mjerenja (module koji omogućavaju donošenje nekih zaključaka na temelju izmjerenog oblaka točaka), već je dovoljno da se podaci dobiveni digitalizacijom mogu prikazati u formatu prikladnom za daljnju obradu pomoću specijaliziranih programa. Time se nekom mjernom senzoru omogućuje općenitost primjene uz pojednostavnjenje programskih

funkcija, te on time nije ograničen samo na predefinirane repetitivne mjerne radnje kojima se vrši usporedba s nekim unaprijed poznatim digitaliziranim modelom. Međutim, postoje i takve mjerne zadaće (npr. kontrola odstupanja od kružnosti pomoću kontaktnih ticala [49]), kod kojih je vremenski i tehnološki opravdano direktno korištenje modula u analizi željenih geometrijskih karakteristika. Pritom će se svi poznati vanjski i unutrašnji utjecaji na mjerni sustav moći implementirati u navedeni modul za obradu rezultata.

4.1.6. Ljudski faktor

Ako promotrimo sve faze nekog mjernog procesa (neovisno o primijenjenoj mjernoj tehnologiji i uređajima), započevši s definiranjem mjernog zadatka, preko pripreme mjernog uređaja i mjernog objekta za provođenje mjerenja, kalibracije mjernog uređaja, zatim planiranja trajektorije mjernog senzora tijekom provođenja mjerenja, te krajnje analize rezultata, vidljivo je da je direktni ili indirektni utjecaj čovjeka neizbježan u svim fazama mjernog procesa. Stoga je za procjenu realne mjerne nesigurnosti te potpunosti oblaka točaka izmjerenih podataka potrebno uzeti u obzir i utjecaj čovjeka (ljudski faktor) koji provodi mjerenje, budući da on [49] na osnovu informacija o uvjetima okoliša, geometrijskih, materijalnih i optičkih karakteristika mjernog objekta, te vlastitog poznavanja principa i mogućnosti korištene mjerne opreme subjektivno odlučuje o izboru relevantnih procesnih parametara prilikom provođenja mjerenja. Iz navedenog slijedi da se za isti mjerni objekt, uz iste okolišne uvjete, te na istom mjernom uređaju može očekivati da će dva mjeritelja različitih razina znanja imati različit utjecaj na kvantitativan iznos mjerne nesigurnosti, iako se zapravo ništa u korištenoj mjernoj tehnologiji ili mjernom objektu nije mijenjalo.

4.1.7. Zahtjevi naknadne obrade podataka

U direktnoj sprezi s postupkom planiranja mjerenja, tj. odabira mjerne tehnologije, kao i mjernog senzora za zadani mjerni zadatak, potrebno je sagledati sve one zahtjeve koje konstruktor, tj. CAD operator sa stajališta očekivane točnosti, broja i relativnog rasporeda mjernih točaka u izmjerenom oblaku stavlja pred mjeritelja ili odabranu mjernu tehnologiju.

Svaka je mjerna zadaća specifična, bilo zbog specifičnosti vezanih uz tehnologiju primijenjenu za definiranje mjerne točke na površini mjernog objekta, bilo zbog utjecaja specifičnosti geometrije ili materijalnih i optičkih karakteristika mjernog objekta. Generalizirano se može reći da je upravo zadaća onog koji planira mjerenje da u suradnji s konstruktorom omogući digitalizaciju mjernog objekta na takav način i u onim mjernim točkama u kojima je to nužno, kako bi se zadovoljio uvjet potpunosti digitalizacije geometrije mjernog objekta, sa svim neophodnim artefaktima. Pažljivo planiranje postupka mjerenja omogućuje da se u naknadnoj obradi rezultata mjerenja promatrana površina mjernog objekta ili samo neke specifične geometrijske karakteristike mogu rekonstruirati iz izmjerenih točaka u najkraćem mogućem roku, s najvećom mogućom točnošću, te što je potrebno dodatno naglasiti - bez potrebe za naknadnim mjerenjima pojedinih elemenata mjernog objekta. Pritom je poželjno da se prilikom analize izmjerenih podataka potreba za suradnjom između mjeritelja i onoga tko će kasnije obrađivati izmjerene podatke svede na minimalnu moguću mjeru. Kako se proizvođači mjerne opreme većinom orijentiraju samo na izradu prikladnih algoritama za analizu promatranog efekta kodiranja mjerne točke, implementiranih kao sastavni dio programske podrške za upravljanje mjernom opremom, tako su i upravljački programi mjernih senzora većinom prošireni samo rudimentarnim funkcijama za prostornu manipulaciju i elementarnu analizu rezultata mjerenja. Sa stajališta obrade podataka ovaj pristup je opravdan, budući da je prethodnim analizama već i kod relativno jednostavnog problema kontrole odstupanja od kružnosti [49] pokazano postojanje grešaka koje se pojavljuju kao posljedica nedovoljno točne implementacije algoritama ili pak primjene onih algoritama koji nisu dovoljno prilagođeni svakodnevnoj mjernoj praksi. Posljedica razdvajanja mjernih sustava od CAD sustava za obradu prostornih točaka je potreba za razmjenom podataka između mjernog sustava i nekog od mnogobrojnih tržišno dostupnih CAD sustava. Zbog velikog broja različitih tipova mjernih senzora (koji, vezano uz specifičnost digitaliziranja točaka, definiraju strukturu podataka specifično za primijenjeni senzor), te velikog broja tržišno dostupnih CAD sustava, dolazi do pojave nekompatibilnosti, kako zbog nemogućnosti učitavanja nekog formata, tako i zbog razlike unutar pojedine verzije istog formata (najčešće zbog nepotpunosti implementacije filtara za konverziju iz formata u format). Time se, uslijed faktora koji su izvan mjeriteljske domene, utječe na pouzdanost rezultata mjerenja.

4.2. Analiza unutrašnjih faktora

Pod terminom *unutrašnji faktori* u užem smislu ovdje se promatraju tehnološki principi na koje se pojedina mjerna metoda oslanja pri definiranju mjerne informacije. U širem smislu, s obzirom na činjenicu da se sva mjerenja zapravo moraju vršiti s realnim, a ne teoretskim izvedbama mjernih senzora, ova definicija je proširena tako da se pod istim terminom podrazumijevaju i oni realni utjecaji na kvalitetu i raspodjelu digitaliziranih mjernih točaka koji proizlaze iz stvarnih konstrukcijskih izvedbi pojedinih mjernih senzora.

Projekcijski senzori za kodiranje položaja objektne mjerne točke i digitalizaciju njena slikovnog osjeta koriste različite principe (npr. pomično stakalce s metaliziranim uzorkom, LCD projektore, projiciranje točke ili linije uz ostvarivanje relativnog pomaka senzora i mjernog objekta mehaničkim sustavima s unutarnjim ili vanjskim gibljivim elementima i sl.) i različite fizičke izvedbe mjernih senzora. Stoga je potrebno utjecaje unutrašnjih faktora kod projekcijskih sustava analizirati s obzirom na:

- utjecaj strukturnih elemenata mjernog uređaja,
- utjecaj načina definiranja mjerne točke i mjernog volumena,
- utjecaj kalibracije sustava,
- utjecaj programske podrške.

4.2.1. Utjecaj strukturnih elemenata mjernog uređaja

Pod strukturnim elementima projekcijskih sustava obično se misli na:

- sustave za digitalizaciju slike,
- optičke elemente,
- izvor svjetla,
- pomične elemente.

Utjecaj digitalizacije slike. Za digitalizaciju mjernih scena projekcijske metode koje na površinu mjernog objekta projiciraju neki rasterski uzorak vidljivog dijela spektra koriste se poluvodičkim kamerama baziranim na CCD, CMOS (eng. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [58,59,60], te posebnim analognim LPED pretvornicima [61]. Intenzitet

svjetla fokusiranog preko odgovarajuće optike na fotoosjetljivo područje poluvodičkog osjetila pretvara se u analogni električni signal, koji se digitalizacijom pretvara u sliku na monitoru računala. CCD i CMOS tipovi čipova su diskretni sustavi čija se aktivna površina sastoji od određenog broja fotoosjetljivih elemenata (piksela), raspoređenih u matričnu strukturu. Prilikom digitalizacije ovim senzorima, snop upadnog svjetla biva dvojako diskretiziran: prostorno, uslijed nepokrivenosti cijele obasjane površine čipa fotoosjetljivim elementima, koja je uzrokovana konačnom veličinom piksela na čipu; te s obzirom na intenzitet, budući da odaziv optičkih elemenata nije u potpunosti linearan za kompletno područje intenziteta svjetla koje na njega upada. Matrična raspodjela piksela obično je fizički na čipu izvedena vertikalnim i horizontalnim rasporedom linija piksela s obzirom na vidno polje kamere, što nepovoljno utječe na digitalizaciju onih optičkih efekata koji imaju izražene neke karakteristike (npr. kontrastna linija) u tim istim smjerovima, jer je za očekivati da će pogreške digitalizacije linije biti minimalne ako promatrani linijski efekt stoji pod kutom od 45º u odnosu na linije matrice čipa. Snimljena slika smatra se planarnom, i obično se sprema u dvodimenzionalnu matricu svjetloće. Pretpostavlja se da su iznosi svjetloće pojedinog piksela digitalizirani koristeći geometrijski pravilnu planarnu matričnu strukturu piksela u kameri. Kod realnih izvedaba čipova, zbog pogrešaka u proizvodnji piksela može se desiti da linije piksela u kameri nisu paralelne. Također, cijela matrica piksela može odstupati od pretpostavljene ravnine. Dodatni problemi javljaju se i kod analize dvodimenzionalne slike iz CCD kamere, koja se kao jednodimenzionalni sinusoidalni signal vodi u digitalizator. Jedan od načina postupka pretvorbe slike u jednodimenzionalan signal provodi se slijednim čitanjem intenziteta u redcima piksela u čipu, tako da se uvijek čita (ispražnjava) najdonji red piksela u čipu. Kada je isti u potpunosti pročitan, redci iznad kopiranjem se spuštaju u najdonji red. Dok se provodi ova procedura, kamera ne smije digitalizirati sljedeću sliku jer bi došlo do superponiranja snimljenih slika. Ovo ne predstavlja poseban problem kod razmatranih metoda jer je scena primarno statička. U slučaju postojanja neispravnih piksela u čipu pri ovom postupku došlo bi do pogreške digitalizacije u svim pikselima u stupcu iznad njega. No, moderne kamere uvode i druge načine čitanja intenziteta kojima se minimalizira utjecaj neispravnih piksela. Nije rijetkost da se filtriranje slike provodi u samoj kameri prilikom spremanja u datoteku, te je preporuka koristiti kamere s potpuno manualnim modovima, sa svim ugašenim filterima. Paket TOM nakon digitalizacije slike markira pogrešno snimljene slike kao neispravne. Mogu se pojaviti dvije vrste neispravnih piksela, crni, koji ne reagiraju na intenzitet upadnog svjetla i uvijek kao rezultat daju crni intenzitet, i bijeli koji neovisno o intenzitetu upadnog svjetla uvijek pokazuju najveći intenzitet.

Detekcija crnih piksela je nešto lakša nego detekcija bijelih: dovoljno je snimiti nekoliko slika varirajući dužinu ekspozicije s potpuno zatamnjenim senzorom (s poklopcem na objektivu i eventualno zasjenjenom tražilicom kod SLR kamera). Od ovako snimljenih slika inverzijom se naprave negativi (u bilo kojem paketu za obradu slika koji neće automatski filtrirati pokvarene piksele) i pretraži se slika. Ispravno snimljeni pikseli imat će bijeli, najveći intenzitet, dok će se neispravni "bijeli" pikseli vidjeti kao crne točke. Crne piksele je nešto teže detektirati jer bi se identična procedura trebala provesti s preosvijetljenom slikom, a tada postoje utjecaji upadnog svjetla na preskakanje elektrona s piksela na piksel. Utjecaj pokvarenih piksela će u snimljenoj slici uvijek biti na istom mjestu i na taj način ih je jednostavno filtrirati. Kako tijekom vremena ne mijenjaju intenzitet, prilikom analize parcijalnih faznih slika lako ih je eliminirati jer će amplituda snimljenih faza biti jednaka ili blizu nuli. Digitalizator je potrebno sinkronizirati sa čitanjem redaka i stupaca u kameri [62], kako bi u pravom trenutku iz sinusoidalnog signala odredio svjetloću pojedinog piksela. Zbog velikog protoka informacija moguće su pogreške pri sinkronizaciji koje dovode do horizontalnog pomaka reda piksela u engleskoj terminologiji poznatog kao "*line jittering*". Ovi efekti mogu se donekle eliminirati korištenjem srednje vrijednosti više uzastopno snimljenih slika, što omogućava sustav za snimanje slike razmatranih sustava. Kod sustava s projiciranjem nekoherentnog svjetla, danas se najviše upotrebljavaju monokromatski čipovi. Komercijalno prevladavaju sustavi kod kojih boja projiciranog svjetla ne služi izravnom kodiranju mjerne informacije, te je dovoljno digitalizirati samo promjenu intenziteta. Neki sustavi koriste i dodatne fotoosjetljive senzore koji su u stanju digitalizirati i boju i teksturu površine, ali time ne doprinose točnosti uređaja, već mogućnost digitalizacije boje prvenstveno služi za digitalizaciju teksture površine, doprinoseći pritom ukupnom vizualnom dojmu rezultata. Za istu površinu čipa CCD detektori imati će veći broj fotoosjetljivih elemenata, budući da CMOS senzori očitavaju i pojačavaju naboj iz fotoćelija pomoću poluvodičkih elemenata smještenih na čipu odmah uz samu fotoćeliju. Istovremeno, CMOS čipovi su jeftiniji za proizvodnju jer se mogu proizvesti standardnom tehnologijom izrade čipova i imaju slabije izražene efekte konverzije u digitalni signal jer se digitalizacija intenziteta svakog piksela vrši lokalno. Kako su se ovi tipovi slikovnih digitalizacijskih uređaja u prvom redu razvili za potrebe zabavne elektronike, omogućavaju digitalizaciju prostorno i vremenski promjenljivog signala, koja je limitirana načinom (matrični, tj. linijski prijenos) i brzinom prijenosa informacija s elemenata slike. Razmatrani sustavi koriste po dvije identične kamere opremljene monokromatskim CCD čipom s 8-bitnom dubinom boje, a

sliku spremaju u komprimiranom TIFF formatu bez utjecaja na definiciju slike, kao kod, primjerice, JPEG formata.

Utjecaj optičkih elemenata. S obzirom na efekt promjene putanje zrake prilikom prolaska kroz neki optički sustav, razlikujemo više vrsta aberacija svjetlosne zrake (npr. sferna, kromatska, lateralna kromatska, "coma", astigmatizam, "*decentring"*, "field curvature", "curvilinear distortion" i sl.). U fotogrametriji se uobičajeno modelira efekt radijalne distorzije [63], te model distorzije uzrokovane fizičkom montažom leća u objektivu, koja uzrokuje pomak slikovne koordinate glavne točke snimke *H* iz središta objektiva (eng. *decentring distorsion*) [64]. Model objektiva obično u prvoj fazi modeliranja pretpostavlja da neka objektna mjerna točka, projekcijsko središte objektiva i slikovni osjet odabrane objektne mjerne točke leže na istom pravcu. Ovaj se linearni model naknadno proširuje opisivanjem utjecaja aberacija objektiva na položaj slikovnog osjeta u obliku dodatnih nelinearnih parametara, kao što je opisano u poglavlju 2. Kod objektiva s promjenjivim fokusom moguće je fino podešavanje relativnog položaja ravnine preslikavanja slike u odnosu na položaj fotoosjetljivog elementa, čime se podešava oštrina slike. Prema eksperimentima provedenim u [65], vršimo li mjerenje iste scene, iz istih položaja i pri istom osvjetljenju, ali za različite parametre fokusa, dolazi do prividnog pomaka položaja mjernih točaka u smislu promjene mjerila. Radi se o logičnoj posljedici promjene fokusa, međutim, minimalni efekt se ne nalazi u središtu objektiva, što navodi na pretpostavku da je došlo i do promjene u položaju glavne točke snimanja *H,* dok je efekt radijalne distorzije s promjenom fokusa ostao gotovo nepromijenjen. Modeli objektiva predstavljeni u poglavlju 2 bazirani su na modelu kamere koji ne uzima eksplicitno u obzir količinu svjetla koje upada na objektiv, te samim time niti utjecaj promjene veličine otvora blende ili duljine ekspozicije. Isti izvor navodi da se kod promjene otvora blende nije detektirao utjecaj na iznos žarišne duljine i položaja glavne točke snimanja, dok je amplituda pogreške bila deset puta manjeg reda nego kod promjene fokusa. Preporuka je provoditi mjerenje s upravo onom postavom objektiva kojom je provedena i kalibracija, dakle, uz fiksne unutrašnje parametre kalibracije. Oba razmatrana sustava bazirana su na istoj verziji biblioteke TOM, te su i distorzije slike zbog korištenog objektiva i položaj glavne točke snimanja svake od kamera modelirani identično.

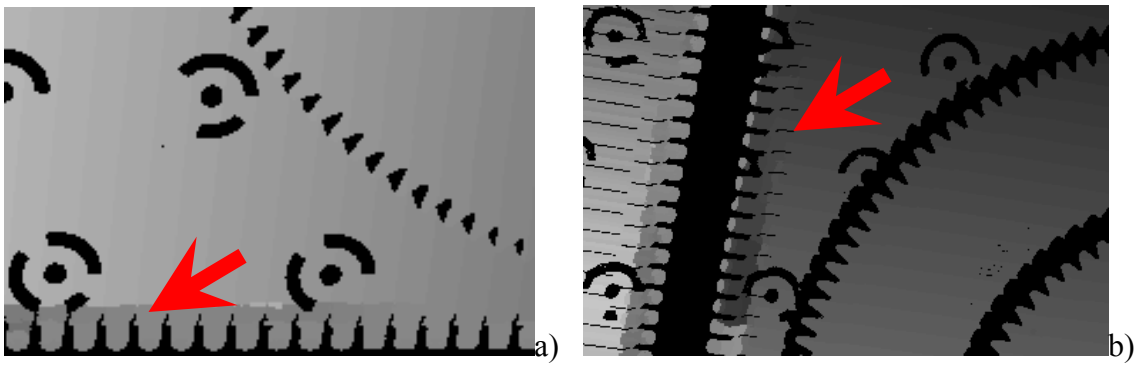
Utjecaj izvora svjetla. Projekcijske metode zahtijevaju jednoznačnu definiciju oblika mjerne točke na površini mjernog objekta uz korištenje prikladnih izvora svjetla, te je ovaj utjecaj potrebno promatrati u širem smislu i u vezi s materijalnim i geometrijskim svojstvima

površine, ali i s obzirom na utjecaj lokalnog toplinskog izvora unutar konstrukcije mjernog senzora i korištenih optičkih elemenata. Prilikom konstrukcije mjernog senzora potrebno je odabrati izvor odgovarajućeg intenziteta, kako bi se minimalizirali utjecaji promjene okolišnjeg osvjetljenja, ovisno o spektralnoj osjetljivosti čipa u korištenim kamerama i aberacijama koje uvode objektivi. Također, treba voditi računa o interakciji projiciranog svjetla s mjernim objektom. Izvor bi trebao u kratkom vremenu postići radnu temperaturu i omogućiti projekciju vremenski stabilne slike s obzirom na intenzitet i raspodjelu svjetloće. S obzirom na brzinu dosizanja stabilnog radnog područja, poželjno je da je neosjetljiv na intermitenciju paljenja i gašenja. Laserske zrake izrazito su prostorno i vremenski koherentne, prema [66] svi dijelovi projiciranog vala djeluju kao da su projicirani iz iste točke. Stoga ova vrsta svjetla može biti preciznije fokusirana i kontrolirana od nekoherentnog svjetlosnog snopa. U presjeku će projicirana zraka koherentnog svjetla imati izraženu Gaussovu raspodjelu svjetloće (zanemarimo li ovdje već spomenuti efekt zrnatosti), ali će se promjer cilindričnog snopa zrake mijenjati u ovisnosti o udaljenosti od izvora svjetla. Promjena promjera snopa nije linearna, te će na izvjesnoj udaljenosti od izvora postojati suženje. Stoga je potrebno tako odabrati valnu duljinu i promjer izvora koherentnog svjetla, da se položaj u kojem je projicirana zraka usko fokusirana poklapa s predmetnom udaljenošću mjernog objekta. Prema istom izvoru, laserske zrake koje su na izlazu iz izvora imale veći promjer, pokazat će manji efekt povećanja promjera u odnosu na udaljenost od izvora (eng. *drift error*), ali će za njihovo projiciranje biti potrebna veća snaga lasera. Korištenje laserskih zraka većeg promjera bilo bi i u suprotnosti sa zahtjevima prostorne rezolucije i mogućnostima mjerenja površinskih detalja čije su dimenzije manje od promjera projicirane laserske zrake. Nekoherentni izvori prilikom osvjetljavanja površine nemaju u toj mjeri izražen efekt zrnatosti, ali intenzitet projiciranog svjetla u smjeru optičke osi projektora opada brže ovisno o udaljenosti od mjernog objekta te kutu upada zrake, s obzirom na nekoherentne izvore. Stoga se sustavi s nekoherentnim izvorima svjetla obično koriste na manjim predmetnim udaljenostima od laserskih pa je nužno kontrolirati osvjetljenje mjerne prostorije (zbog širokog spektralnog raspona topli izvori svjetla pritom imaju prednost pred hladnim). Ukoliko je tijekom mjerenja došlo do značajne promjene u intenzitetu osvjetljenja [65], povećava se utjecaj kromatske aberacije i dovodi do prividnog pomicanja položaja mjerne točke. Efekt je radijalnog karaktera, najmanji u sredini slike te je prema istom izvoru izraženiji kod objektiva žarišnih duljina manjih od 10 mm, a ispoljava se kao prividna promjena udaljenosti (odn. promjena mjerila). Donekle ga je moguće kompenzirati promjenom žarišne duljine matematičkog modela. Utjecaji osvjetljenja eliminiraju se

korištenjem akromatskih objektiva, odnosno dodavanjem monokromatskog filtera. Zbog mogućnosti osvjetljavanja veće površine modela, pri korištenju nekoherentnih izvora svjetla moguće su pojave sekundarnih refleksija. Korišteni sustavi koriste halogeni izvor nekoherentnog svjetla, koji se radi smanjenja toplinskih utjecaja i produljenja vijeka trajanja lampe gasi nakon projekcije svake od serija uzoraka. Stakalce se zbog metalizacijom nanesenog rastera ne može jednoliko zagrijavati po cijeloj površini te je dodatno toplinski opterećeno intemitentnim paljenjem i gašenjem projektora.

Utjecaj pomičnih elemenata. Projekcijski sustavi u usporedbi s kontaktnim TMU-ima sastoje se od malenog broja gibljivih elemenata ili ih uopće nemaju. Ovdje se misli na one elemente konstrukcije koji mijenjaju svoj položaj samo tijekom procesa mjerenja, izuzimajući pomične dijelove koji su za vrijeme mjerenja fiksirani (npr. pomične dijelove objektiva ili eventualne mogućnosti promjene kuta i položaja kamera), ali koji nerijetko imaju izravan utjecaj na definiciju mjerne točke. Ovisnost optičkih senzora o potrebi nekog kontroliranog mehaničkog pomaka čini ih osjetljivim na pogreške uvjetovane netočnostima izrade mehaničkih elemenata, te pojavu vibracija i deformacija pomičnih elemenata. Kod projekcijskog sustava *Atos* na kojem su bazirani razmatrani sustavi, pomični element je stakalce smješteno unutar projektora na koje je elektrolitskim postupkom nanesena struktura koju se prolaskom svjetla projicira na mjerni objekt. Na osnovi diskusije principa projiciranja (poglavlje 2.), proizlazi da izravno o vremenski i prostorno kontroliranom pomaku stakalca s rasterskom strukturom vremenskog faznog pomaka i Gray koda ovisi točnost rješavanja problema jednoznačnosti. Tijekom cijelog procesa mjerenja važno je zadržati točnost i ponovljivost njegova pomaka. Linijska struktura je nanesena tako da je smjer nanesenih linija paralelan sa smjerom pomaka stakalca, te se utjecaj mehaničkih elemenata na točnost i ponovljivost projicirane strukture time djelomično umanjio, iako je i dalje vidljiv na rubovima slike. Slikom *4.13.* vertikalnih i horizontalnih faza strelicama je označen efekt nejednolikog vertikalnog pomaka stakalca gdje u slici apsolutnih faza dolazi do pojave karakteristične nazubljene linije. Osim zbog nejednolikog pomaka, ovaj efekt može nastati i zbog različitih duljina linija pojedinog metalizacijom nanesenog rastera. Tamna, gotovo vertikalna linija u slici horizontalnih faza (*slika 4.13.b*) je, zapravo, zasjenjeno područje između dva susjedna rastera na stakalcu. Problem u analizi slike nastaje zbog toga što je raster gabaritima prilagođen vertikalnom projiciranju pa se zakretom projektora u snimljenoj slici horizontalnih faza vidi, osim trenutno promatranog, dio prethodno projiciranog i dio sljedećeg rastera. Ta područja imaju pogrešno izračunate faze te ih je potrebno naknadno eliminirati iz analize. Kontrolu točnosti pomaka stakalca donekle je moguće testirati analizom projiciranih linija, jer će uslijed

pogreške u pomaku ili zatajenja uređaja, prostorno-vremenska raspodjela svjetloće odstupati od teoretski zadanog modela. Potrebno je primijetiti da kod ove izvedbe senzora mehanički sustav izravno ne određuje međusobni razmak i raspodjelu mjernih točaka u izmjerenom oblaku točaka, ali izravno utječe na točnost i ponovljivost mjerenja. Radi potpunosti, spomenimo da danas postoje i izvedbe projekcijskih skenera baziranih na nekoherentnom izvoru svjetla koje nemaju mehanički pomične dijelove, već se kontrolirana promjena projicirane svjetlosne strukture provodi korištenjem LCD sustava [11], te kod njih nema niti spomenutog utjecaja pomičnih elemenata.



Slika 4.13. Utjecaj pomaka stakalca u slici a) vertikalnih faza b) horizontalnih faza

4.2.2. Utjecaj načina definiranja mjerne točke i mjernog volumena

Proces definiranja mjerne točke je dinamička pojava čiji utjecaj nije dovoljno promatrati samo sa stajališta matematičkog modela. Projekcijski sustavi korišteni u ovom radu položaj mjerne točke određuju triangulacijom njenog položaja, relativno u odnosu na elemente mjernog sustava. Za rješavanje problema jednoznačnosti koriste kombinaciju vremenskog faznog pomaka i Gray koda. U širem smislu, pod utjecajem načina definiranja mjerne točke misli se na utjecaj geometrije mjernog sustava na projicirani položaj i oblik mjerne točke na površini mjernog objekta, dok se u užem smislu ovdje podrazumijeva matematička definicija temeljnih principa mjerne metode i utjecaja na točnost koji iz nje proizlaze.

Geometrija razmatranih sustava je identična, a sastoji se od dviju konvergentno postavljenih kamera između kojih je centralno pozicioniran projektor. Projektor je orijentiran tako da se projicirane linije približno poklapaju s matricom vertikalnih piksela u kamerama. Zbog

centralnog pozicioniranja projektora, utjecaj kuta između kamere i projektora na definiciju mjerne točke jednoliko se raspodjeljuje na svaku od kamera. Kako bi se pojednostavilo modeliranje geometrije sustava, kao i rješavanje problema jednoznačnosti, zahtjeva se da objektivi na kamerama, kao i same korištene kamere, budu identični. Parametri kamera odabiru se s obzirom na zahtjeve prostorne rezolucije, veličine trenutnog mjernog volumena i očekivane točnosti triangulacije, a podešavaju se tako da što veća površina snimljenih slika sadrži kompletan projicirani uzorak iz projektora. Žarišna duljina objektiva na projektoru ovisi o dimenzijama korištenog stakalca s rasterskim uzorkom i o njegovom položaju unutar samog projektora. Iz navedenog proizlazi da su oba razmatrana sustava u mogućnosti da za digitalizaciju zadane površine koriste identične vanjske i unutrašnje parametre kamera. Odabrana konvergentnost orijentacije, veličina trenutnog vidnog polja svake od kamera i međusobni razmak kamera definirat će očekivani iznos pogreške triangulacije [17]. Zbog konvergentne orijentacije kamera i lokalne geometrije modela, moguća je pojava zasjenjenih dijelova površine u snimljenoj slici. Oba sustava ispravno će odrediti objektne koordinate samo onih točaka na mjernom objektu koje su ispravno vidljive i kodirane u svakoj od kamera. Sličan je utjecaj geometrije modela i na projektor, gdje dolazi do zasjenjenja i višestrukih refleksija projiciranog svjetlosnog snopa, što utječe na kvalitetu, broj i raspodjelu točaka po volumenu [52,67]. U tom smislu potrebno je promatrati i interakciju projiciranog svjetlosnog snopa s površinom mjernog objekta, što je opisano u analizi vanjskih utjecajnih parametara, a utjecaj je identičan kod sustava druge i treće vrste. Sustav druge vrste kod standardne izvedbe *Atosa* ne dopušta međusobno približavanje ili udaljavanje kamera i projektora, ali kruta izvedba omogućava pomak kompletnog sustava bez potrebe za rekalibracijom sustava. U slučaju potrebe digitalizacije površine iz više pozicija, kruta izvedba je svakako prednost. Zbog potrebe rotacije projektora, kod prototipnog sustava treće vrste kamere i projektor pridržavaju se zasebnim stativima, što otežava pomak sustava kao krutog tijela i kod promjene relativne pozicije kamera zahtjeva ponavljanje postupka kalibracije. Ako se koristi nosač kamera koji omogućuje njihovo jednostavno relativno približavanje, te pomak para kamera kao krutog tijela, projektor ne mora nužno biti postavljen u sam centar između kamera i može stajati na zasebnom stativu. S ciljem smanjenja utjecaja direktne refleksije, tada bi ga se prema potrebi moglo približiti jednoj od kamera bez potrebe rekalibracije sustava, jer kod oba modela projektor ne ulazi u matematičke modele te ga nije ni potrebno kalibrirati. Pomakom projektora ne smije se drastično utjecati na vidljivost faznih uzoraka u nekoj od kamera pa je ovaj relativan pomak kod komercijalnih sustava najčešće onemogućen.

Način definicije mjerne točke glavna je značajka u kojoj se razlikuju sustavi druge i treće vrste. Projiciranje uzoraka vremenskog faznog pomaka i Gray koda u samo jednom smjeru kod sustava druge vrste uzrokuje pojavu dodatne nejednoznačnosti. Efekt se javlja po dužini svake od linija projiciranog uzorka jer se apsolutne faze ponavljaju duž njih. Ako je projekcija provedena u vertikalnom smjeru na neku kontinuiranu ravnu plohu, intenzitet u horizontalnim pikselima u svakoj od kamera imat će padajuću karakteristiku u desno, dok će se po visini ponavljati redci s istim ili sličnim iznosima faza. Eliminacija ovog dodatnog problema jednoznačnosti kod sustava druge vrste provodi se korištenjem metode epipolarne ravnine. Traženi stereopar piksela u referentnoj kameri nalazit će se uzduž traga kojeg u drugoj kameri definira epipolarna ravnina koja prolazi kroz odabrani piksel u referentnoj kameri i projekcijska središta objektiva obje kamere. Time je traženje stereopara iz dvodimenzionalnog prostora druge slike svedeno na jednodimenzionalno pretraživanje uzduž epipolarne linije koju tvori ovaj trag. Traženi stereopar odabrane točke u referentnoj kameri nalazi se na mjestu presjecišta epipolarne linije s vertikalnom linijom piksela, koja ima istu traženu fazu kao i odabrani piksel iz referentne slike. Pojednostavljenje ovog sustava bilo bi korištenje paralelne postave kamera koje bi se tako učvrstile na zajednički ravni nosač da bi došlo do poklapanja horizontalnih linija piksela u kamerama. Tada bi se epipolarne linije poklapale s horizontalnim pikselima u slici, ali zbog smanjenja preklopljenog vidnog polja i cijene izvedbe krutog okvira za potrebe pažljivog preklapanja ovakve izvedbe nisu poželjne. Sustav druge vrste koristi kruti nosač na koji su fiksirane kamere u konvergentnoj postavi, tako da se horizontalni redovi piksela samo približno poklapaju. Posljedica dodatnog problema jednoznačnosti je da stereoparovi pronađeni pomoću epipolarnog principa nisu u svakoj od kamera pronađeni nezavisno. Gubi se predefiniranost sustava u smislu triangulacije objektne mjerne točke jer je za traženje stereopara u drugoj kameri korištena informacija o položaju epipolarne linije, proizašla iz kalibracijom određene geometrije dviju kamera. Princip rješavanja problema jednoznačnosti uvjetuje da sustavi druge vrste modeliraju vezu između korištenih kamera pomoću principa epipolarne ravnine, dok ovakva vrsta modeliranja veze nije potrebna kod sustava treće vrste. Opisani nedostatak sustava druge vrste riješen je kod sustava treće vrste uvođenjem dodatne unakrsne projekcije identičnih uzoraka vremenskog faznog pomaka i Gray koda, kao kod sustava druge vrste. Dvosmjernim projiciranjem uvedena je apsolutna jednoznačnost kodiranja svake objektne točke (odnosno njenog slikovnog osjeta) zasebno, neovisno o susjednoj kameri. Svaki ispravno kodirani piksel u nekoj kameri sada sadrži informaciju o dvije faze: horizontalnu i vertikalnu. Da bi se odredio stereopar nekom pikselu iz referentne kamere, dovoljno je u drugoj kameri potražiti

piksel koji ima identične iznose horizontalne i vertikalne faze. Pretraživanje svakog stereopara potrebno je provesti u dvije slike po kameri, te se za eliminaciju utjecaja diskontinuiteta na pretraživanje uvodi sortiranje slike vertikalnih faza. Postupak pretraživanja kod sustava treće vrste traje duže od pretraživanja pomoću epipolarne linije. Zbog potrebe za pretraživanjem, unakrsno projiciranje u ovom obliku zapravo se ne može nazvati apsolutnom metodom jer se svaki piksel u kameri u ovom obliku ne može adresirati jednim jedinstvenim indeksom. Zbog dvostrukog kodiranja u fazi pretraživanja stereoparova ne postoji potreba za metodom epipolarne plohe, te stoga u ovoj fazi analize slike nije neophodno poznavati relativnu geometriju kamera. Primjenom dvostrukog kodiranja zadržana je predefiniranost sustava, pa se sada za svaki ispravno kodirani piksel u kameri mogu postaviti po dvije nezavisne jednadžbe 2.12, odnosno mogu se postaviti četiri jednadžbe po jednoj objektnoj točki.

Dosadašnja analiza temeljila se na samo jednoj projekciji mjerne točke, dok je prilikom ocjene utjecaja definicije mjerne točke potrebno uzeti u obzir i mogućnosti pojedinih projekcijskih skenera za digitalizaciju većeg broja mjernih točaka po pojedinom mjerenju, tj. njihovu sposobnost spajanja više odvojenih mjerenja u jedno [68]. Projekcijski sustav *Atos* za spajanje pojedinačnih mjerenja u zajednički oblak točaka koristi se referentnim fotogrametrijskim točkama fiksno vezanim za mjerni objekt ili njegovu okolinu. Kod sustava treće vrste ovaj način orijentacije je moguć, ali nije ugrađen u programsku podršku. Za orijentaciju trenutnog koordinatnog sustava koristi se pasivnim osjetima za pronalaženje prostornog položaja referentnih točaka. O točnosti pronalaska, rasporedu i gustoći referentnih točaka ovisit će mogućnost digitalizacije kompletnog mjernog volumena, kao i mogućnost pokrivanja detalja većim brojem preklapajućih mjerenja, povećavajući time potpunost definicije oblaka točaka.

4.2.3. Utjecaj kalibracije sustava

Utjecaj kalibracije sustava već je ranije spomenut kao vanjski utjecajni parametar, ali osim unutrašnjih parametara matematičkog modela, optičkim projekcijskim metodama koje su tema ovog rada zajedničko je da se procesom kalibracije izravno definira i područje trenutnog mjernog volumena, te time i prostorna rezolucija oblaka točaka, zbog konačnih dimenzija optičkih detektora. Kalibracija se provodi na objektima poznatog oblika i

geometrije, koji po svom obliku ne odgovaraju obliku mjernog objekta koji će se kasnije digitalizirati. Stoga, utjecaj geometrije mjernog objekta prilikom postave ovih uređaja u smislu utjecaja na kalibracijske parametre nije izražen kao što je to moguće prilikom ponavljajućih kontrolnih mjerenja kod kontaktnih TMU-a. Prilikom definiranja predmetne udaljenosti i vidnog polja, nužno se kalibracijom uzima u obzir i trenutna optička postava mjernog senzora, kao i neophodan intenzitet izvora svjetla, kako bi se mjerenje moglo uspješno provesti s obzirom na okolišne uvjete osvjetljenja. Obje verzije projekcijskog sustava kalibracijom određuju vanjske i unutrašnje parametre orijentacije kamera i distorzije leća objektiva, dok se relativna orijentacija projektora ne kalibrira.

Metode zasnovane na principima epipolarne geometrije (*Atos*), te njenom proširenju u obliku trifokalnog ili kvadrifokalnog tenzora, pretpostavljaju fiksnost parametara vanjske i unutrašnje orijentacije tijekom procesa mjerenja. Analiza položaja objektne mjerne točke izravno je potpomognuta poznavanjem relativne orijentacije kamera, što postupak čini numerički manje zahtjevnim od korištenja metode izjednačavanja zrakovnog snopa, koja optimizira sve parametre sustava. Međutim, kod sustava pretpostavljeno poznate geometrije, rezultat analize snimaka podložan je sustavnim pogreškama koje nastaju zbog poremećaja kalibracije uslijed promjene parametara orijentacije kamera. Za očekivati je da metoda izjednačavanja zrakovnog snopa (sustav treće vrste) zbog mogućnosti kompenzacije unutrašnjih i vanjskih parametara orijentacije kamera bolje modelira položaj objektne mjerne točke. Prednost dvofaznog postupka je u tome što se informacije o geometriji sustava dobivene kalibracijom planarnim kalibrom mogu korigirati tijekom provođenja samog mjerenja. Korekcija kalibracije provodi se metodom izjednačavanja zrakovnog snopa, korištenjem principa slobodne mreže nakon što su pronađeni stereoparovi. Površina modela pritom može biti planarna, ali to nije uvjet. Ukoliko je provedena pretkalibracija, tijekom mjerenja nije nužno snimati dodatne kalibracijske slike. Izostaje i potreba trianguliranja položaja objektnih točaka na temelju unaprijed poznate geometrije sustava, metodom epipolarne ravnine, jer se cijeli postupak određivanja kalibracijskih parametara sustava i samog mjerenja objektnih koordinata može provesti u jednom koraku, izravno metodom izjednačavanja zrakovnog snopa. To znači da su u jednadžbi 2.12 sada približno poznati svi parametri s desne strane znaka jednakosti. Kalibracijske točke sada nisu određene pasivno preko markera, već aktivnim dvostrukim projekcijskim postupkom, tako da su njihove slikovne koordinate određene neovisno o susjednom okolišu (ne koristi se objektni slikovni operator). Iz toga slijedi da se svaka mjerna točka na površini modela može identično planarnom kalibracijskom modelu iskoristiti kao kalibracijska točka. Prostorna raspodjela

kalibracijskih točaka više nije nužno planarna, već se poklapa s geometrijom mjernog objekta. U svrhu kalibracije mogu se koristiti sve kodirane točke na površini objekta, ili se radi ubrzavanja analize može reducirati njihov broj, uz zadržavanje adekvatne pokrivenosti kalibracijskim točkama kompletnog vidnog polja kamera. Mjerilo preslikavanja se opisanim postupkom ne korigira tijekom druge faze kalibracije, budući da je preneseno s poznate geometrije kalibracijskog objekta.

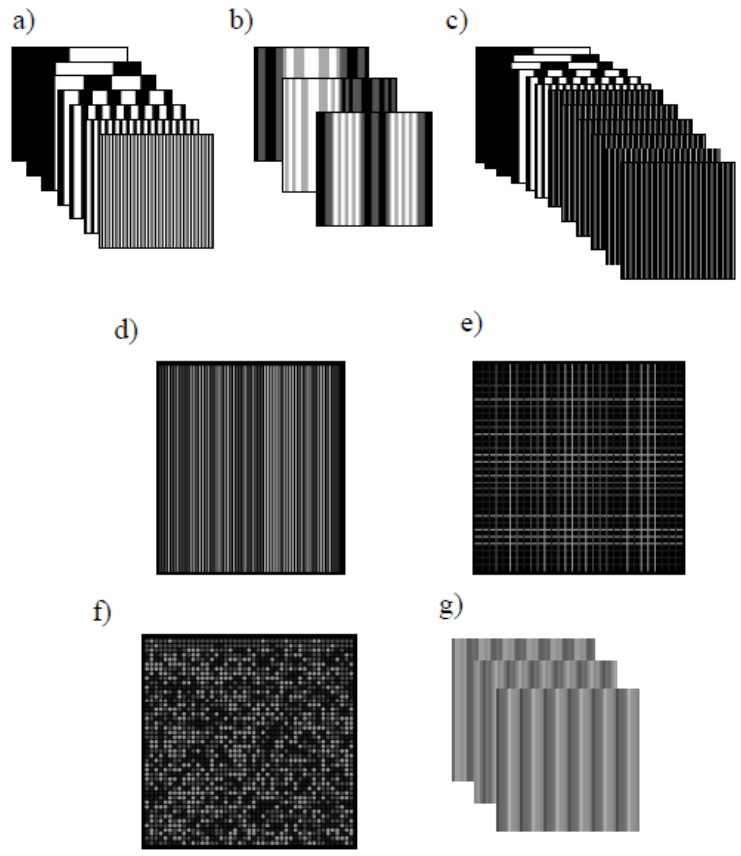
4.2.4. Utjecaj programske podrške

Ovaj je utjecaj također moguće promatrati s obzirom na njegov unutrašnji i vanjski karakter. Radi se, zapravo, o jedinom dijelu projekcijskih sustava koji se može u nerijetko potpuno automatiziranom procesu u potpunosti nadograditi ili izmijeniti, a koji sadrži kompletni matematički model i za krajnjeg korisnika predstavlja zapravo "crnu kutiju". Upravo ova netransparentnost u vidu eventualnih unošenja korekcija, zaglađivanja rezultata i sličnih dodatnih matematičkih operacija na sirovim rezultatima mjerenja, zahtijeva uvođenje virtualnih kontrolnih etalona, kao što je to već dugo vremena slučaj s programskim paketima kontaktnih TMU-a [49]. Problem koji se pritom javlja je - kako takav etalon definirati, budući da svaki sustav ima drugačiju definiciju mjerne točke, te kako ih međusobno usporediti zbog općenitosti prostornog karaktera ovih metoda. Sustav treće vrste za kalibraciju i triangulaciju koristi komercijalni paket *tritop,* za koji, prema autorovim saznanjima, ne postoji publiciran potpun matematički model korištene metode izjednačavanja zrakovnog snopa.

5. Rješavanje problema jednoznačnosti

U dosadašnjim razmatranjima, prilikom izlaganja temeljnih principa rekonstrukcije položaja neke objektne točke, pretpostavljalo se da jednoznačno poznajemo položaje slikovnih osjeta objektne mjerne točke (stereoparova) u svakoj od korištenih kamera, te da je scena koju promatramo statična. Promotrimo li na trenutak način na koji funkcionira ljudski vid, proizlazi da kod normalne zdrave osobe koja u potpunosti koristi funkcije oba oka mozak u naizgled realnom vremenu provodi rješavanje problema jednoznačnosti, kako za statičke, tako i za dinamičke scene. Pritom se prividno stvara efekt trodimenzionalnosti okolnog prostora. Prividno, zato što svako oko funkcionira analogno korištenim kamerama, te zapravo registrira dvodimenzionalnu projekciju okolnog prostora. Pravilnim spajanjem tih dviju slika mozak nam pokazuje trodimenzionalnu rekonstrukciju okolnog prostora. Gledamo li, primjerice, stol, mi intuitivno znamo da se radi o prostornoj konstrukciji, iako svako oko zapravo vidi samo dio njegove vanjske površine. Pritom čak nije nužno promatrati realnu konstrukciju, dovoljno je promatrati njenu dvodimenzionalnu fotografiju. Jednako tako, nije nužno promatrati istu scenu s oba oka, već se osjećaj prostornosti može postići i promatranjem samo jednim okom iz dvije međusobno malo pomaknute pozicije (npr. uslijed hodanja, zakretanja glave ili samo oka). Pri tome dolazi do promjene vanjskih parametara orijentacije ili mijenjanja unutrašnjih parametara oka promjenom fokusa. Dokaz da naš vid nije savršen vidljiv je u nelogičnim pogreškama pri rekonstrukciji scene, pri čemu kod statičkih scena doživljavamo optičke iluzije prostornosti slične onima kojima se u svojim umjetničkim slikama bavio M.C. Escher. Kod dinamičkih scena poznat je, primjerice, prividni efekt vrtnje kotača automobila u smjeru suprotnom od smjera vožnje. Osim osjećaja prostornosti okolnih objekata i mogućnosti njihovog jednostavnog prepoznavanja, čovjek ima razvijen i osjećaj za dimenzije, kao i za udaljenosti između objekata. Boja i tekstura površine pritom ne igraju presudnu ulogu za ostvarivanje osjećaja prostornosti. Mozak intuitivno radi na temelju pasivnih osjeta, dok sustavi koje ovdje analiziramo rješavaju

problem jednoznačnosti aktivno, projiciranjem nekog rasterskog svjetlosnog snopa. Od uvođenja LCD projektora, koji omogućavaju iznimno jednostavno testiranje projiciranog rasterskog snopa, razvijeno je mnogo metoda kodiranja svjetla (*slika 5.1.*), koje prema [69] možemo sistematizirati u tri kategorije: vremensko kodiranje (*slika 5.1. a, b, c*), objektno kodiranje (*slika 5.1. d, e ,f*) i direktno kodiranje svjetla (*slika 5.1. g*). Svim metodama je zajedničko dodjeljivanje jednoznačne numeričke vrijednosti (koda) jednom ili grupi piksela, na temelju koje se vrši identifikacija stereoparova u svakoj od snimljenih slika. Položaj i iznos ovog koda u snimljenoj slici ovisit će o vrsti projiciranog uzorka, ali i o načinu analize, npr. kodiranje nijansama sive, bojom ili projekcijom nekog poznatog geometrijskog uzorka. Slikovni osjet projiciranog uzorka je dvodimenzionalan, te je prilikom analize potrebno uzeti u obzir i minimalni broj piksela koji prenose mjernu informaciju, kao i utjecaj smjera analize slike na konačni rezultat.



Slika 5.1. Prikaz metoda rješavanja problema jednoznačnosti

5.1. Vremensko kodiranje

Vremensko kodiranje provodi se slijednim projiciranjem nekog svjetlosnog uzorka, koncipiranog tako da se analizom u vremenskoj domeni ostvari jednoznačno kodiranje svake objektne mjerne točke na površini objekta. To se postiže uzastopnom projekcijom svjetlosnih uzoraka, pomoću kojih se tijekom projiciranja kontrolirano mijenja svjetloća svake objektne mjerne točke. Time je omogućena analiza svake mjerne točke zasebno (misli se na analizu slikovnog osjeta mjerne točke u nekoj od korištenih kamera), što doprinosi robusnosti metode, jer se izbjegava propagacija pogreške iz susjednih piksela. Analizom svake od točaka zasebno postiže se visoka prostorna rezolucija, odnosno velika gustoća osjeta koji su neovisni jedan o drugome. Zato su ovi uzorci obično jednostavni - snop paralelnih linija. S obzirom na način kodiranja, mjerne informacije mogu se klasificirati kao:

- Kodiranje binarnim kodovima – metoda je bazirana na varijantama korištenja samo dva intenziteta svjetla, svijetlog (kod je 1) i tamnog (kod je 0). Prve varijante koristile su projekciju snopa paralelnih linija (*slika 5.1. a.*) koji je u svakoj slijedećoj projekciji bio slijedno zgušnjavan, tako da se broj linija u svakom sljedećem koraku udvostručio, sve dok projicirana linija nije bila jednaka širini koja odgovara vidnom polju jednog piksela, koju je kamera još mogla digitalizirati. Zbog unutrašnje mrežaste matrične konstrukcije fotoosjetljivog elementa kamere, ovako tanke linije ne mogu se uspješno digitalizirati (pojava aliasinga). Sve točke uzduž projiciranih linija nakon rekonstrukcije nosile su iste kodove, te se za potrebe triangulacije linija dodatno smatra binarnim objektom, čiji je položaj definiran traženjem težišta (što je neprikladno za iznimno tanke linije) ili traženjem ruba (bolja varijanta, ali osjetljiva na paralelnost matrica piksela s projiciranim uzorkom). Objektna analiza uvodi problem smjera analize slike, pa do izražaja dolazi utjecaj veličine lokalnog analiziranog područja na položaj projicirane linije. Principijelno slično udvostručavanju projiciranog snopa funkcionira metoda projekcije Gray koda, pri čemu je iznos uvećanja koraka koda jednak jedinici (eng. *Hamming distance*), a broj projekcija m potreban za ostvarivanje 2^m različitih kodova. Pokazalo se da objekti čija površina nema

ujednačena optička svojstva nisu prikladni za digitalizaciju binarnim metodama, jer se kod niskih intenziteta projiciranog svjetla u područjima niske refleksije smanjuje odnos signala i šuma, dok se kod visokih intenziteta projiciranog svjetla greške javljaju u područjima visoke refleksije. Ove je utjecaje donekle moguće minimizirati projekcijom pri različitim intenzitetima, kao i uzimanjem u obzir lokalne refleksnosti površine. Binarne metode prikladne su za digitalizaciju površina ujednačene refleksivnosti, ali je za rekonstrukciju površine potrebno projicirati relativno velik broj uzoraka.

Slika 5.2. Uzorak Gray koda

- N-ary kodovi (sufiks imena proizašao je iz proširenja binarnih kodova, eng. bin-*ary*) – uvode se s ciljem smanjenja potrebnog broja projekcija, te omogućuju da se sa n različitih projiciranih kodova i m projekcija ostvari n^m različitih kodova. Kodiranje se postiže variranjem intenziteta pojedinih linija projiciranog uzorka ili dodatnim kodiranjem Gray koda bojom. Projicirani raster sastoji se od snopa paralelnih linija koje se međusobno razlikuju po boji ili nijansama sive. Uvođenjem varijacija boja projiciranog uzorka postiže se smanjenje potrebnog broja projekcija jer se povećava kompleksnost rastera sa 2 boje (kod binarnih metoda) na n boja po projekciji. Projekcija boja zahtijeva dodatnu kolorimetrijsku kalibraciju. Analiza se provodi diskretno za svaki piksel zasebno, kao kod klasične metode binarnog Gray koda. Prednost ovog pristupa je u tome što je moguće modelirati i lokalna refleksijska svojstva površine, ali su N-ary metode osjetljive na nelinearnosti kamera i projektora.

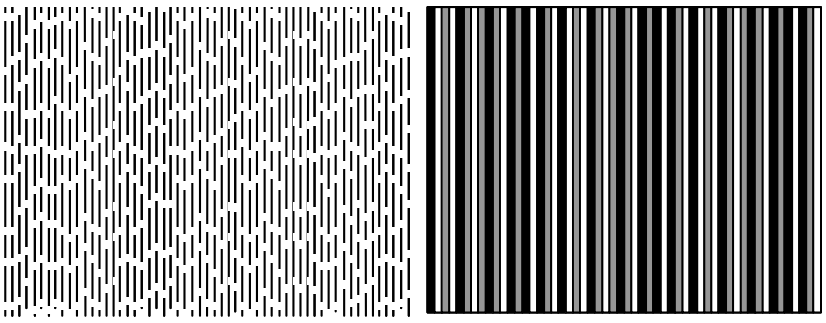
Slika 5.3. N-ary kodovi izvedeni na temelju Hilbertove krivulje drugog reda

- Kombinacija Gray koda i vremenskog faznog pomaka – umjesto slijednim zgušnjavanjem binarnog koda, metoda vremenskog faznog pomaka provodi se s jednim uzorkom sustavno pomicanim za četvrtinu perioda, kako bi se lokalno u svakom snimljenom pikselu ostvarila približno sinusoidalna raspodjela svjetloće. Time je svakom pikselu dodijeljena određena faza, koja se zbog paralelnog projiciranja velikog broja periodičkih uzoraka (64 svijetle, odnosno tamne linije kod *Atos*-a) ponavlja u smjeru pomaka uzorka. Kombiniranjem s metodom Gray koda ostvaruje se apsolutno kodiranje pojedinog piksela, ali se kao i kod ostalih vremenskih metoda identični kod ponavlja uzduž projiciranih linija vremenskog faznog pomaka, te nije ostvareno kodiranje svakog promatranog piksela zasebnim jedinstvenim kodom.
- Hibridne metode – koriste vremensko kodiranje neke projicirane rasterske strukture u sprezi s objektnim određivanjem lokalnih karakteristika strukture, te se ovdje spominju radi potpunosti.

Metode zasnovane na vremenskom modelu kodiranja svjetla najzastupljenije su u modernim projekcijskim digitalizatorima nekoherentnog svjetla. Prikladne su za digitalizaciju statičkih objekata proizvoljne geometrije, budući da algoritmi ne postavljaju ograničenja postavljanjem pretpostavki o lokalnoj topografiji površine. Nedostatak im je što projekcija velikog broja svjetlosnih uzoraka traje izvjesno vrijeme, te vremensko kodiranje nije prikladno za digitalizaciju dinamičkih scena.

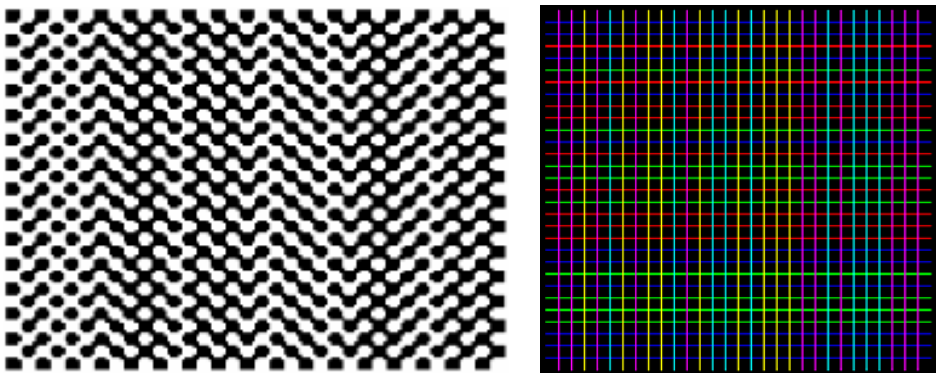
5.2. Objektno kodiranje

Vremenski model kodiranja pokazao je dobra svojstva pri digitalizaciji statičkih scena i nezavisnom kodiranju svakog pojedinog piksela, ali je zbog potrebe projiciranja velikog broja uzoraka neprikladan za digitalizaciju dinamičkih scena koje zahtijevaju veliku brzinu prikupljanja mjernih informacija. Objektno kodiranje mjerne informacije, temeljeno na projekciji jednog rasterskog uzorka sastavljenog od struktura unaprijed strogo definirane geometrije i raspodjele svjetloće, omogućuje i digitalizaciju dinamičkih scena. Projicirani uzorci mogu biti pseudonasumičnog ili strogo definiranog oblika. Rekonstrukcija mjerne informacije za neki piksel provodi se na temelju grupe njemu susjednih piksela, što je glavni nedostatak ovih metoda. Zbog objektnog pristupa analizi snimljene slike, javljaju se problemi zbog ovisnosti definicije lokalnog koda o okolišu projicirane mjerne točke (diskontinuiteti ili promjene refleksnosti ili boje površine) i smjeru provođenja analize. *Slikom 5.4.* prikazana su dva uzorka: prvi se sastoji od snopa paralelnih linija, gdje se lokalna površina kodira linijama različitih dužina, dok je drugi snop linija kodiran intenzitetom projicirane boje. Kodiranje duljine linija i njihovih intenziteta svjetloće provedeno je nasumično, a nastali su iskustveno te njihova definicija stoga ne zahtijeva poštivanje strogih matematičkih pravila. Analiza se provodi segmentacijom slike na manje regije i usporedbom snimljene slike s poznatim projiciranim uzorkom. O veličini segmentacijskog područja ovisit će ostvarena prostorna rezolucija, a izravno i iznos netočnosti određivanja položaja točke u prostoru.



Slika 5.4. Objektno kodiranje linijama poznate raspodjele i intenziteta

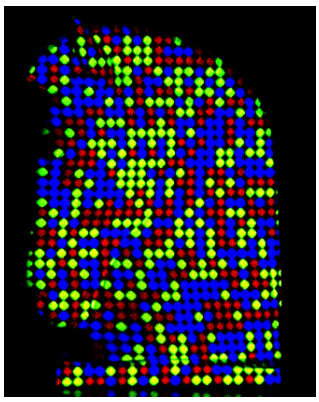
Slijedeća generacija prikazana je *slikama 5.5.*, *5.1. d)* i *e)*, kod kojih je svaki piksel kodiran prema unaprijed definiranom zakonu s osnovnim elementima unaprijed zadane geometrije, koji su odabrani tako da se isti uzorak ponavlja po površini slike samo jednom.



a) b)

Slika 5.5. DeBrujin uzorci, primjer objektnog kodiranja a) oblikom i b) bojom

Slika *5.6.* predstavlja primjer digitalizacije korištenjem M-array kodiranja, koje se slično DeBrujin načinu kodiranja temelji na ideji da se svaki projicirani kod u slici pojavi samo jedanput. Slika se promatra kao matrica čije su submatrice raspodijeljene tako da se smiju ponoviti samo jedanput, a sastoje se od nekog broja prethodno definiranih uzoraka. Pritom se ostvaruje ideal projekcijskih metoda o izravnom rješavanju problema jednoznačnosti, budući da svaki kod ima samo jednu apsolutnu poziciju u projiciranoj matrici svjetloće.



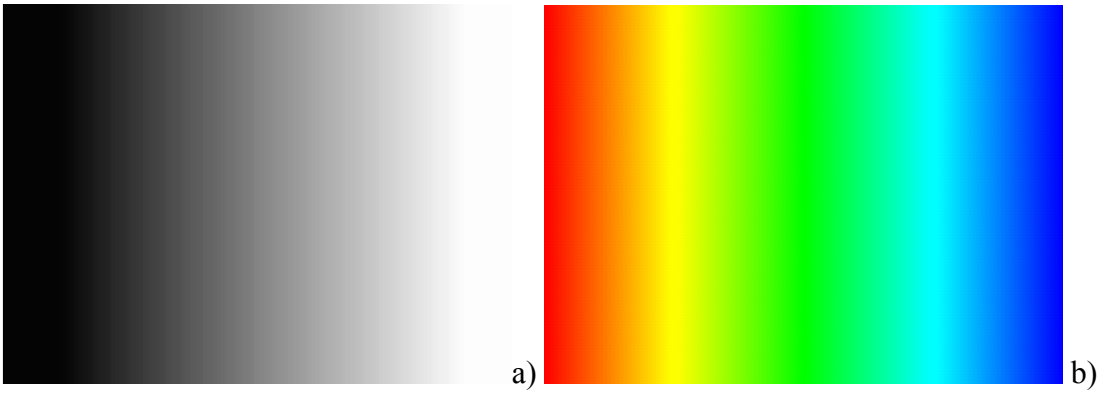
Slika 5.6. Objektno kodiranje bojom

Kodiranje se provodi bojom (*slika 5.1. f* i *5.6.*) ili projiciranjem specifičnih oblika, slično prethodnom primjeru prikazanom slikom *5.5*. Utjecaji šuma korigiraju se promjenom iznosa koraka koda ili smanjivanjem broja korištenih boja.

Prednosti objektnog kodiranja u odnosu na ostale metode su u izravnom rješavanju problema jednoznačnosti, dok je nedostatak u potrebi za analizom okoliša promatrane točke. Time dolazi do mogućnosti propagacije pogreške u smjeru provođenja analize, otežano je prepoznavanje u uvjetima postojanja šuma uzrokovanog svojstvima lokalne površine promatranog modela.

5.3. Direktno kodiranje

Metode vremenskog kodiranja zahtijevaju projekciju velikog broja rasterskih uzoraka i kompleksnu analizu snimljene slike, što ih čini neprikladnim za digitalizaciju dinamičkih scena Metode objektnog kodiranja pri analizi uzimaju u obzir i okoliš mjerne točke. Ovo je motiviralo razvoj metoda direktnog kodiranja položaja mjerne točke s težnjom za minimalizacijom broja potrebnih projekcija, te podjednostavljenje projiciranog rasterskog uzorka. Raster koji se projicira definiran je na takav način da se već na temelju samo jedne projekcije ostvari kodiranje svakog od piksela (npr. kod kodiranja bojom samo će jedan snimljeni piksel ili jedna linija piksela imati istu boju). Primjer rastera čija svjetloća linearno prelazi iz tamnog u svijetlo područje prikazan je *slikom 5.7*. Pritom se pretpostavlja da će projicirani uzorak poznate i kontrolirane distribucije nijansi nakon interakcije s površinom zadržati mjernu informaciju. Projiciramo li na neku površinu uzorak čije točke već imaju jednoznačno predefinirani kod, ostvaren je ideal projekcijskih metoda: uz minimalan broj projiciranja ostvarene su maksimalne mjerne informacije, te velika prostorna rezolucija.

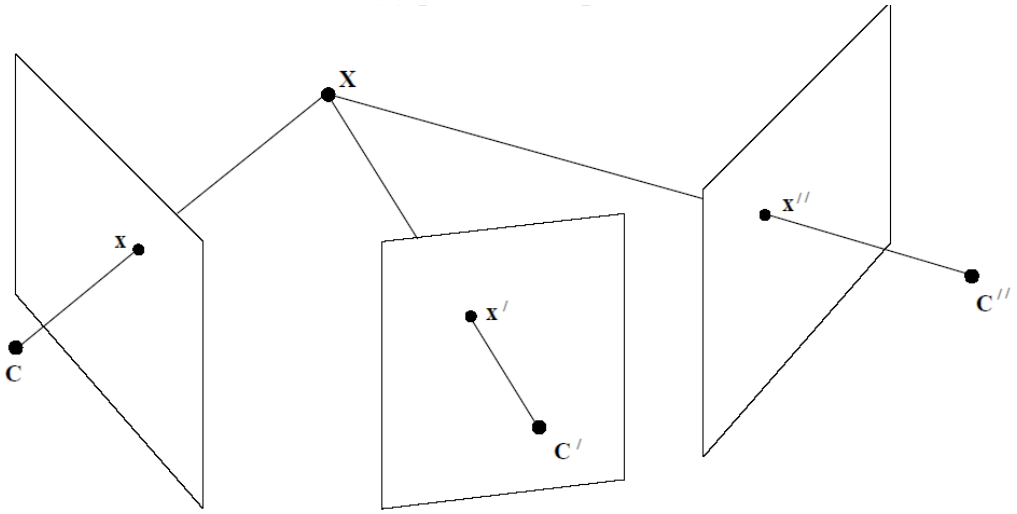


Slika 5.7. Direktno kodiranje a) intenzitetima sive i b) bojom

Opisanim modelom postavlja se na projektor zahtjev za projiciranjem jedinstvene valne duljine za svaki intenzitet sive (ili za svaku boju), te se uslijed jednostavne mogućnosti modeliranja projiciranog rastera kao najprikladniji nameću LCD projektori. Međutim, pokazalo se da LCD projektori zbog ograničene dubine boja nisu prikladni za direktna mjerenja. Jednoprojekcijske metode iznimno su osjetljive na nelinearnost projektora i kamera, te na promjenu okolišnjeg osvjetljenja, što dovodi do promjene definicije uzorka uslijed interakcije s lokalnom bojom površine promatranog mjernog objekta. Snimimo li istu scenu pod jednoličnim osvjetljenjem, identičnim intenzitetom kao kod projekcije linearnog rastera i oduzmemo li njihove iznose, postigli smo normalizacija i, donekle, eliminaciju utjecaja površine. Ipak, zbog visoke osjetljivosti na šum zbog objavljenih iznimnih netočnosti (1mm pa sve do 1cm), ove metode još nisu primjenjive u realne mjerne svrhe. Vršeni su i eksperimenti s projiciranjem različitih uzoraka boja, ali su ukazali na postojanje osjetljivosti metode na lokalnu boju i optička svojstva površine. Posljedica ovih eksperimenata je razumijevanje utjecaja velikog broja projiciranih nijansi na konačni rezultat mjerenja. Usporedimo li osjetljivost na šum i nelinearnosti projektora i kamera za kompletan spektralni raspon kod jednoprojekcijskih metoda s metodama vremenskog faznog pomaka, proizlazi da se kvalitetna rekonstrukcija površine postiže korištenjem što je moguće manjeg broja nijansi sive (ili boja), te primjenom neke od metoda vremenskog kodiranja.

6. Geometrija triju kamera

Poglavljem 2.3. na principu epipolarne ravnine prikazano je postojanje egzaktne veze između preslikavanja slikovnog osjeta kod konvergentne postave dviju kamera. Provedeni izvod je pokazao da epipolarna geometrija omogućuje preslikavanje točkastog slikovnog opažaja iz lijeve kamere u pravac u ravnini slike desne kamere. Time problem jednoznačnosti nije u potpunosti riješen, jer pripadajući stereopar u desnoj kameri nije egzaktno određen. Međutim, problem pronalaženja stereopara je iz planarnog problema traženja po kompletnoj površini slike sveden na jednodimenzijski problem traženja po pravcu. Cilj ovog rada je povećanje robusnosti, točnosti i povećanje mjerne rezolucije korištenjem više od dviju kamera, te će se u ovom koraku istražiti mogućnosti dodavanja dodatne [23,70,71,72], treće kamere, kao što je ilustrirano *slikom 6.1*.

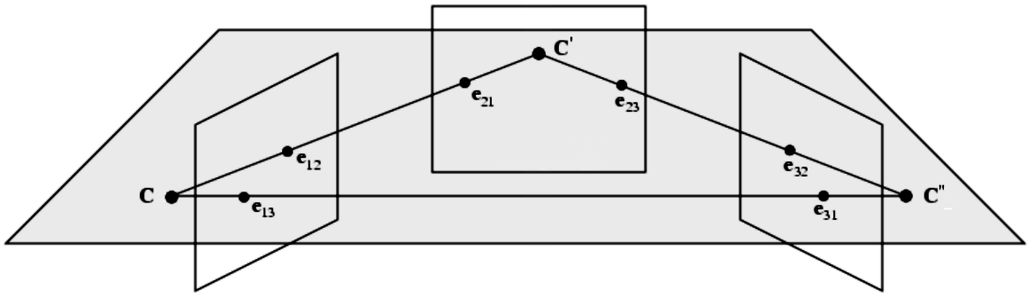


Slika 6.1. konvergentna postava triju kamera

Prema *slici 6.1.*, sva tri projekcijska središta leže u istoj ravnini, koja na nekom mjestu siječe svaku od ravnina slike (*slika 6.2.*). Zbog potrebe pojednostavnjenja problema jednoznačnosti pri korištenju dviju kamera definirana je epipolarna ravnina, dok je kod opisane postave ova ravnina u litaraturi poznata kao trifokalna ravnina (eng. *Trifocal*

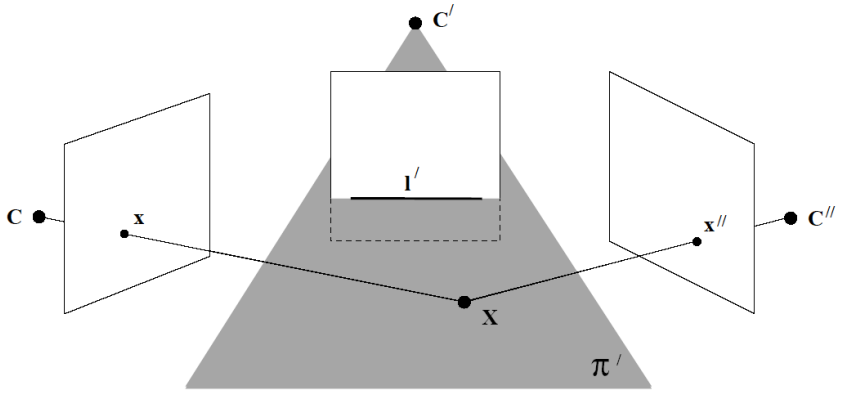
plane). Logično, slijedi da je za svaki od parova kamera trifokalna ravnina zapravo epipolarna ravnina. Presjek trifokalne ravnine s ravninama slike definira trifokalnu liniju u svakoj od kamera te svaka ravnina slike sadrži dva epipola e (točke u kojima je preslikano projekcijsko središte preostalih kamera).

Pretpostavimo li da je poznata relativna orijentacija kamera, točka iz prve kamere po principu epipolarne ravnine preslikat će se u pravac u svakoj od preostalih kamera. Poznajemo li, međutim, slikovne koordinate mjerne točke u dvjema kamerama, problem određivanja slikovnog osjeta u trećoj kameri svodi se na traženje presjecišta pravaca dobivenih korištenjem epipolarnog principa za svaki od parova kamera.



Slika 6.2. Trifokalna ravnina

Ukoliko se analizira neka struktura koja leži na trifokalnoj ravnini, koristimo li metodu epipolarne ravnine korištenjem preslikavanja uz poznatu fundamentalnu matricu, projekcije svake od točaka u preostale kamere bit će kolinearni pravci, što je nedostatak primjene epipolarnog pristupa na probleme s tri kamere, (*slika 6.3.*).



Slika 6.3. Nedostaci epipolarnog pristupa

Postavimo li za pretpostavljeni slučaj poznate kalibracije vezu između parova kamera u obliku:

$$\mathbf{p}_1^{\,T}\mathbf{E}_{12}\mathbf{p}_2 = 0$$
$$\mathbf{p}_2^{\,T}\mathbf{E}_{23}\mathbf{p}_3 = 0$$
$$\mathbf{p}_3^{\,T}\mathbf{E}_{31}\mathbf{p}_1 = 0 \qquad (6.1)$$

te uzimajući u obzir da je $\mathbf{E} = [\mathbf{t}]_x\mathbf{R}$ iz uvjeta koplanarnosti proizvoljno orijentiranih kamera prema *slici 11*:

$$\mathbf{e}_{23}^{\mathsf{T}}\mathbf{F}_{21}\mathbf{e}_{13} = \mathbf{e}_{31}^{\mathsf{T}}\mathbf{F}_{32}\mathbf{e}_{21} = \mathbf{e}_{32}^{\mathsf{T}}\mathbf{F}_{31}\mathbf{e}_{12} = \boldsymbol{0} \qquad (6.2)$$

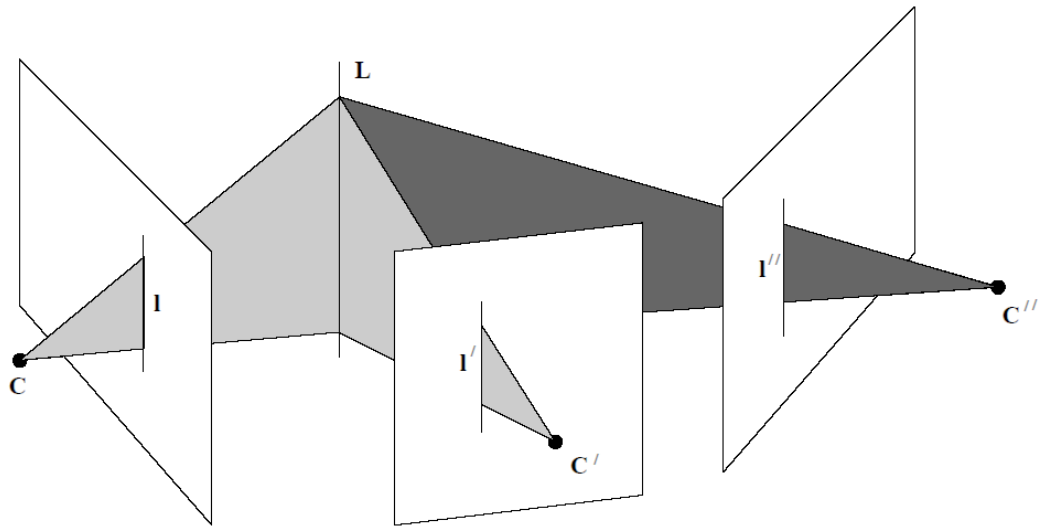
proizlazi da je pri korištenju triju kamera moguće eliminirati jednu od esencijalnih matrica (odn. jednu fundamentalnu matricu), budući da ju je moguće dovesti u vezu s preostale dvije. Prethodna jednadžba predstavlja uvjet kompatibilnosti fundamentalnih matrica. Da bi ovaj uvjet bio moguć, potrebno je da sve esencijalne matrice imaju jednako relativno mjerilo:

$$\mathbf{E}_{12} = \lambda_{12}[\mathbf{t}_{12}]_x\mathbf{R}_{12}$$
$$\mathbf{E}_{23} = \lambda_{23}[\mathbf{t}_{23}]_x\mathbf{R}_{23}$$
$$\mathbf{E}_{31} = \lambda_{31}[\mathbf{t}_{31}]_x\mathbf{R}_{31}\ . \qquad (6.3)$$

Uzmemo li jedinično mjerilo za λ_{12}, vezu možemo zapisati, primjerice, za $\mathbf{E}_{13}$:

$$\mathbf{E}_{13} = [\mathbf{t}_{12} + \lambda_{23}\mathbf{t}_{23}]_x\mathbf{R}_{12}\lambda_{23}\mathbf{R}_{23}\,. \qquad (6.4)$$

Fundamentalnu matricu koristimo za preslikavanje točaka kod korištenja dvije kamere, dok je trifokalni tenzor pandan fundamentalne matrice u slučaju korištenja sustava s tri kamere. On sadrži geometrijsku vezu između tri nezavisna pogleda, neovisno o strukturi promatranog mjernog objekta.



Slika 6.4. Uz definiciju trifokalnog tenzora

Snimamo li prostornu liniju L konvergentnom postavom triju kamera čija se projekcijska središta nalaze u točkama C, C' i C'', svaka od snimljenih slika sadržavat će slikovni osjet linije, definiran prema *slici 6.4.*, sa l, l', l''. Projiciramo li unatrag iz svake od kamera ravninu definiranu položajem njenog projekcijskog središta i slikovnim osjetom linije, tri ravnine sijeku se u prostoru upravo u traženoj liniji L. Definirat ćemo matrice kamera u blok obliku: $\mathbf{P} = [\mathbf{I} \mid 0]$ za prvu, te slijedom $\mathbf{P}' = [\mathbf{A} \mid \mathbf{a}_4]$ i $\mathbf{P}'' = [\mathbf{B} \mid \mathbf{b}_4]$, gdje su $\mathbf{a}_4$ i $\mathbf{b}_4$ epipolovi projekcijskog središta prve kamere u drugoj i trećoj kameri. Spomenute projekcije linija u prostor definiraju redom ravnine:

$$\boldsymbol{\pi} = \mathbf{P}^{\mathsf{T}}\mathbf{l} = \begin{pmatrix} \mathbf{l} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\pi}' = \mathbf{P}'^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' \\ \mathbf{a}_4^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' \end{pmatrix} \text{ i } \boldsymbol{\pi}'' = \mathbf{P}''^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'' = \begin{pmatrix} \mathbf{B}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'' \\ \mathbf{b}_4^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'' \end{pmatrix}. \tag{6.5}$$

Budući da se ove tri ravnine sijeku upravo u istom pravcu, proizlazi da ne mogu biti međusobno nezavisne, te se uvodi 4x3 matrica $\mathbf{M} = [\boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\pi}', \boldsymbol{\pi}'']$, ranka 2. Za sve točke presjeka ravnina na pravcu vrijedi

$$\boldsymbol{\pi}^{\mathsf{T}}\mathbf{X} = \boldsymbol{\pi}'^{\mathsf{T}}\mathbf{X} = \boldsymbol{\pi}''^{\mathsf{T}}\mathbf{X} = 0, \tag{6.6}$$

odnosno,

$$\mathbf{M}^{\mathsf{T}}\mathbf{X} = 0. \tag{6.7}$$

U raspisanom obliku matrica **M**: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{A}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' & \mathbf{B}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'' \\ 0 & \mathbf{a}_4^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' & \mathbf{b}_4^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'' \end{bmatrix}$. (6.8)

Slijedi veza između slikovnih linija **l**, **l'**, **l''** , u obliku

$$\mathbf{l} = (\mathbf{b}_4^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'')\mathbf{A}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' - (\mathbf{a}_4^{\mathsf{T}}\mathbf{l}')\mathbf{B}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'' = (\mathbf{l}''^{\mathsf{T}}\mathbf{b}_4)\mathbf{A}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}' - (\mathbf{l}'^{\mathsf{T}}\mathbf{a}_4)\mathbf{B}^{\mathsf{T}}\mathbf{l}'', \quad (6.9)$$

a za neku točku linije l_i:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{l}''^{\mathsf{T}}\left(\mathbf{b}_4\mathbf{a}_i^{\mathsf{T}}\right)\mathbf{l}' - \mathbf{l}'^{\mathsf{T}}\left(\mathbf{a}_4\mathbf{b}_i^{\mathsf{T}}\right)\mathbf{l}'' = \mathbf{l}'^{\mathsf{T}}\left(\mathbf{a}_i\mathbf{b}_4^{\mathsf{T}}\right)\mathbf{l}'' - \mathbf{l}'^{T}\left(\mathbf{a}_4\mathbf{b}_i^{\mathsf{T}}\right)\mathbf{l}'' \quad (6.10)$$

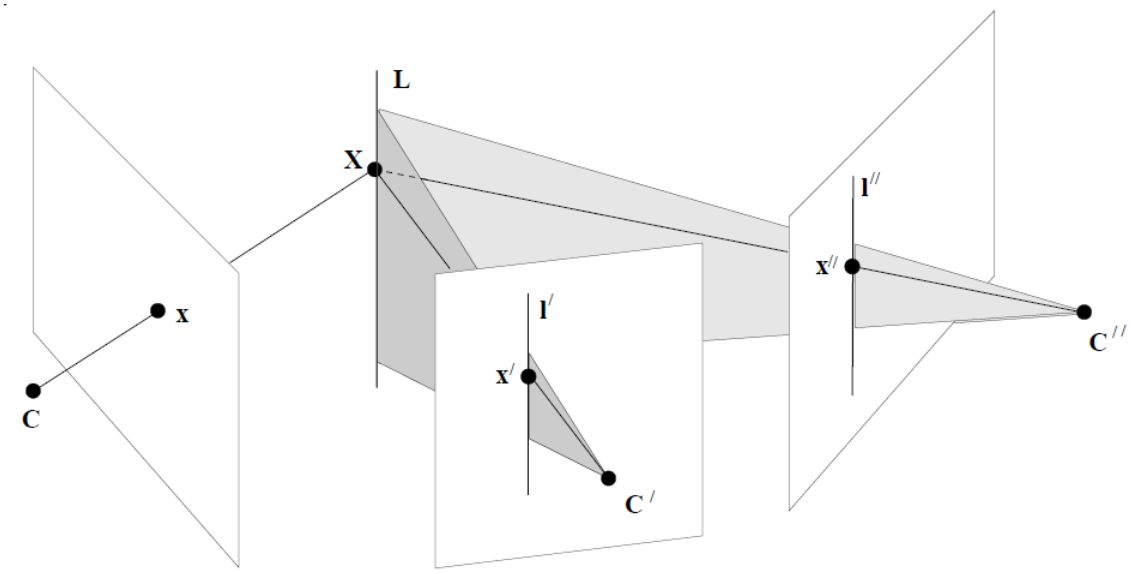
Uz $\mathbf{T}_i = \mathbf{a}_i\mathbf{b}_4^{\mathsf{T}} - \mathbf{a}_4\mathbf{b}_i^{\mathsf{T}}$, prethodna jednadžba prelazi u konačni oblik veze među trima pravcima:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{l}'^{\mathsf{T}}\mathbf{T}_i\mathbf{l}'' \quad (6.11)$$

, a raspisano:

$\mathbf{l}^{\mathsf{T}} = \mathbf{l}'^{\mathsf{T}}[\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3]\mathbf{l}''$, odnosno $\left(\mathbf{l}'^{\mathsf{T}}[\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3]\mathbf{l}''\right)[\mathbf{l}]_x = 0$. (6.12)

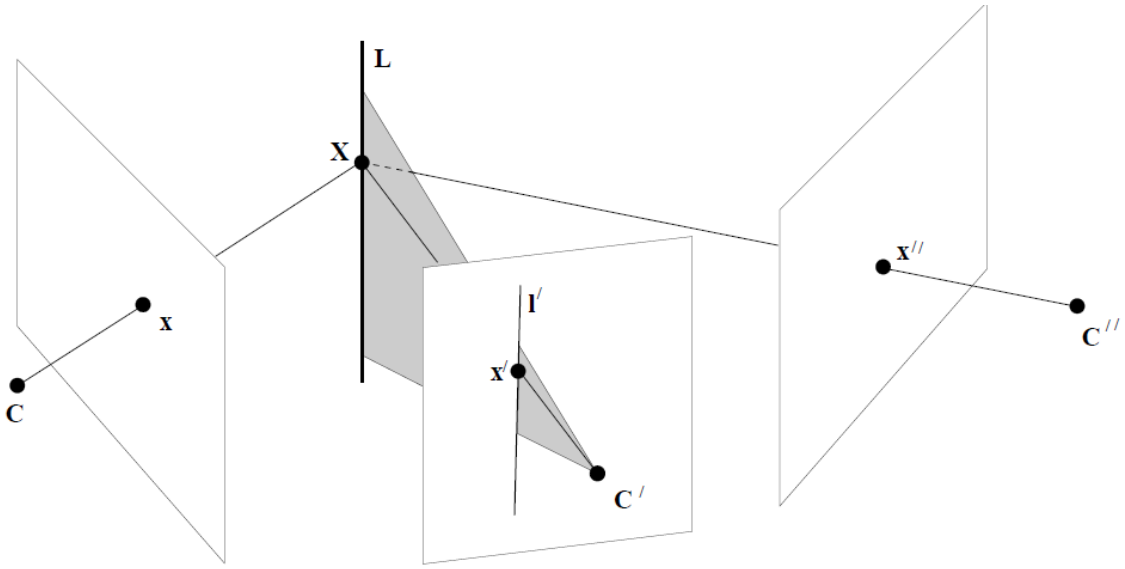
Proizlazi da se trifokalni tenzor $\mathbf{T}_i$ sastoji od tri matrice s po 3x3 elementa. Sastoji se sveukupno od 27 elemenata, od kojih je njih 18 međusobno nezavisno uslijed dodatnih nelinearnih uvjeta.



Slika 6.5. Točka-linija-linija

U slučaju da je poznata točka **x** u jednoj kameri i dvije linije u preostalim kamerama (*slika 6.5.*), veza glasi:

$$\mathbf{l}'^{\mathsf{T}}\left(\sum_i \mathbf{x}^i\mathbf{T}_i\right)\mathbf{l}'' = 0\,. \tag{6.13}$$



Slika 6.6. Točka-linija-točka

Za kombinaciju *točka-linija-točka (slika 6.6.)*, veza preko trifokalnog tenzora glasi

$$\mathbf{l}'^{\mathsf{T}}\left(\sum_i \mathbf{x}^i\mathbf{T}_i\right)[\mathbf{x}'']_{\mathrm{x}} = 0\,. \tag{6.14}$$

Veza za kombinaciju *točka-točka-linija* glasi:

$$[\mathbf{x}']_{\mathrm{x}}\left(\sum_i \mathbf{x}^i\mathbf{T}_i\right) = 0\,, \tag{6.15}$$

dok je veza između triju slikovnih osjeta točke u svakoj od tri kamere (*slika 6.1.*) predstavljena izrazom

$$[\mathbf{x}']_{\mathrm{x}}\left(\sum_i \mathbf{x}^i\mathbf{T}_i\right)[\mathbf{x}'']_{\mathrm{x}} = 0\,. \tag{6.16}$$

Iz poznatog trifokalnog tenzora neke konfiguracije kamera moguće je odrediti pripadajuće fundamentalne matrice. Tako, primjerice, za vezu između prve dvije kamere

fundamentalna matrica glasi $\mathbf{F}_{21} = [\mathbf{e}']_x[\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3]\mathbf{e}''$, dok se matrica druge kamere uz proizvoljno odabranu prvu $\mathbf{P} = [\mathbf{I} \mid 0]$ izvodi prema $\mathbf{P}' = [[\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3]\mathbf{e}'' \mid \mathbf{e}']$. Matricu treće kamere ne možemo provesti analogno drugoj, budući da pojedini parovi kamera ne moraju nužno biti definirani u istom globalnom koordinatnom sustavu te se ona izvodi iz trifokalnog tenzora.

Ako je poznat dovoljan broj stereoparova, trifokalni tenzor može se odrediti metodom najmanjih kvadrata, analogno fundamentalnoj matrici [73,74,75,76].

7. Geometrija četiriju kamera

Do sada je pokazano da se primjenom principa epipolarne geometrije samo na temelju poznavanja relativne geometrije dviju kamera može preslikati slikovni osjet jedne točke iz prve kamere u pravac u drugoj kameri. Time problem jednoznačnosti biva sveden na jednodimenzijski problem. Uvođenjem dodatne, treće kamere i proširenjem principa epipolarne geometrije, te uvođenjem trifokalnog tenzora, omogućeno je preslikavanje točke iz prve kamere u pravac u svakoj od preostalih kamera. Također je pokazana mogućnost preslikavanja kombinacija *točka-točka-pravac,* te *točka-pravac-točka*.

Trifokalni tenzor izveden je na temelju pretpostavke da će se ravnine nastale projekcijom ploha, definiranih pravcima l ,l' i l", iz svake od kamera u prostoru sjeći upravo u pravcu L, čiju geometriju određujemo (*slika 6.4*.). Izvod tenzora veze između četiriju kamera temelji se na proširenju principa trifokalnog tenzora dodavanjem dodatne kamere. Prema *slikama 6.4*. i *6.5*., ako ravnina koja prolazi slikovnim osjetom x prostorne točke X, zajedno s preostale dvije ravnine definirane pravcima l' i l" projicirane iz druge i treće kamere prolazi točkom X, tada će i sve ravnine koje su nastale projekcijom proizvoljnih linija, kojima je zajedničko da prolaze tom istom točkom x u prvoj kameri također prolaziti prostornom točkom X. Projicirane ravnine sadrže projekcijska središta svake od kamera, slikovne koordinate točke ili linije, te prolaze prostornom točkom X. Odaberemo li sada u jednoj od triju kamera dvije proizvoljne linije l_1 i l_2 tako da obje prolaze slikovnom točkom x, na temelju prethodne pretpostavke možemo zamisliti da u ovoj zamišljenoj konfiguraciji neće doći do nikakve promjene ako uvedemo i četvrtu kameru. Četvrta kamera trebala bi biti orijentirana tako da sadrži jedan od zamišljenih pravaca koji svojom projekcijom stvara ravninu koja prolazi kroz prostornu točku X. Time je, zapravo, projekcijsko središte odabrane kamere razdvojeno u dva C' i C", *slika 7.1*., čineći time dodatnu, četvrtu kameru. U ovoj novoj konfiguraciji, ravnine projicirane iz preostale dvije kamere C' i C", definirane pravcima l' i l" i dalje se sijeku s ravninom

projiciranom iz kamere C'''', definiranom pravcem $l_{2,}$ u istom prostornom pravcu L na kojem leži prostorna točka X. Opisani uvjet razdvajanja kamera, tj. uvođenja četvrte kamere, opisuje se kvadrifokalnim tenzorom [23,70] (eng. *Quadrifocal tensor*), na temelju zahtjeva da slikovni osjet točke X u četvrtoj kameri leži upravo na novouvedenom pravcu $l_{1,}$ što je zadovoljeno u slučaju kada vrijedi:

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l=1}^{3} Q^{ijkl} u_i u'_j u''_k u'''_l = 0\,, \tag{7.1}$$

gdje su

$l^i = \left(u_1^i, u_2^i, u_3^i\right)^T$ homogene koordinate linija l^i $0 \le i \le 3$.

Uvedemo li

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\rho'_e}\mathbf{K}'\mathbf{R}'^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}\,, \tag{7.2}$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{\rho''_e}\mathbf{K}''\mathbf{R}''^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1} \text{ i} \tag{7.3}$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\rho'''_e}\mathbf{K}'''\mathbf{R}'''^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}\,, \tag{7.4}$$

kvadrifokalni tenzor možemo zapisati u obliku:

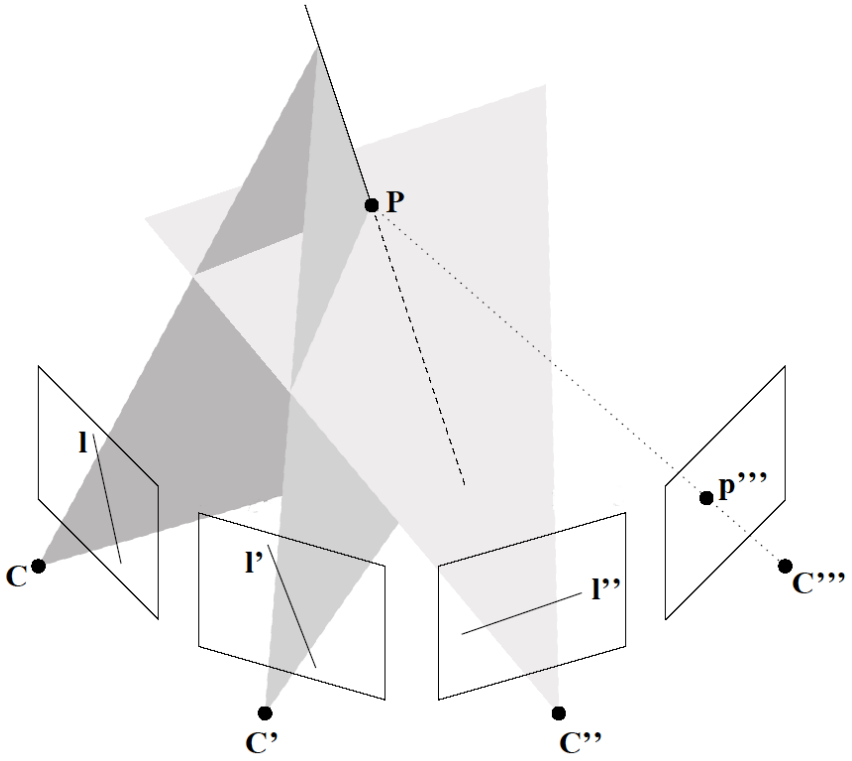
$$Q^{ijkl} = \det\begin{pmatrix} \delta_{i1} & \delta_{i2} & \delta_{i3} & 0 \\ a_{j1} & a_{j2} & a_{j3} & \left(e'\right)_j \\ b_{k1} & b_{k2} & b_{k3} & \left(e''\right)_k \\ c_{l1} & c_{l2} & c_{l3} & \left(e'''\right)_l \end{pmatrix} \text{ za } 0 \le i,j,k,l \le 3\,, \tag{7.5}$$

gdje δ_{ij} predstavlja Kroneckerov simbol, a elementi a_{ij}, b_{ij} i c_{ij} odnose se na elemente matrica **A**, **B** i **C**.

Na primjeru određivanja slikovnog osjeta točke P u četvrtoj kameri, prema *slici 6.7.*, za poznate slikovne osjete prostornog pravca na kojem ona leži, veza preko kvadrifokalnog tenzora glasi $\tau''' p''' = \left[l^T\left[Q^{(kl)}\right]l'\right]^T l''$, gdje je τ''' skalarni faktor. Kao što je to napravljeno kod trifokalnog tenora u prethodnom poglavlju, moguće je izvesti formulaciju kvadrifokalnog tenzora za svaku od mogućih konfiguracija slikovnih osjeta točaka i linija

u četiri kamere, što zbog velikog broja mogućih slučajeva ovdje neće biti učinjeno te se čitatelj upućuje na literaturu [77,78,79,80,81,82].

Kvadrifokalni tenzor Q^{ijkl} ima $3^4 = 81$ članova, od čega ih je samo 16 međusobno nezavisnih, te tenzor ima 29 stupnjeva slobode. Upravo zbog predefiniranosti ovog modela (81 parametar naspram 29 potrebnih), rješavanje ovog sustava jednadžbi može biti nestabilno bez dovođenja dodatnih uvjeta, npr. redukcijom tenzora (prema [80,82]). Kako bi se odredili svi elementi kvadrifokalnog tenzora, potrebno je jednoznačno poznavati slikovne osjete minimalno šest objektnih točaka. Za slučaj poznavanja šest ili više parova točaka, problem prelazi u linearno područje te ga je moguće riješiti primjenom metode najmanjih kvadrata.



Slika 7.1. Primjer definicije točke u kameri C''' *preko presjecišta tri ravnine*

8. Sustav s više kamera

Razvoj projekcijskih sustava za beskontaktnu digitalizaciju oblika, započet osamdesetih godina prošlog stoljeća, motiviran je ostvarivanjem što većeg broja mjernih opažaja uz minimalizaciju vremena potrebnog za provođenje mjerenja. Usporedo s tim razvojem, uz sve veće prihvaćanje novih digitalizacijskih tehnologija od strane privrede, rastu i zahtjevi koji se pred njih postavljaju. Mjerni zadaci nerijetko nisu u potpunosti definirani projektnom dokumentacijom, budući da se ovi sustavi mogu jednako uspješno primijeniti i za kontrolu kvalitete poznatog i za određivanje oblika potpuno unikatnog objekta. Općenitije, radi se o potrebi digitalizacije reljefnih površina s visokom prostornom i mjernom rezolucijom u što kraćem vremenskom periodu uz očekivanu netočnost, uz istovremeno postojanje lokalnih površinskih zaobljenja ili diskontinuiteta. Na temelju analize geometrijskih ovisnosti pojedinih elemenata sustava razvijane su analitičke metode koje omogućuju optimalno korištenje dostupnih računalnih resursa, što je opisano u prethodnim poglavljima. Zanimljivo je da su (prema autorovim saznanjima) i današnji komercijalno dobavljivi sustavi još uvijek bazirani upravo na principima prve i druge vrste. U prilog tome zasigurno ide i nagli razvoj kamera kojima se rezolucija svakodnevno povećava, dok cijena po pikselu pada, omogućavajući tako povećanje broja mjernih opažaja, odnosno povećanje prostorne rezolucije mjerenja na vrlo jeftin način. Kruta konstrukcija bez predviđene mogućnosti dodavanja dodatnih kamera zajednička je današnjim komercijalnim sustavima prve i druge vrste. Iako prevladavaju sustavi s jednom i dvije kamere, na tržištu postoje i sustavi s više kamera koji interno funkcioniraju kao sustavi prve ili druge vrste. Komercijalni razlozi uvjetuju da su današnji sustavi zatvorenog tipa, tako da su konkretne informacije o njihovom internom funkcioniranju najčešće klasificirane kao poslovna tajna i nisu dostupni ni na izravan upit, ni u obliku objavljenih radova. Pristupačnost optičkih digitalizacijskih sustava uvjetovala je da industrija danas opravdano zahtijeva njihovu sveobuhvatnost i veliku fleksibilnost po pitanju oblika mjernih objekata i njihovih dimenzija jer se kod nekog općenitog mjernog objekta može očekivati postojanje refleksnih zona, zasjenjenih zona

ili diskontinuiranih površina s lokalnim reljefnim detaljima, čija se geometrija ne može digitalizirati u jednom koraku. U ovom poglavlju analizirat će se mogućnost digitalizacije općenitih površina korištenjem sustava s više kamera. Cilj je razvoj četvrte generacije digitalizacijskih sustava sa više od dvije kamere koji će imati mogućnost ostvarivanja varijabilnih vanjskih parametara kalibracije uz zadržavanje fiksnih unutrašnjih parametara. Želi se omogućiti jednostavnu relativnu promjenu položaja kamera i projektora, te time minimalnim brojem projekcija ostvariti maksimalnu pokrivenost površine objekta mjerenja i veliku količinu detalja. Nadalje, želi se ostvariti mogućnost kalibracije sustava s više kamera slobodnim kalibrom, koji bi se, slično kao kod kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja, mogao jednostavno prilagoditi gabaritima i specifičnostima oblika proizvoljnog mjernog objekta. Dodatno se želi iskoristiti utjecaj pojave samokalibracije na povećanje fleksibilnosti i sveobuhvatnosti novog sustava, uz smanjivanje utjecaja krutosti konstrukcije i toplinskih utjecaja izvora svjetla na performanse novog digitalizacijskog sustava.

8.1. Razrada sustava

Razvoj projekcijskih sustava četvrte vrste teži stvaranju okosnice nove generacije otvorenih i fleksibilnih sustava, što podrazumijeva jednostavno dodavanje i jednostavniju kalibraciju dodatnih kamera. Stoga su pri odabiru matematičkih modela praćene slijedeće smjernice razvoja sustava s više kamera. Od novog sustava zahtijeva se:

- mogućnost korištenja četiri ili više kamera,
- mogućnost variranja vanjskih parametara orijentacije kamera,
- mogućnost korištenja svakog piksela u kameri kao zasebne mjerne točke,
- prilagodljivost kalibracijskog objekta trenutnom mjernom problemu,
- mogućnost samokalibracije,
- smanjenje broja mjerenja u odnosu na sustave prvog i drugog tipa,
- poboljšanje prostorne rezolucije, odnosno definicije površinskih detalja,
- mogućnost digitalizacije djelomično zasjenjenih površina,
- mogućnost povezivanja višestrukih projekcija u jedan oblak točaka,

- pojednostavljenje postupka planiranja mjerenja.

8.1.1. Poopćeni prikaz mjerne procedure

Mjerna procedura (*slika 8.22.*) uobičajeno se sastoji od slijedećih koraka i zajednička je svim generacijama optičkih digitalizacijskih sustava, neovisno o broju korištenih kamera te vrsti projiciranog svjetlosnog rastera, a sastoji se od:

- pripreme mjernog objekta,
- podešavanja optičkih elemenata projektora i kamera,
- određivanja unutrašnjih i vanjskih parametara odabranog matematičkog modela postupkom kalibracije,
- rješavanja problema jednoznačnosti projiciranjem nekog kodiranog svjetlosnog uzorka,
- računanja objektnih koordinata,
- povezivanja rezultata mjerenja iz različitih orijentacija mjernog objekta,
- prikaza i obrade rezultata mjerenja.

8.1.2. Odabir matematičkog modela

S obzirom na način modeliranja optičkih elemenata digitalizacijskog sustava, vezano uz zahtjev korištenja četiriju ili više kamera, postoji mogućnost odabira analitičkih (npr. epipolarne ravnine, trifokalnog, kvadrifokalnog tenzora i njihove kombinacije) ili numeričkih modela (npr. metode izjednačavanja zrakovnog snopa). Analitički modeli za definiciju tenzora preslikavanja mjerne točke koriste geometrijske odnose korištenih kamera (poglavlja 2-5), što, primjerice, kod metode epipolarne ravnine opisuje jednadžba (2.9). Time se poznate geometrijske karakteristike sustava koriste za pomoć pri pronalaženju stereoparova, odnosno preslikavanja iz jedne u drugu kameru. Ovaj pristup ne uzima eksplicitno u obzir mjerni objekt kao dio mjernog lanca. Ako su slikovni osjeti mjerne točke koje čine stereoparove pronađeni koristeći geometrijske veze među

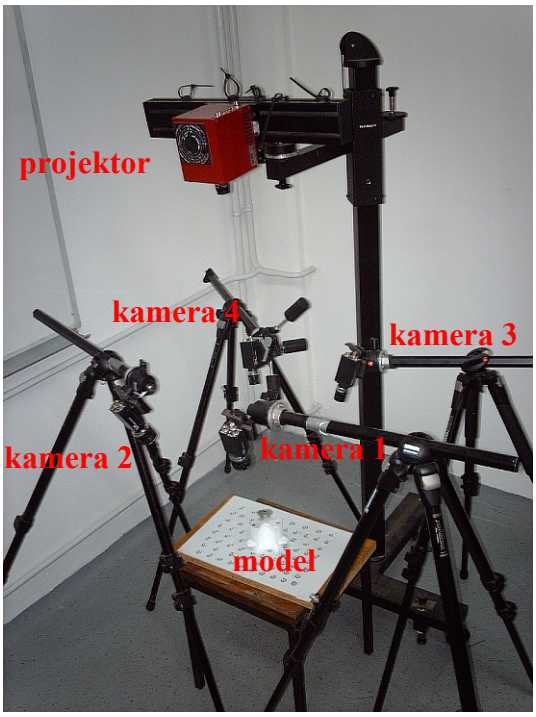
kamerama, nisu u svakoj od kamera određeni nezavisno, te se gubi predefiniranost sustava kojoj ovdje težimo. Nasuprot tome, numeričke metode, kao npr. metoda izjednačavanja zrakovnog snopa, modeliraju položaj svake od kamera nezavisno jednu od druge u globalnom koordinatnom sustavu prema jednadžbama 2.12, koristeći upravo mjerni odnosno kalibracijski objekt, uz pretpostavku da isti tijekom procesa snimanja iz više pozicija zadržava nepromijenjenu geometriju i da sadrži prikladne markacije potrebne za rješavanje problema jednoznačnosti. Neovisno o korištenom modelu, procesu samog mjerenja nužno prethodi postupak kalibracije kojim se određuju unutrašnji i vanjski parametri sustava. Analitičke i numeričke metode principijelno se razlikuju u fleksibilnosti promjene unutrašnjih i vanjskih parametara određenih inicijalnom kalibracijom. Dok analitičke metode jednom određene parametre smatraju fiksnima i nepromjenjivima tijekom procesa mjerenja, metoda izjednačavanja zrakovnog snopa teoretski dopušta njihovu naknadnu korekciju, koristeći i podatke dobivene iz samog mjerenja. Kod sustava baziranih na analitičkim metodama kalibracijski objekt obično je strogo definirane geometrije, prilagođen upravo korištenoj metodi brojem i vrstom korištenih markera (npr. točke ili linije) i obično je radi pojednostavljenja modela i poboljšanja konvergencije planaran (*slika 2.7*), dok je kod metode izjednačavanja zrakovnog snopa dovoljan uvjet da su markeri koji služe za rješavanje problema jednoznačnosti međusobno nepomični tijekom provođenja kalibracije, odnosno mjerenja. Prostorna konfiguracija markera nije zadana samom definicijom modela. Teoretski bi bilo moguće provesti mjerenje nekim od analitičkih modela i potom ponoviti analizu kompletnog modela sustava, primjerice metodom izjednačenja zrakovnog snopa, koristeći rezultate prethodne analize kao ulazne parametre. Takovim pristupom parametri određeni inicijalnom kalibracijom mogli bi se koristiti kao inicijalni parametri za ubrzavanje konvergencije metode izjednačenja zrakovnog snopa. Za očekivati je da bi se ovo rješenje donekle približilo otvorenosti koju dopušta metoda izjednačenja zrakovnog snopa, ali uz iznimno produljenje vremena trajanja analize i uz gubitak predefiniranosti kod postupka traženja stereoparova. S obzirom na zahtjev mogućnosti promjene vanjskih parametara orijentacije kamera, analitički sustavi koji modeliraju relativne odnose korištenih kamera, kod promjene orijentacije makar i jedne kamere zahtijevali bi kompletnu rekalibraciju sustava svih kamera, uz ponovno provođenje postupka kalibracije svih kamera korištenjem kalibracijskog objekta. Analogna potreba javlja se i

kod numeričkih metoda, ali s tom razlikom što se sada kalibracija može promatrati kao dio mjernog procesa, pa i mjerne točke na površini mjernog objekta mogu biti uključene u kalibracijski model. Svaka od kamera može se modelirati zasebno, relativno u odnosu na globalni koordinatni sustav te nije potrebno provoditi rekalibraciju svih korištenih kamera već samo one kojoj su izmijenjeni parametri. Ukoliko za vrijeme promjene vanjskih nije došlo i do promjene unutrašnjih parametara pomaknute kamere, za rekalibraciju je dovoljna jedna dodatna snimka kalibracijskog, odnosno mjernog objekta iz te kamere. Kada bi došlo i do drastične promjene unutrašnjih parametara neke kamere, trebalo bi ponoviti kalibracijsku proceduru samo za tu kameru, za što je kod metode izjednačenja zrakovnog snopa dovoljno pet snimaka. S obzirom na fleksibilnost promjene parametara kalibracije, prilikom konstrukcije sustava sa četiri kamere, kao matematički model za potrebe određivanja orijentacije kamera i prostornog položaja mjerne točke odabrana je metoda izjednačavanja zrakovnog snopa.

8.1.2.1. Odabir konfiguracije sustava

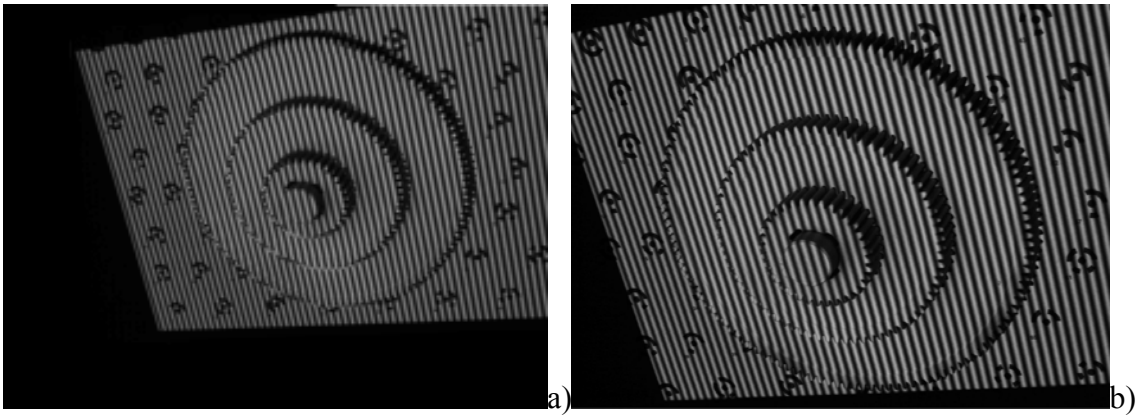
Konfiguracijom sustava s više kamera (*slika 8.1.*) prvenstveno je potrebno osigurati vidljivost svih ispravno osvijetljenih točaka na površini mjernog objekta u što više korištenih kamera. Odabrana raspodjela kamera izravno će utjecati na postupak planiranja mjerenja i na vrijeme digitalizacije jer dodatni osjeti omogućuju skraćivanje vremena digitalizacije zbog povećanja potpunosti digitalizacije promatrane površine (npr. četiri kamere bi se mogle analizirati kao šest različitih parova od po dvije kamere). Dimenzije mjernog objekta, odnosno trenutnog mjernog volumena, zahtjevi za potpunost digitalizacije te željena prostorna rezolucija oblaka točaka izravno utječu na odabir unutrašnjih parametara kalibracije, kao i na odabir samog objektiva, a posredno i na predmetnu udaljenost kamera. Odabrana metoda izjednačavanja zrakovnog snopa ne uvjetuje relativnu raspodjelu kamera i projektora u prostoru, te se odabir konfiguracije kod svakog mjerenja treba provesti sagledavajući relevantne unutrašnje i vanjske parametre (prema poglavlju 4.). Jedan od važnih parametara na koji pritom treba paziti je svakako geometrija projiciranog pravokutnog uzorka, čiji su vanjski gabariti kod

korištenog *Atos* projektora prilagođeni pravokutnom obliku čipa u kamerama. Stoga raspodjelu kamera u prostoru treba planirati tako da se u svakoj korištenoj kameri istovremeno vidi što veća površina projiciranog uzorka.



Slika 8.1. Postava sustava

Ovaj uvjet naizgled je lako zadovoljiti udaljavanjem kamera od mjernog objekta. Udaljimo li se previše, tako da u snimljenoj slici postoji znatna površina bez kodiranih piksela (*slika 8.2.*), dolazi do gubitka točnosti. Udaljavanjem se smanjuje površina slike koja pokriva projicirani uzorak, tj. povećava se površina mjernog objekta koju u nekom trenutku digitalizira pojedini piksel u kameri, što dovodi do efekta zrnatosti i gubitka finih detalja projiciranog rastera.



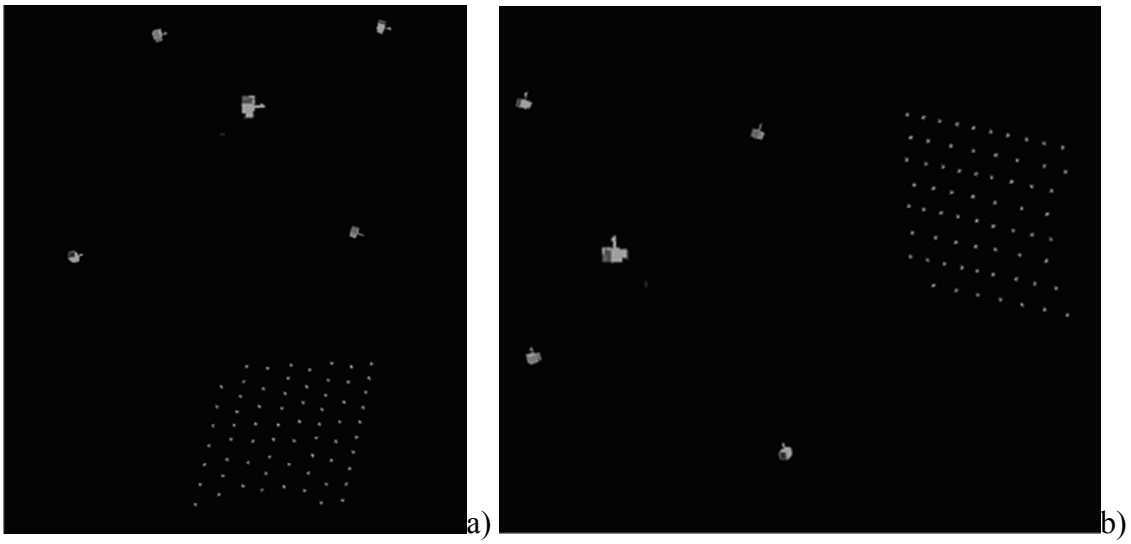
Slika 8.2. Podešavanje udaljenosti: a) pogrešno, b) ispravno.

Nasuprot tome, ako su kamere postavljene na pravilnu udaljenost, ali se položaji centara slike u znatnoj mjeri ne poklapaju, dolazi do smanjenja broja ispravnih stereoparova, te samim time i do gubitka mjernih točaka. Time se ne narušava točnost pronalaženja ostalih točaka, ali se gubi na potpunosti digitalizacije te je potrebno provoditi dodatna mjerenja koja će trebati naknadno povezati s prethodnima u isti koordinatni sustav. Iz ovog uvjeta proizlazi da sve kamere (ako su na njima objektivi iste žarišne duljine) trebaju biti podjednako udaljene od površine mjernog objekta. Udaljenost od mjernog objekta a_k u izravnoj je vezi s geometrijom kamere i projiciranog rastera te se može izračunati prema [16]:

$$a_k = f\left(\frac{W}{w_k} + 1\right) \tag{8.1}$$

gdje je a_k predmetna duljina kamere, W širina mjernog područja, f žarišna duljina objektiva, a w_k širina čipa u kameri, odnosno moguća širina digitalizacije slike u kameri. Kod korištenih eksperimenata udaljenost kamera od mjernog objekta iznosila je približno 550mm dok je projektor bio udaljen približno 1000mm. Gabariti projiciranog uzorka i snimljene slike optimalno bi se poklapali samo kada bi kamera i projektor bili postavljeni kolinearno, okomito na planarnu površinu mjernog objekta. Kako to fizikalno nema smisla, jasno je da će se projicirane scene uz zadržavanje iste predmetne duljine u svakoj od kamera kod pravokutne postave vidjeti u nekoj formi trapeza. Kod sustava prve vrste, kamera i projektor su obično postavljeni konvergentno, tako da se projicirani snop linija

približno poklapa s vertikalnim pikselima u kameri. Može se reći da su sustavi druge vrste zapravo proširenje sustava prve vrste, tako da je dodatna kamera postavljena simetrično s druge strane projektora, slično prvoj, također u konvergentnoj postavi. Pritom su kod oba sustava zadovoljeni gornji uvjeti. Dodavanje dodatnih kamera kod sustava sa četiri i više kamera, uz zadovoljenje istih uvjeta, ovdje se provodi zamišljenim rotiranjem sustava druge vrste oko centralno postavljenog projektora. Četiri konvergentno orijentirane kamere tvore približno pravokutnu strukturu s centralno pozicioniranim projektorom, ali su postavljene tako da se smjerovi vertikalnih piksela u kameri i dalje približno poklapaju s projiciranim linijama. Na taj način je deformacija snimljene slike uzrokovana otklonom kamera u jednakoj mjeri prisutna u svim kamerama, nasuprot slučaju kada bi projektor bio u sredini, a parovi kamera sa svake strane projektora s njim tvorile pravac, što je također moguća konfiguracija. Konvergentnom orijentacijom osigurano je maksimalno moguće preklapanje digitalizirane površine, te je izravan utjecaj na točnost triangulacije položaja objektne točke koja raste s povećanjem razmaka kamera [17].


a) b)

Slika 8.3. a) horizontalno i b) vertikalno pozicioniranje mjernog objekta

Mjerni objekt je moguće digitalizirati u vertikalnoj (kamere također u vertikalnoj ravnini) ili horizontalnoj ravnini. Pokazalo se da je prikladnije objekt učvrstiti u horizontalnoj ravnini jer, zbog vjerojatnosti digitalizacije objekata velikog raspona masa, u slučaju

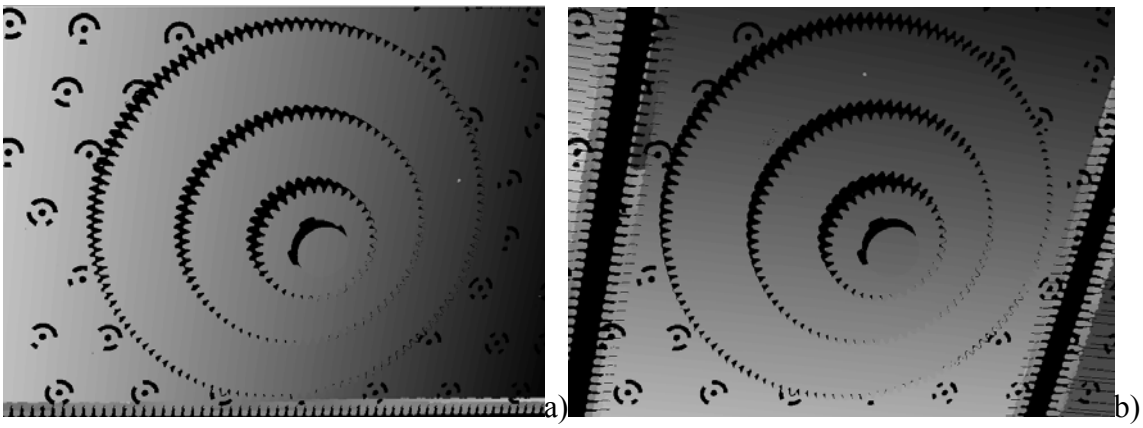
vertikalnog pozicioniranja postoji potreba za njegovom dodatnom ukrutom. Ukoliko se digitalizacija oblika provodi na samoj konstrukciji, tada se sustav može prilagoditi mjernom objektu jednostavnim pomicanjem stativa s kamerama uz zadržavanje opisane pravokutne postave. Odabrana pravokutna postava s centralnim projektorom omogućuje ostvarivanje dodatnih osjeta u onim točkama koje ostaju zasjenjene pri korištenju jedne ili dviju kamera. Digitaliziramo li neku piramidalnu formu sa četiri pravokutno postavljene kamere, na nasuprotnim stranama u svakoj od kamera moguće su pojave zasjenjenja. Ako je ta zasjenjena površina (ukoliko je ispravno osvijetljena projektorom) vidljiva u nekoj od preostalih kamera, može se iskoristiti za ostvarivanje mjerne informacije nekom od prikladnih metoda analize opisanima u sljedećem poglavlju. Utjecaje pojave površinske refleksije sada je lako minimalizirati pomicanjem projektora i/ili pojedinih kamera. Za očekivati je da će barem dvije kamere uspjeti ispravno digitalizirati neku točku (koja je ispravno osvijetljena projektorom) iz položaja koji nije pod utjecajem refleksije ili zasjenjenja.

8.1.3. Odabir metode za rješavanje problema jednoznačnosti

U općenitom smislu, digitalizirati se mogu samo one točke na površini mjernog objekta čiji se slikovni osjet može ispravno zabilježiti kamerom i koji se može jednoznačno prepoznati u svakoj od korištenih kamera. Projicirani uzorak treba omogućiti jednoznačno prepoznavanje istog slikovnog osjeta u svakoj od kamera zasebno, neovisno o susjednim kamerama i njihovim nesavršenostima. Poglavljem 5 dan je sažeti prikaz trenutno dostupnih metoda za rješavanje problema jednoznačnosti. Idealna bi bila ona metoda projiciranja kod koje bi se s minimalnim brojem projekcija ostvarilo jednoznačno kodiranje položaja svakog piksela u kameri zasebno, kodom koji bi se u slici ponovio samo jednom. Odabirom neke od objektnih metoda moglo bi se udovoljiti ovim zahtjevima, ali zahtjevi ostvarive točnosti uvjetuju odabir neke od projekcijskih metoda koje su manje osjetljive na okolišne uvjete i interakciju projiciranog uzorka s mjernim objektom, kao i nelinearnosti kamera i projektora. Uvjetom analize svakog piksela zasebno eliminira se projiciranje objektno kodiranih uzoraka. Kodiranjem informacije

nekim od uzoraka vremenskih metoda (projekcijom snopa paralelnih linija), zadovoljavaju se uvjeti točnosti i kodiranja svakog piksela zasebno, uz cijenu ograničenosti na mjerenje statičkih konstrukcija te produljenje vremena mjerenja zbog potrebe višestrukog projiciranja različitih uzoraka. Upravo projekcijom snopa linija uvodi se i dodatan problem jednoznačnosti, jer se sada isti kodovi ponavljaju uzduž projiciranih linija (poglavlje 2), te se na ovaj način još uvijek ne mogu neovisno pronaći stereoparovi ili provesti rekonstrukcija oblika isključivo pomoću numeričkih metoda rekonstrukcije. Samim zakretom projektora (ili korištenjem stakalca s kosim linijama) ova jednoznačnost se ne gubi, te je nužno uvesti dodatne kodove za eliminiranje ovog dodatnog problema. Korištenje stakalca s kosim linijama bilo bi problematično iz razloga što je potrebno njegovo precizno pozicioniranje. Stoga su linije na stakalcu korištenog projektora izvedene upravo paralelno sa smjerom njegova pomicanja. Međutim, čak i kod stakalca čije su linije izvedene usporedo sa smjerom njegova pomicanja, javljaju se pogreške rekonstrukcija faza označenih strelicom na donjem rubu *slike 4.13.a*. Ove se pogreške mogu pojaviti uslijed neujednačenih duljina linija u pojedinom uzorku te neujednačenosti njegova pomaka. Sustav treće vrste [16] riješio je ovaj problem dodatne jednoznačnosti uvođenjem dodatnog projiciranja vremenskih kodiranih informacija. Digitalizacija se provodi dvostrukim, međusobno okomitim projiciranjem kombinacije uzoraka vremenskog faznog pomaka i Gray koda. Time su svakom ispravno osvijetljenom pikselu u kameri pridružene vrijednosti horizontalne i vertikalne apsolutne faze (*slika 8.4.*), te se određivanje njegovog stereopara u preostalim kamerama provodi traženjem ekvivalentnog piksela s istim parom faza u po dvije slike po korištenoj kameri. Potreba za okomitim projiciranjem zahtijeva ili fizički zakret projektora ili stakalce s dvostrukim kodovima, uzdužnim i poprečnim. Korištenje takovog stakalca uvjetovalo bi potrebu za izrazito preciznim pomakom stolića sa stakalcem, te bi već i mala pogreška u pozicioniranju horizontalnih kodova uvjetovala iznimne netočnosti u rekonstrukciji faznih slika. Zbog potrebe dodatnih projiciranja, vrijeme projiciranja traje dvostruko duže nego kod sustava prve ili druge vrste temeljenih na istim principima, ali je napredak tehnologije omogućio da se ovo vrijeme danas može efikasno eliminirati korištenjem bržih kamera, odnosno digitalizatora. Drugi način skraćivanja vremena bio bi zamjena projiciranja dodatnih kodova nekom od direktnih ili objektnih metoda. Pretpostavka je da se točnost pronalaženja stereoparova ne bi znatno pogoršala ako bi se kao referenca

uzimale informacije dobivene vremenskim kodiranjem u jednom smjeru. Ovaj dvostruki princip projiciranja usvojen je i prilikom razrade sustava sa četiri kamere kako bi se zadržala sljedivost projekcijskih uzoraka, zbog nedostatka potrebnih projekcijskih stakalaca za projiciranje direktnih metoda te zbog kamera koje bi mogle digitalizirati i eventualne uzorke u boji. Razmatrano je korištenje komercijalnog LCD projektora, međutim, pokazalo se da dostupni projektori projiciraju vidljivo zrnatu sliku te su ograničeni realnom ostvarivom dubinom boja i nepromjenjivim objektivom. Standardni *Atos* projektor koristi stakalce na kojem je metalizacijom nanesen raster, tako da je projicirani uzorak koji digitaliziraju kamere monoton i neprekinut. Kada bi se umjesto zakreta projiciranog uzorka koristila njegova translacija okomito na projicirani snop linija, problem jednoznačnosti ne bi bio riješen jer bi ostao problem razlučivanja istih iznosa faza po dužini projiciranih linija u snopu. Ukoliko bi se drugo projiciranje provelo bez zakreta, ali s projektorom nešto udaljenijim od površine mjernog objekta, iste linije pokrile bi nešto veću površinu na mjernom objektu. Na taj način dobio bi se efekt sličan variranju gustoće pruga, poznatiji kao heterodinamički postupak. Tada ne bi bilo nužno projicirati Gray kod, ali bi se zadržao dodatni problem jednoznačnosti zbog paralelnosti linijskog snopa.



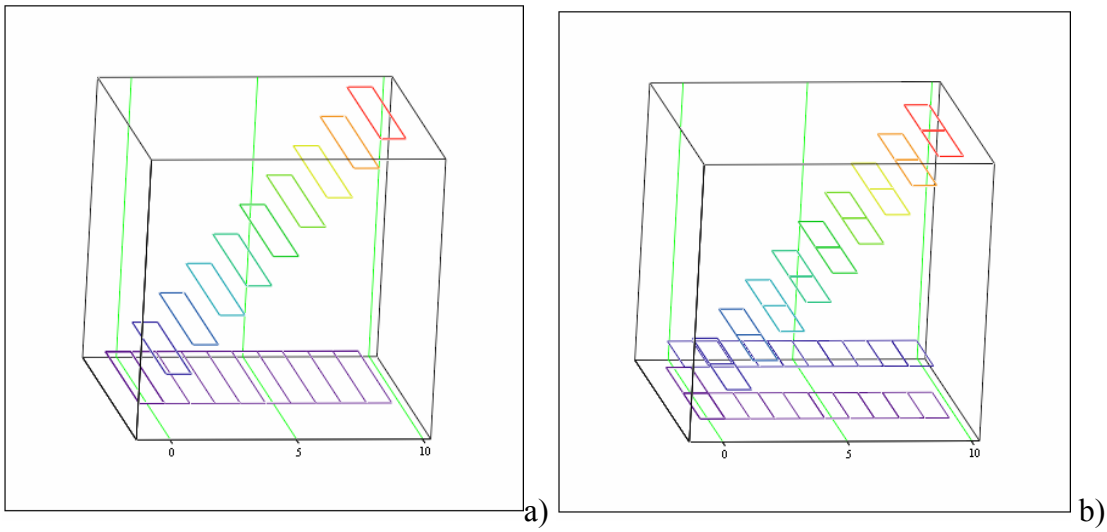
Slika 8.4. Ilustracija a) vertikalnih i b) horizontalnih apsolutnih faza

8.1.3.1. Rješavanje problema jednoznačnosti kod sustava s više kamera

Da bi se pronašao par piksela koji ima identičnu kombinaciju vertikalne i horizontalne faze, prema algoritmu sustava treće vrste [16], poglavlje 3, potrebno je provesti slijedno pretraživanje po dvije fazne slike po korištenoj kameri. Pretraživanje je olakšano pretpostavkom okomitosti dvaju projekcijskih uzoraka i poznavanjem njihova smjera prirasta. U daljnjem tekstu analizirat ćemo primjer unakrsnog projiciranja na neku ravnu kontinuiranu plohu, uz pretpostavku približnog poklapanja horizontalnih piksela u korištenim kamerama. Kod analize putem cjelobrojnih piksela, nakon što su iz snimaka projiciranih faza i Gray koda izračunate slike vertikalnih i horizontalnih faza za obje kamere, odabran je neki piksel u lijevoj referentnoj kameri te su za njega očitani iznosi vertikalne i horizontalne faze. Potom se pretražuje slika vertikalnih faza iz desne kamere, sve dok se ne pronađe stupac s istom vertikalnom fazom. Uz spomenuti uvjet okomitosti projiciranih uzoraka, pripadajuća horizontalna faza mora se nalaziti negdje uzduž stupca pronađenog na slici vertikalnih faza. Pretraživanje je cjelobrojno jer su i traženi i referenti pikseli definirani cjelobrojnim vrijednostima, a postupak se ponavlja za sve ispravno kodirane i digitalizirane piksele. Ovu metodu autor je proširio tako da se umjesto cjelobrojnog ispravnog piksela tražio prvi piksel koji se nalazi lijevo gore od nađenog cjelobrojnog. Na taj način omogućeno je korištenje polja od četiri susjedna piksela kako bi se bilinearnom interpolacijom pronašao necjelobrojni položaj mjerne točke. Budući da realne kamere daju diskretiziranu sliku površine i da unakrsno projicirani uzorci nisu uvijek idealno međusobno okomiti i paralelni sa stupcima i redcima piksela u kameri, ovaj pristup ima smisla zbog smanjenja šuma u rekonstruiranim točkama, ali se udaljava od ideala korištenja svakog piksela kao mjerne točke zasebno. Opisano kodiranje projiciranjem u dva okomita smjera, iako pridružuje dvije različite faze nekom pikselu, zapravo se ne može izravno usporediti s apsolutnošću objektnih metoda (poglavlje 5) jer ne pridružuje svakom od piksela u kameri jednu jedinstvenu fazu, te postoji potreba za dodatnim pretraživanjima dvodimenzionalnih slika za svaki piksel posebno.

U ovom radu pokazat će se apsolutno rješenje problema jednoznačnosti kod principa unakrsnog projiciranja. U sljedećem tekstu treba razlikovati apsolutne faze u horizontalnom, tj. vertikalnom smjeru, koje imaju dodatan problem jednoznačnosti uzduž

projiciranih linija usprkos apsolutnom rješenju kojem težimo, a kod kojega se jedna te ista vrijednost faze u slici ponovi samo jednom. Kod sustava druge vrste prilikom računanja apsolutnih faza projiciranih u vertikalnom smjeru, stepenasti uzorak dobiven kodiranjem Gray kodom pridonio je rješavanju problema jednoznačnosti tako što je njegovim zbrajanjem s pilastom slikom parcijalnih faza ostvarena približno monotona kosa ploha apsolutnih faza. Pritom Gray kod ne pridonosi točnosti metode, već samo rješava problem jednoznačnosti nastao uslijed ponavljanja parcijalnih faza. Valja primijetiti da se analizira svaki piksel zasebno te se slika apsolutnih faza ostvaruje u jednom prolazu kroz sve piksele u slici parcijalnih faza, neovisno o susjednim pikselima i njihovim smjerovima prirasta faza. Ovdje će se primijeniti princip sličan Gray kodu za ostvarivanje potpuno apsolutnih faznih slika. Neka se i ovdje, kao kod sustava treće vrste, raster projicira u dva međusobno okomita smjera. Apsolutne faze dobivene vertikalnim projiciranjem uzimamo kao referentne, dok apsolutne faze dobivene horizontalnim projiciranjem koristimo analogno Gray kodu, što ćemo objasniti na primjeru slike sa četiri retka od kojih svaki ima po deset piksela, a radi jasnoće prikaza prostornih grafova odabran je prirast faze u desno. Odaberemo li jedan piksel u horizontalnoj apsolutnoj faznoj slici dobivenoj projiciranjem na ravnu plohu, uz uvjet da su pikseli u kameri upravo paralelni s horizontalnim fazama, taj piksel imat će fazu koja će se u slici horizontalnih faza ponoviti više puta uzduž tog retka piksela te prividno tvoriti horizontalnu liniju. Proglasimo tu liniju nultom linijom horizontalnih faza, odnosno, odabranu horizontalnu fazu nultom fazom. Budući da pretpostavljamo da za vrijeme projiciranja horizontalnih i vertikalnih uzoraka nije došlo do pomaka kamera, za svaki piksel koji pripada odabranoj nultoj fazi u horizontalnoj slici iz vertikalne slike apsolutnih faza pročitamo iznose vertikalnih faza. Pritom smo dobili diskretizirani iznos faza koji podsjeća na pravac (*slika 8.5.a*), a koji se sastoji od apsolutnih iznosa vertikalne faze. Ako bi slika sadržavala samo ovaj pravac, problem jednoznačnosti bio bi automatski riješen jer svaki piksel posjeduje vlastiti, samo jednom ponovljeni kod vertikalne faze.

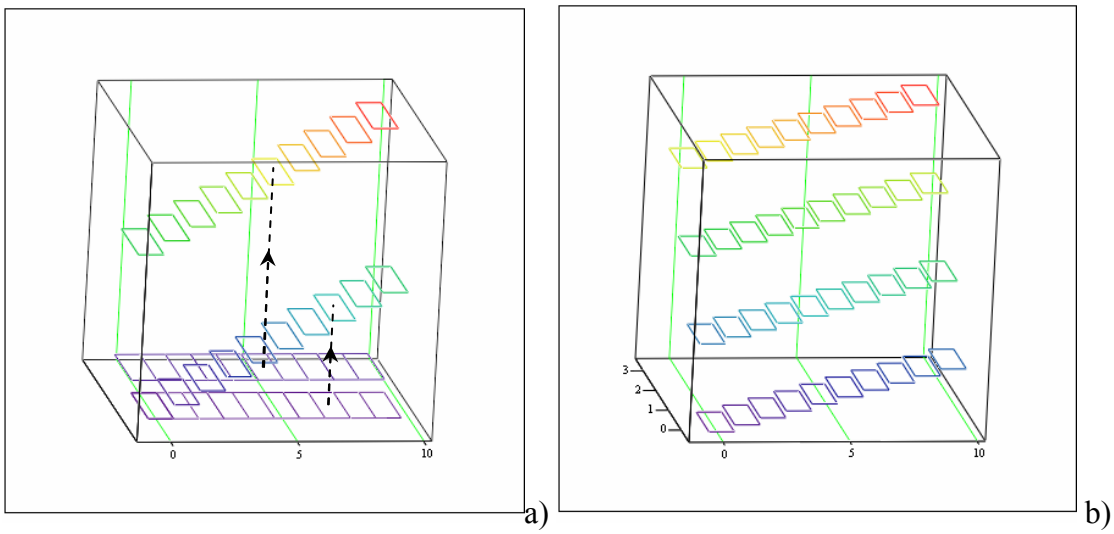


a) b)

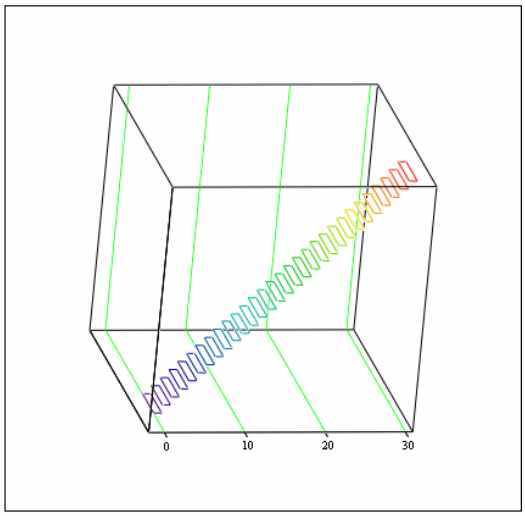
Slika 8.5. Ilustracija horizontalnih i vertikalnih faza za a) jedan i b) dva susjedna reda piksela

Ponovimo identičnu operaciju za slijedeći redak u horizontalnoj slici (*slika 8.5.b*), tj. prvi susjedni piksel s većom horizontalnom fazom od one odabrane u prvom koraku. Sada smo dobili drugi pravac vertikalnih faza, koji je susjedan prethodnom u slici vertikalne faze. Budući da se ova dva pravca sastoje od istih ili sličnih iznosa vertikalnih faza, ali s cjelobrojnom razlikom u iznosu horizontalnih faza, problem jednoznačnosti još nije riješen. Problem jednoznačnosti bio bi apsolutno riješen tek kada bi svaki piksel u vertikalnim fazama koje tvore ova dva pravca imao vlastiti iznos koji bi se u ovih dvadeset piksela ponovio samo jednom. Sljedeći korak je uvećavanje svih vertikalnih faza ovog drugog pravca za neki konstantan iznos, (*slika 8.6.a*). Ako se koriste 8-bitne kamere s 256 razina svjetloće i projicira fazna slika sa 64 svijetla i tamna polja, najveći iznos koji se može očekivati u faznoj slici je 256*64=16384, te se za 16384+1 treba uvećati svaki piksel u na prethodno opisani način pronađenom drugom retku vertikalne slike. Iznos faza je dodatno uvećan za jedan, kako se prvi piksel iz drugog retka ne bi poklopio s iznosom zadnjeg piksela iz prvog retka vertikalnih faza. Iznos od 16385 je zapravo minimalni iznos koraka, dok je u ovom primjeru prikazanom slikama dovoljno uvećati svaki iznos vertikalne faze drugog pravca za 10+1. Uvećanje za bilo koji iznos veći od minimalnog također će rezultirati apsolutnom faznom slikom, uz uvjet da je ovaj korak prirasta isti kod svih sljedećih redaka vertikalne slike. Sada je svaki piksel u ova

dva pravca vertikalnih faza kodiran zasebnim kodom, (*slika 8.6.a*), čime je kod primjene metode unakrsnog projiciranja dokazana mogućnost dodjeljivanja apsolutne faze svakom od piksela po korištenoj kameri. Prednost ovog pristupa je u tome što je opisana metoda primjenjiva na rješavanje bilo kojeg problema jednoznačnosti kod kojeg postoje dvije unakrsne stepenaste fazne plohe (nastale npr. direktnim unakrsnim kodiranjem linijama različitih boja ili projiciranjem dviju unakrsnih uzoraka heterodinamičke metode). U ovom primjeru, vertikalne faze su pretpostavljene u obliku pravca s prirastom udesno, međutim, valja primijetiti da se korekcija faze svakog piksela koji pripada pravcu vertikalnih faza zapravo provodi lokalno u svakom pikselu definiranom iznosom odabrane horizontalne faze. Analiza se provodi slijedno za sve piksele odabrane horizontalne faze, piksel po piksel, neovisno o smjeru prirasta vertikalnih faza u ostalim pikselima koji naizgled pripadaju tom pravcu, ali zajednički im je samo iznos horizontalne faze, te se ponavlja onoliko puta koliko ima ispravno kodiranih piksela u slici. Ponovimo li sada opisani postupak za preostale piksele ovog primjera, rezultirajuće apsolutne faze izgledat će kao na *slici 8.6.b*. Usporedimo li ovu sliku sa slikom sumiranih faza *slika 3.4.b***,** vidi se da se sada isti kod ponavlja samo jednom, te je problem pretraživanja stereoparova sveden na jednu sliku po kameri. Opisani postupak potrebno je ponoviti za sve korištene kamere, te ga je moguće primijeniti i na sustav treće vrste. Sada svaka slika predstavlja indeksirani skup koji apsolutnom kodu svake točke pridružuje dvije slikovne koordinate položaja te točke u ravnini slike. Rekonstrukcija parova mogla bi se provesti razvojem slike u jedan red piksela, (*slika 8.7.*), tako da se svaki od pravaca u vertikalnoj fazi slijedno dodaje jedan iza drugoga.



Slika 8.6. Apsolutne faze za a) dva reda piksela i za b) cijeli model



Slika 8.7. Razvoj slike u pravac, prelazak u jednodimenzionalni prostor

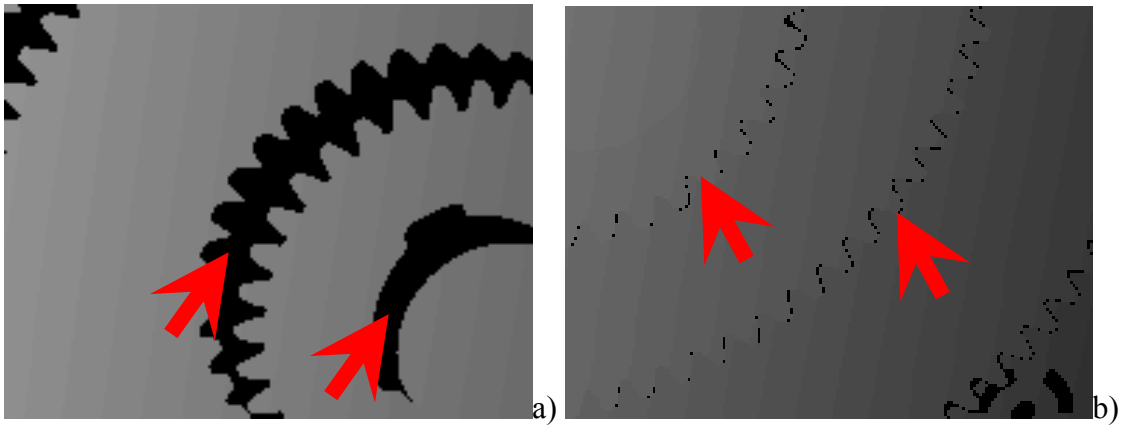
Na taj način problem dvodimenzionalnog pretraživanja prelazi u jednodimenzijski problem. Pretraživanje bi trebalo biti brže od pretraživanja slika horizontalnih i vertikalnih faza jer je sljedeći traženi apsolutni indeks upravo susjed prethodnog indeksa. Međutim, rješenje je jednostavnije naći ako se problem promatra kao presjek skupova koji za neki apsolutni kod u svakoj od kamera posjeduju po dvije vrijednosti slikovnih koordinata. Da se izbjegne dvodimenzionalno pretraživanje cijele slike potrebno je po

korištenoj kameri popuniti dvije jednodimenzijske matrice, na način da su indeksi polja upravo vrijednosti apsolutnih indeksa u koje spremamo vrijednosti x i y slikovnih koordinata (može se koristiti i jedna dvoredna dvodimenzionalna matrica, ali ovdje se željelo naglasiti prelazak problema jednoznačnosti u jednodimenzionalan indeksni prostor). Sada je traženje stereoparova u svim korištenim kamerama svedeno na čitanje istog indeksa iz ovih matrica po preostalim kamerama. Gubi se potreba za referentnom kamerom, kao i za funkcijama za pretraživanje i sortiranje te se sva analiza provodi matrično, piksel po piksel. Za rješavanje prikazanog primjera bilo bi dovoljno koristiti jednodimenzijske matrice od 40 članova. Kod slika koje se sastoje od 768*572 piksela i uz odabrani korak od 16385, ove matrica bi trebale primiti $16385*16385 \approx 2{,}7*10^8$ vrijednosti, od čega bi bile prazne sve osim njih 572*572 (zbog širine preklopljenog područja uvjetovanog rotacijom projektora). Iznos horizontalne faze koristimo za pronalaženje pripadajućih piksela vertikalne faze te kasnije u analizi ovaj iznos nije potrebno čuvati. Izvršimo li reindeksiranje svakog od 572 horizontalnog redaka, problem se može svesti na $572*16385 \approx 9{,}4*10^6$ vrijednosti. Međutim, budući da programski paket *Tritop* koji se koristi za trianguliranje objektnih točaka kao ulazne parametre zahtijeva samo indeksirane točke s njihovim slikovnim koordinatama za svaku od korištenih kamera, ovaj problem nije potrebno dalje rješavati.

8.1.4 Određivanje stereoparova u slici

Sustavi druge vrste određivanje stereoparova provode kombinacijom metode epipolarne ravnine i projiciranja vertikalnih kombinacija vremenskog faznog pomaka i Gray koda. Kod njih postoji dodatan problem jednoznačnosti, zbog projekcije vertikalnih linija uzduž kojih se ponavljaju isti kodovi. Stereopar odabranog piksela zadane vertikalne faze u lijevoj kameri pronalazi se na mjestu presjeka epipolarne linije s traženom vertikalnom fazom. Diskontinuiteti i zasjenjenja ne utječu na rezultanti oblak točaka jer se u takvim područjima neće pojaviti par traženog koda, pa će odabrani piksel u lijevoj kameri biti odbačen kao neispravan. Na taj način se u mjerenje ne uvode pogrešni osjeti, a filtriranje se provodi prije nego li je provedena triangulacija, čime se ubrzava analiza. Sustavi s više

od dvije kamere osjetljiviji su na greške pri identifikaciji stereoparova zato što ispravni položaj objektne koordinate neke mjerne točke ovisi o precizno određenim lokacijama parova vrijednosti faza u svim korištenim kamerama. Pogrešno određeni stereopar u samo jednoj od korištenih kamera doveo bi do greške u triangulaciji (pogrešne objektne točke u literaturi su poznate kao eng. *outlier*) i mogao bi se odstraniti tek nakon što je proveden postupak triangulacije za sve pronađene stereoparove. Eliminacija se provodi na osnovu analize odstupanja standardne devijacije triangulacije neke objektne točke od srednje vrijednosti standardne devijacije s kojom su triangulirane sve objektne točke iz kompletnog mjerenja. Na taj način usporava se analiza jer se vrijeme gubi na pretraživanje pogrešnih stereoparova u dvije slike po kameri, na njihovu triangulaciju te na naknadnu eliminaciju. Ovim postupkom se za zadanu kombinaciju faza odbacuju i položaji ispravno određenih stereoparova u preostalim kamerama, što u oblaku točaka objektnih koordinata dovodi do stvaranja rupa bez rezultata. Kada se neispravni pikseli ne bi eliminirali, kod ponovljenog postupka metode izjednačavanja zrakovnog snopa s ciljem samokalibracije sustava, doveli bi do gubitka konvergencije i raspada modela. Kad se kao matematički model koristi metoda izjednačavanja zrakovnog snopa, tada ne postoji izravan mehanizam filtriranja kao kod metode epipolarne ravnine te je potrebno uvesti dodatne kontrole prilikom provođenja prepoznavanja parova vertikalnih i horizontalnih faza. Cjelobrojno pretraživanje i pretraživanje s naknadnom bilinearnom interpolacijom je u ovom radu prilagođeno sustavima s više od dvije kamere, uvođenjem gradijentnog filtera za detekciju kritičnih piksela. Pokušana je i kontrola pronađenih piksela na osnovu pretpostavke da susjedni pikseli u nekoj faznoj slici ostaju susjedni, ali se ova metoda nije pokazala primjenjivom kod diskontinuiranih slika. Uz zanemarivanje pogrešaka uslijed digitalizacije slike, greške u prepoznavanju stereoparova javljale su se na mjestima diskontinuiteta fazne slike i na mjestima naglih faznih gradijenata. Razlog tome treba tražiti u načinu provođenja analize. Na slici vertikalnih apsolutnih faza u referentnoj kameri, (*slika 8.8.a*), područje diskontinuiteta obojano je crnom bojom, dok se na *slici 8.8.b* sa suprotne strane tog istog modela vidi rub nastao zasjenjenjem, odnosno prividnim prelaskom višeg nivoa modela preko nižeg, koji nastaje zbog snimanja pod kutom. Kada bi se os kamere mogla postaviti kolinearno sa osi projektora, fazna *slika 8.8.b* izgledala bi kao kontinuirana fazna ploha bez zasjenjenih područja.

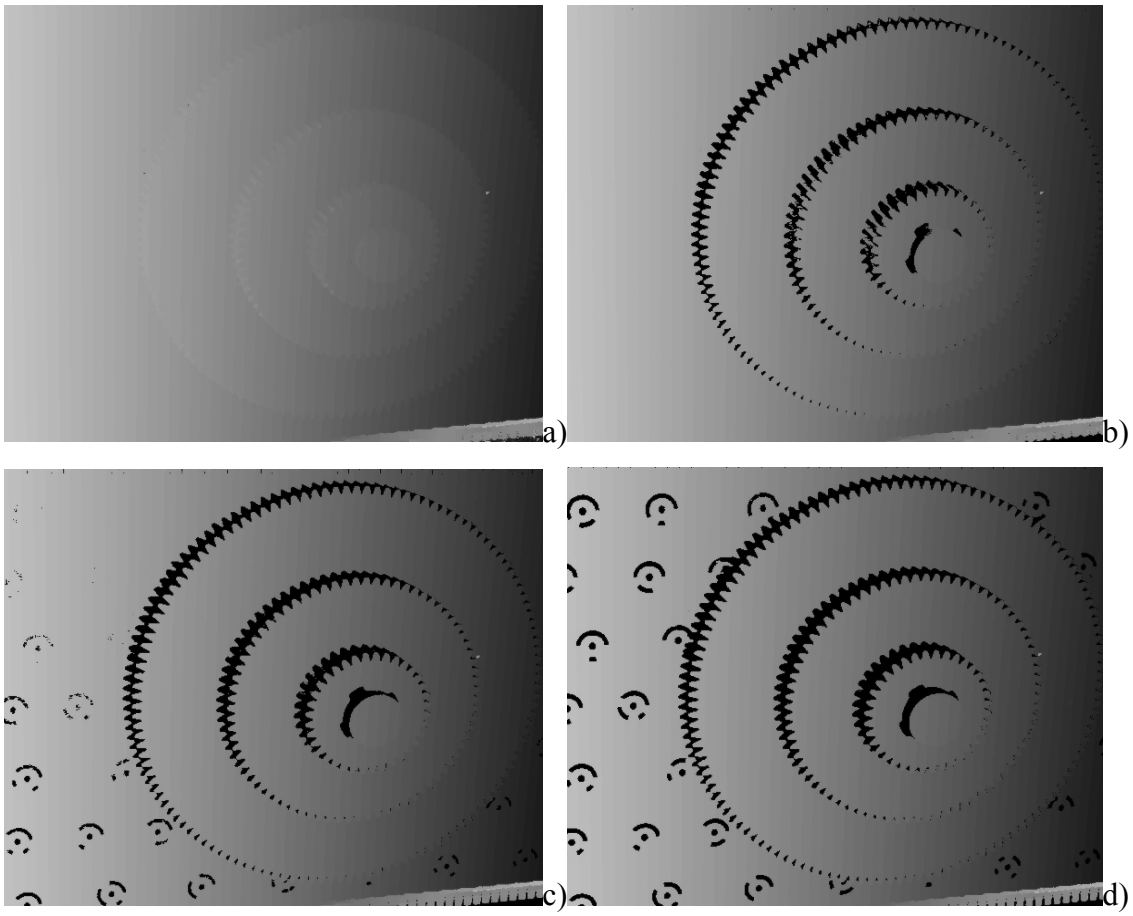


a) b)

Slika 8.8. Diskontinuiteti nastali a)filtriranjem b) zasjenjenjem niže razine višom razinom

Diskontinuiteti u faznim slikama nastaju na dva načina, na mjestima stvarnih diskontinuiteta na površini mjernog objekta i prilikom filtriranja faznih slika. Uzmimo da je na neki prostorni mjerni objekt bijele, približno lambertske površine, izvršeno projiciranje rastera metodom vremenskog faznog koraka i kasnije Gray koda. Objekt se sastoji od po visini naslaganih kratkim vratilom povezanih triju čeličnih čelnih zupčanika s ravnim zubima. Objekt je sniman sa četiri 8-bitne kamere čija je osjetljivost podešena u rasponu od 30 do 230. Za ispravno osvijetljene piksele očekivana srednja vrijednost interpolirane sinusoide (*slika 2.8.b*) kretala bi se oko 130, dok bi očekivana amplituda bila približno 100 te nefiltrirana apsolutna fazna slika izgleda kao na *slici 8.9.a.* Filtriranje faznih slika provodi se na slici parcijalnih faza prije analize projiciranog Gray koda, na osnovu kontrole odstupanja od očekivane vrijednosti modulacije amplitude sinusoidalne vremenske promjene svjetloće u nekom pikselu. Ovdje će se zbog jasnoće prikaza ilustrirati utjecaj filtriranja na slikama apsolutnih faza. Slika apsolutnih faza (*slika 8.9.*) pokazuje pojavu diskontinuiteta s eliminacijom piksela u kojima je amplituda redom manja od *b) 10, c) 20, d) 30*. Projektor je postavljen približno okomito na bokove zupčanika. Iz te pozicije se ne može ispravno osvijetliti samu djelatnu površinu zuba, već samo bočne stranice zupčanika, te vidljiva eliminacija zuba započinje već na *slici 8.9.b*. Za očekivati je da se kod pravokutne konfiguracije kamera te točke neće vidjeti u više od jedne kamere te ih je opravdano odbaciti. S povećanjem iznosa filtrirane amplitude dolazi do povećanja površine diskontinuiteta, što može nastati kao posljedica zasjenjenja nižeg zupčanika gornjim, zbog nedovoljno pripremljene površine ili pojave dodatnih refleksija.

Efekt povećanja diskontinuiteta približno se poklapa s trenutkom pojave rupa na mjestima kodiranih točaka. Točke i kodirani prsteni su crne boje, te amplituda na tom mjestu očekivano odstupa od ostatka bijele površine modela.



Slika 8.9. Filtriranje diskontinuiteta u faznim slikama amplitudnom modulacijom iznosa a) 0, b) 10, c) 20, d) 30.

Diskontinuiteti predstavljaju problem prilikom pretraživanja u dodatnim kamerama jer prekidaju kontinuiranost slikovne matrice pretpostavljenog smjera prirasta faza. Njihov utjecaj može se izbjeći uvođenjem dodatnih testova koji će preskakivati crne piksele (piksele koji imaju iznos svjetloće nula), čime ulaze u analizu i utječu na vrijeme trajanja procesa traženja piksela sa željenom vertikalnom i horizontalnom fazom. Drugi način uveo je autor sustava treće vrste, preko sortiranja slike vertikalnih faza u desnoj kameri. Sortiranjem vertikalnih faznih slika u horizontalnom smjeru eliminiraju se rupe u faznim

slikama, dok se originalne koordinate točaka čuvaju u posebnom indeksiranom nesortiranom polju. Analiza se provodi u dva koraka, a lijeva kamera uzima se kao referentna. Kod cjelobrojnog pretraživanja stereopara odabranog piksela u referentnoj kameri, prvo je u desnoj kameri pronađen stereopar kao cjelobrojni piksel ili kao prvi piksel gore lijevo od traženog, a zatim je u drugom koraku provedena bilinearna interpolacija kroz četiri susjedna piksela koja s prvim čine kvadrat. Preskakali su se i svi pikseli u lijevoj kameri u kojima je iznos vertikalne faze bio jednak nuli. Eksperimenti su provedeni na ravnim i kontinuiranim zakrivljenim površinama te na mrežastoj prostornoj strukturi gdje nije primijećen efekt utjecaja piksela na rubu, prema slici *8.9.b*. Ako je traženi piksel u desnoj slici upravo na rubu ispravnog područja i područja markiranog nultom fazom, i ako se nakon cjelobrojne analize provodi bilinearna interpolacija, tada dolazi do pogreške interpolacije koja može dovesti i do nekontroliranog rušenja programa (najčešće radi dijeljenja s nulom ili rezultatima koji prelaze okvire slike, pa pokazivači korištenog programskog jezika C pokušavaju koristiti pogrešne memorijske adrese). Razlog tome je što će bilinearna interpolacija dati ispravan rezultat samo ako se provodi za skup piksela s ispravnim fazama na dijelu kontinuirane fazne plohe. Stoga je kod sustava sa četiri i više kamera uvedeno filtriranje na osnovu analize gradijenta u okolici cjelobrojno pronađenog piksela iz ostalih kamera. Na taj način se s istim filterom izbjegavaju pikseli u čijem se neposrednom susjedstvu nalaze diskontinuiteti i područja velikih lokalnih gradijenata. Postupak je sljedeći: za traženi piksel u faznim slikama dodatnih korištenih kamera izračunate su srednje vrijednosti faza za polje od 3x3 susjedna piksela (kojima je promatrani piksel u središtu), te je od te vrijednosti oduzeta stvarna vrijednost faze u promatranom pikselu. Jednadžba 8.2. je primjenjiva za oba smjera kodiranja slika apsolutnih faza.

$$\left| \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} - \delta(x, y, t) \right| \leq 20 \qquad (8.2)$$

Predznak gradijenta ne nosi korisnu informaciju, pa je gradijent ovdje promatran prema apsolutnom iznosu. Kod ispravno snimljene kontinuirane slike vertikalnih faza koja linearno slijedno opada udesno, ovaj iznos teoretski je nula, ali se kod realnih mjerenja planarnih objekata 20 pokazalo kao zadovoljavajući eliminacijski iznos. Analogna

procedura uvedena je i kod necjelobrojne analize. Osim prilikom bilinearne interpolacije, oštri rubovi modela predstavljaju poseban problem za projekcijske digitalizacijske metode (analogni problem postoji i kod laserskih sustava, poglavlje 4) jer je nemoguće sa sigurnošću utvrditi da piksel u kameri nije djelomice digitalizirao točku koja pripada rubu, a djelomice i prazni prostor pokraj njega. Predloženom gradijentnom procedurom uzima se u obzir prvi piksel do piksela na rubu modela, koji se filtriranjem odbacuje. *Slikom 8.10.* prikazan je detalj oblaka točaka s površine modela koji se u faznim slikama (*slika 8.9.*) nalazi u donjoj desnoj četvrtini. Oblak se sastoji od stepenastih površina koje pripadaju bokovima zupčanika s vidljivim siluetama zubiju zupčanika i dijela vratila u gornjem lijevom uglu, dok se u pozadini mjestimice vide raspršene kalibracijske točke na ravnoj površini ukrute. Za ispravno amplitudnom modulacijom filtrirane slike parcijalnih faza, kada ne bi bilo utjecaja ruba, oblak točaka izgledao bi kao na *slici 8.10.c*. Utjecaj ruba u *slici 8.10.a* označen je strelicama u području između stepenica, a vidljiv je kao nasumičan skup točaka koje približno izgledaju kao da se nalaze negdje na samim zubima, iako im zapravo ne pripadaju. Ovaj efekt nije lokaliziran samo u navedenoj zoni već se pojavljuju i fantomske točke u prostoru oko modela ali ih ovdje radi jasnoće prikaza nije moguće prikazati. Filtriranjem svih piksela u faznim slikama koji su prema jednadžbi 8.2 imali gradijent veći od 20, dobiven je oblak točaka prikazan *slikom 8.10.b*. Definicija površine zupčanika je očuvana, a broj slobodnih točaka između stepenica je vidno smanjen. Ostatak točaka eliminiran je na temelju analize devijacija triangulacije naspram devijacije triangulacije cijelog modela standardnom funkcijom *"Delete blunder"*. Osim sa stajališta stabilnosti, filtriranje ruba uputno je provesti zato što u zoni ruba može doći i do nepredvidivih refleksija svjetla projiciranog uzorka, koji prilikom digitalizacije lokalno mijenjaju faznu sliku. Uvođenjem filtriranja znatno je povećana stabilnost programa za pronalaženje stereoparova te smanjen broj pogrešno identificiranih stereoparova, čime se skraćuje vrijeme triangulacije i pozitivno utječe na konvergenciju matematičkog modela.

a) b)

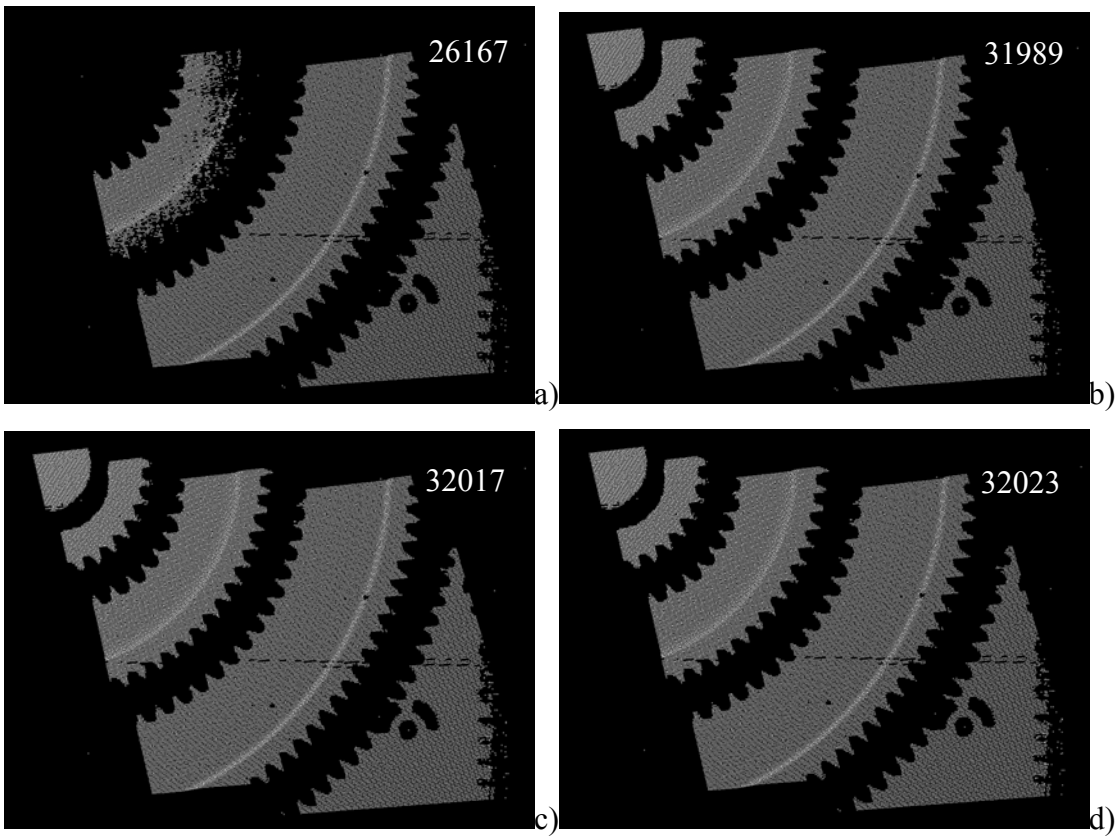
c)

Slika 8.10. Rezultati filtriranja gradijentnim filtrom: a) nefiltrirano, b) filtrirano, c) oblak točaka bez pogrešnih osjeta

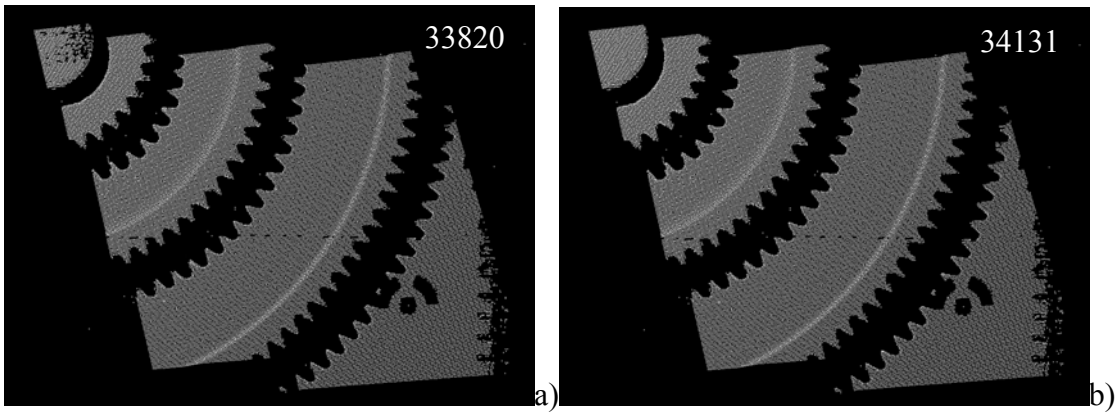
8.1.4.1. Određivanje stereoparova 4-3-2 triangulacijom

Triangulacija objektne točke kod sustava s dvije kamere provodi se tek nakon što su poznati svi stereoparovi korištenih kamera. Onaj piksel u referentnoj lijevoj kameri kojem se ne pronađe pripadajući stereopar u desnoj kameri odbacuje se kao neispravan. Ako se kod sustava sa četiri kamere kod pronalaženja stereoparova provede ova ista apsolutna procedura, oblak točaka sadržavat će samo one točke na mjernom objektu koje su se ispravno vidjele i bile ispravno dvostruko kodirane u sve četiri kamere. One točke koje su se ispravno vidjele u svega dvije ili tri kamere bit će odbačene kao neispravne. Na taj način filtriranje rezultata provodilo bi se prije provođenja triangulacije, a samom triangulacijom te eliminacijom pogrešno određenih stereoparova stvarale bi se dodatne rupe u mjerenju. Rezultantni oblak točaka pokrivao bi istu, ili što je vjerojatnije, još manju površinu mjernog objekta nego kod sustava s dvije kamere. Digitalizirana površina bi se smanjivala zato što postoji mogućnost da površina mjernog objekta koja je ispravno vidljiva i kodirana u referentnoj kameri bude zasjenjena u nekoj od preostalih kamera. Iz navedenog slijedi da dodatne kamere ne bi utjecale na povećanje ukupnog broja digitaliziranih točaka, već samo na predefiniranost slikovnog osjeta pojedine objektne mjerne točke. Kod mjerenja ravne plohe s idealno podešenim i ispravnim sustavom, za očekivati je da će svi stereoparovi biti ispravno pronađeni u svim korištenim kamerama. Također je realno za očekivati da će industrijski mjerni objekti imati reljefnu, diskontinuiranu i refleksnu površinu, pa opisani pristup neće zadovoljiti uvjet potpunosti mjerenja. Kako je jedan od ciljeva ovog rada i smanjenje potrebnog broja mjerenja za proizvoljan mjerni objekt, radi ostvarivanja dodatnih osjeta analiza steroparova provodi se parcijalno, kameru po kameru. Kao referentna kamera odabrana je kamera 1 (gornja lijeva kamera), a postupak pronalaženja stereoparova provodi se nekom od metoda opisanih u prethodnim poglavljima. Pronađeni stereopar piksela odabranog u referetnoj kameri sukladno se indeksira i sprema za svaku od korištenih kamera posebno, neovisno o tome je li pronađen baš u svakoj od preostalih kamera. Pikseli koji su zasjenjeni u referentnoj kameri još uvijek ne ulaze u analizu. Prilikom triangulacije, osim objektne točke čiji su stereoparovi ispravno određeni u svim kamerama, odredit će se i objektna točka piksela ispravno određenih u referentnoj i još jednoj ili dvije kamere. Ova

procedura je opravdana, jer se kod triangulacije svega dva stereopara ovaj sustav sa četiri kamere svodi na sustav trećeg reda s dvije kamere. Ako za to postoji potreba, triangulacija se i kod ovog pristupa može provesti samo za one stereoparove koji su ispravno pronađeni u svim korištenim kamerama. Budući da projektor nije kalibriran, piksel iz referentne kamere za koji nije pronađen nijedan stereopar u preostalim kamerama ne može se koristiti za triangulaciju, što objašnjava nedostatak broja jedan u imenu metode. *Slikom 8.11.* prikazan je detalj površine digitaliziran korištenjem jedne referentne kamere uz uvjet da su sve točke vidljive u svim kamerama. Brojke u uglovima slika predstavljaju broj ispravnih objektnih točaka u oblaku, u ovisnosti o iznosu eliminacijskog faktora navedenog ispod slike. Prema preporuci proizvođača paketa TOM, za daljnju analizu mogu se uzimati one točke čija je devijacija triangulacije u granicama od (3-4)σ, što odgovara oblacima točaka prikazanih slikom *8.11. c* i *d*. Usporedimo li potpunost digitalizacije površine i broj ostvarenih osjeta u slici *8.11. a,d* s *8.12.a*, već je i kod točaka koje u novoj metodi ulaze u 1σ opravdano korištenje 4-3-2 triangulacije. Ako bi kod 4-3-2 triangulacije uzeli sve točke kojima je devijacija manja od 4σ, broj točaka nove metode porastao bi na konačnih 34171, u odnosu na 34131 točaka uz uvjet 2σ, *slika 8.12. b*.



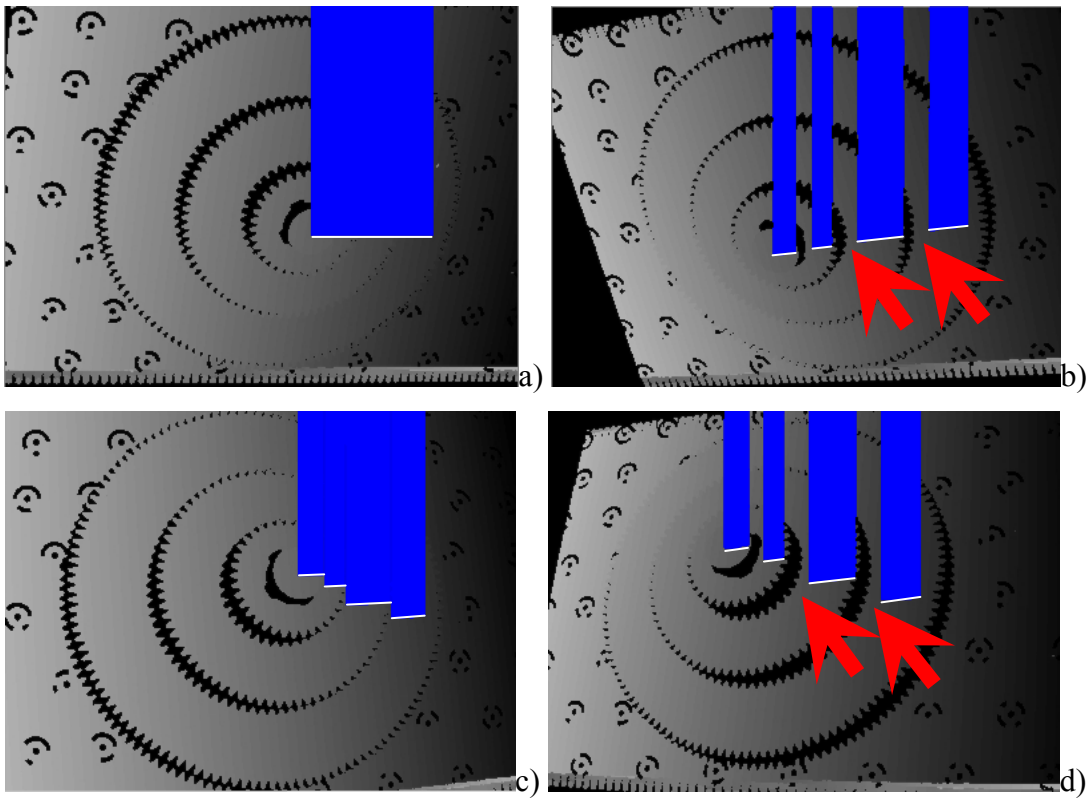
Slika 8.11. Oblak točaka koje su ispravno kodirane u sve četiri kamere čija je devijacija triangulacije manja od a) 1σ, b) 2σ, c) 3σ, d) 4σ.



Slika 8.12. Oblak točaka trianguliran 4-3-2 metodom čija je devijacija triangulacije manja od a) 1σ, b) 2σ

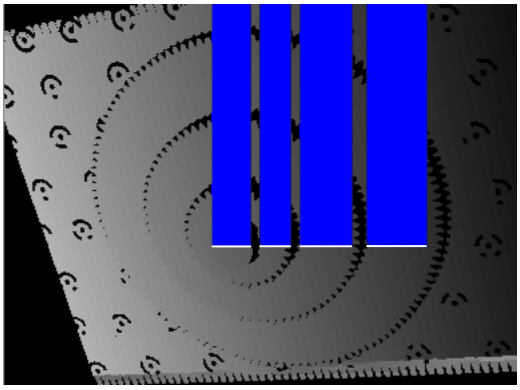
8.1.4.2. Princip 1,2,3,4 referentne kamere

Korištenje jedne referentne kamere dovodi do eliminacije ispravno osvijetljenih piksela u preostalim kamerama ako oni uopće nisu vidljivi u referentnoj kameri, te do eliminacije onih piksela koji su vidljivi u referentnoj, ali ne i u nekoj od preostalih kamera, što će biti ilustrirano sljedećim primjerom. Neka se kao referentna uzme gornja lijeva kamera i neka se nekim od operatora za pretraživanje stereoparova analizira jedan redak piksela u preostalim kamerama postavljenim u pravokutnu konfiguraciju. *Slikom 8.13.a* u slici vertikalnih faza, promatrani redak piksela (označen bijelom linijom) ilustriran je pomoću niza vertikalnih pravaca obojanih plavo, čiji je jedan kraj na samom vrhu slike, a drugi kraj pokazuje analizirani redak piksela. Zbog velike gustoće piksela u referentnoj kameri, ove linije izgledaju kao jednobojni neprekinuti pravokutnik, slika *8.13.a.* Na isti način su pronađeni stereoparovi u preostalim kamerama ilustrirani *slikama 8.13.b,c i d*. Analiza piksela vršena je slijeva nadesno, a područja diskontinuiteta u faznim slikama obojana su crnom bojom. Zbog promatranja iskosa, naizgled kontinuirani horizontalni pravac piksela odabran u referentnoj kameri prelazi u neku vrstu diskontinuiranog kosog pravca u preostalim kamerama. *Slika 8.13.b* sastoji se od četiri odvojene grupe pravaca od kojih svaka pripada pojedinom nivou zupčanika. Zanemarimo li grupu pravaca koji pripadaju stereoparovima na aksijalnoj površini vratila, svaka od preostalih grupa započinje malo pomaknuta nadesno u odnosu na donji rub tijela višeg nivoa, a završava na samom rubu zupčanika promatranog nivoa. Pomak početka iznosi upravo onoliko koliki je dio površine vidljiv u trenutnoj kameri modela bio zasjenjen u referentnoj kameri. Projektor je postavljen približno vertikalno na bokove zupčanika te stoga na površini postoje ispravni kodovi koji su u referentnoj kameri zasjenjeni.



Slika 8.13. Ilustracija pronađenih stereoparova s jednom referentom kamerom a) referentna kamera 1, b) kamera 2, c) kamera 3, d) kamera 4

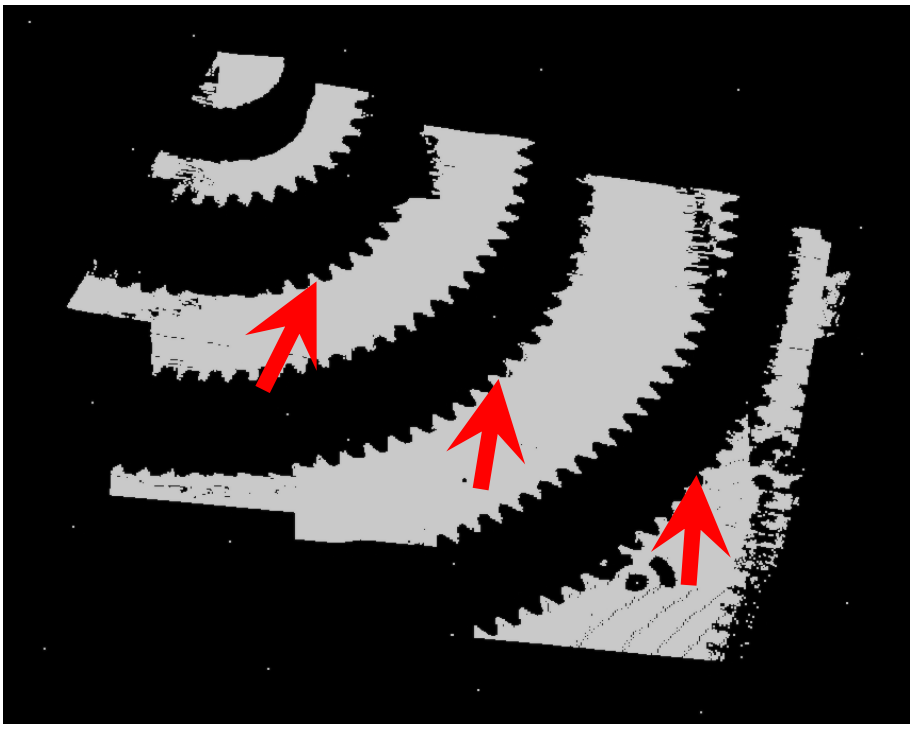
Da bi se iskoristile i točke koje su zasjenjene u referentnoj kameri, a ispravno su kodirane, ovdje je uvedena mogućnost traženja stereoparova s višestrukim referentnim kamerama. Ovaj pristup nema smisla pri korištenju samo dvije kamere jer će zasjenjena područja biti vidljiva samo u jednoj od kamera. Pretraživanje stereoparova kod 1,2,3,4 metode provodi se za sve četiri kamere, uzastopno mijenjajući položaj referentne kamere. Ako se u drugom koraku za prethodni primjer kao referentna kamera uzme kamera 2, sada će biti analizirane i one točke koje na *slici 8.13.b* nisu uzete u obzir, što je prikazano *slici 8.14*. U ovoj ilustraciji odabrani redak piksela ne poklapa se s pravcem stereoparova iz *slike gore b)* jer se referentna slika uvijek pretražuje redak po redak.



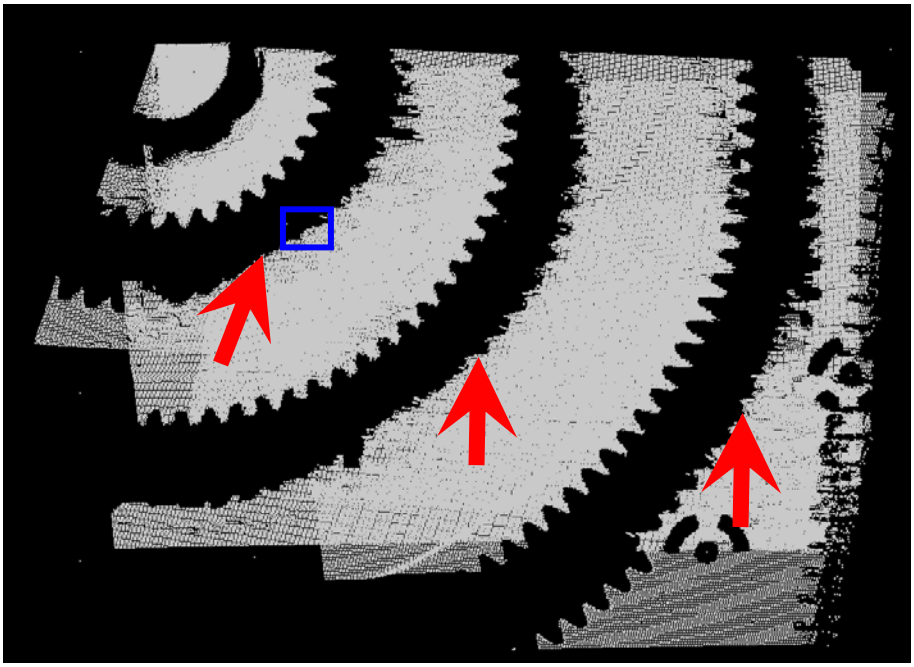
Slika 8.14. Kamera 2 kao referentna kamera

Kod 1,2,3,4 analize nije potreban nikakav fizički pomak referentne kamere ni snimanje novih snimaka jer se provodi na već postojećim snimkama. Ukoliko se kod prve analize snimljenih slika koristila gornja lijeva kamera, kao referentna kamera u ponovljenoj analizi uzima se neka druga kamera, što se ponavlja sve dok se analiza ne provede i iz posljednje, četvrte kamere. Procjena i odabir broja referentnih kamera ostavljen je mjeritelju. Procedura opisana prethodnim poglavljem zapravo je samo specijalni slučaj 1,2,3,4 analize jer se svaki njen korak može kombinirati sa 4-3-2 triangulacijom. *Slikom 8.15.* ilustrirana je 1,2,3,4 analiza samo za one točke koje su ispravno vidljive u svim kamerama, dok je slikom *8.16.* prikazana ista analiza, ali provedena sa 4-3-2 triangulacijskim postupkom. Rubovi koje u slici *8.15.* pokazuju crvene strelice, naizgled podsjećaju na zube zupčanika višeg nivoa. Međutim, između zupčanika je postojala zračnost, te zubi zupčanika na višem nivou uopće nisu dodirivali bok zupčanika na nižem nivou. Čak i da su dodirivali bok, prostor između zubiju fizički ne može biti vidljiv istovremeno u četiri kamere u pravokutnoj konfiguraciji s centralno smještenim projektorom. Rub koji pokazuju strelice zapravo je nastao prividnim zasjenjenjem nižeg nivoa višim u referentnoj kameri, kao što je to objašnjeno *slikom 8.13*. Kod ponovljene analize 1,2,3,4 metodom, strelice na slici *8.16.* pokazuju pravi rub, čiji je detalj omeđen pravokutnikom uvećano prikazan na slici *8.17*. Kroz oblak točaka naziru se siluete rubova iz slike *8.15.* Za očekivati je da će i ovaj rub barem približno izgledati kao projekcija gornjeg zupčanika na donji, ali to u ovom primjeru nije slučaj jer je kod zakreta i pomicanja projektora, a radi projiciranja horizontalnih faza, isti slučajno

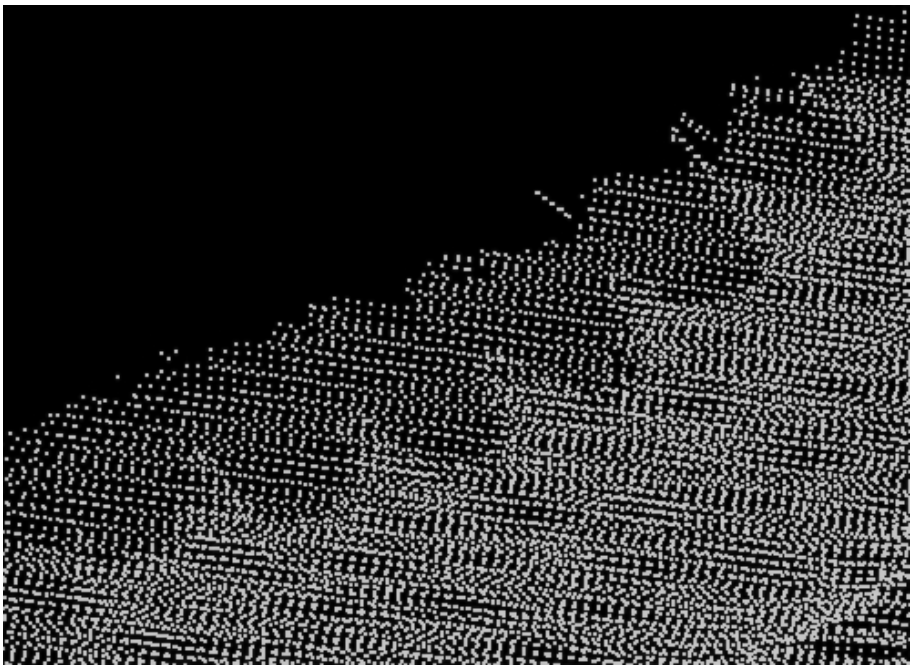
postavljen tako da su zubi s više razine bacali sjenu na nižu razinu te se izgubio oblik zuba u horizontalnoj faznoj slici. Usporedbom ovih dvaju slika proizlazi da je dodatnom 4-3-2 triangulacijom ostvarena veća potpunost digitalizacije površine za isti broj projiciranja. Osim utjecaja na potpunost digitalizacije površine dolazi i do povećanja prostorne razlučivosti i povećanja definicije detalja na površini koja je kod korištenja svih četiri referentnih kamera opisana sa četiri puta više točaka nego kod analize jednom referentnom kamerom, što je vidljivo na slici *8.18*. Prikazan je detalj površine na kojem su slijedno prema vrhu slike označene zone brojevima referentnih kamera kojima je digitaliziran pojedini detalj. Ovaj efekt povećanja prostorne rezolucije moguć je jer cjelobrojno i necjelobrojno pretraživanje kao rezultat daje necjelobrojne stereoparove, tj. prostorne položaje objektnih mjernih točaka.



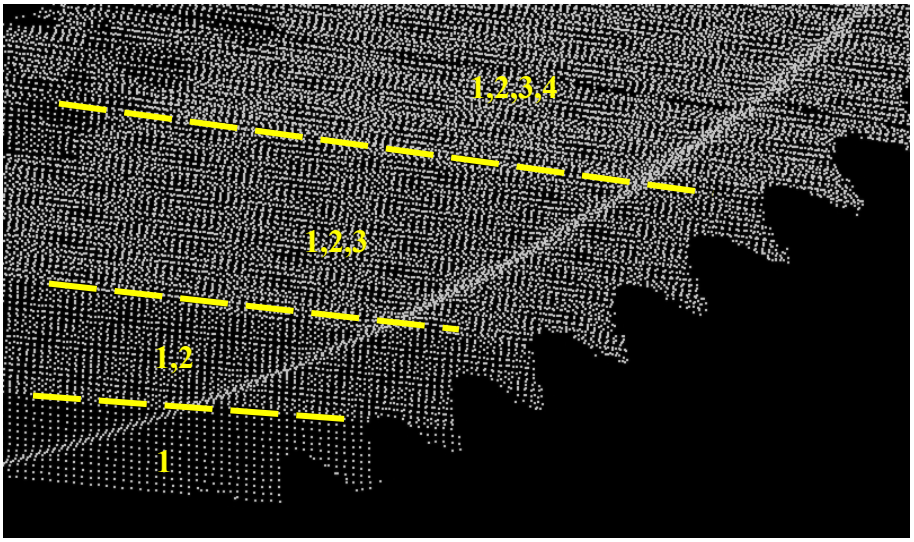
Slika 8.15. Oblak točaka koje su ispravno vidljive u sve četiri kamere izračunate preko četiri referentne kamere.



Slika 8.16. Oblak točaka za 4-3-2 triangulacijski model izračunatih preko četiri referentne kamere.



Slika 8.17. Uvećan detalj slike 8y omeđen pravokutnikom

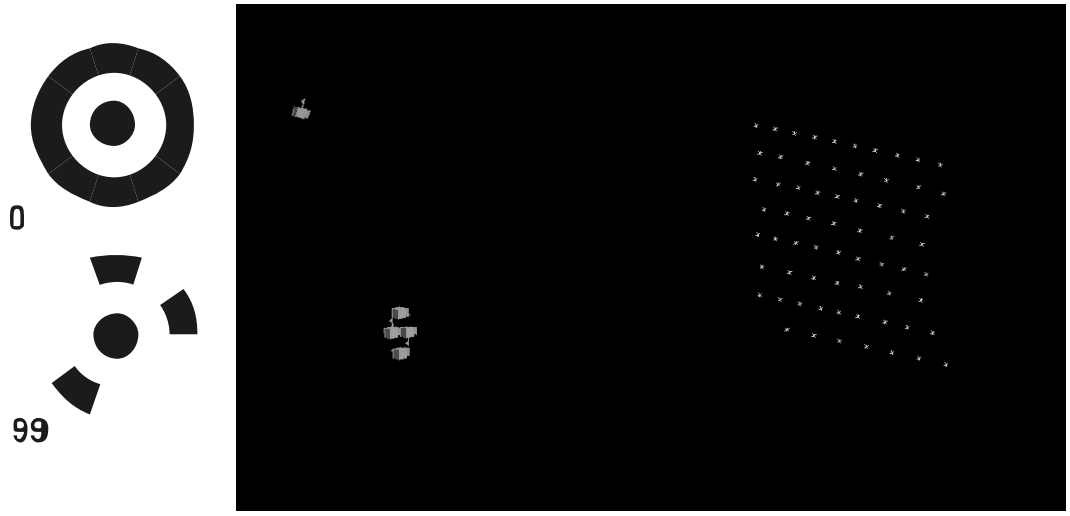


Slika 8.18. Utjecaj 1,2,3,4 analize na prostornu razlučivost

8.1.5. Volumetrijska kalibracija slobodnim kalibrom

Kalibracija sustava s više kamera koncipirana je (prema poglavlju 2.4) kao problem kod kojeg su približno poznati unutrašnji parametri pojedine kamere, a potrebno je odrediti vanjske. Unutrašnji parametri zadaju se okvirno iz tabličnih vrijednosti za odabranu kameru i žarišnu duljinu objektiva te se optimiziraju tijekom procesa kalibracije. Vanjski parametri su nepoznati i pronalaze se metodom izjednačenja zrakovnog snopa. Pasivne markacije na kalibracijskom objektu služe za rješavanje problema jednoznačnosti, kako bi se objektnim koordinatama X_i, Y_i i Z_i s lijeve strane jednadžbe 2.11 mogli ispravno pridružiti njihovi slikovni osjeti x_{ij} i y_{ij}, a u tu svrhu se ovdje koriste kodirane točke, *slika 8.19.a*. Odabrane su tamne točke na bijeloj površini okružene tamnim prstenom podijeljenim na 10 dijelova, čijim se kombiniranjem ostvaruju kodovi kojima se vrši indeksiranje 100 različitih točaka. Kod služi za automatsko indeksiranje stereopara i ne nosi drugu mjernu informaciju. Moguća je i varijanta svijetlih točaka na tamnoj površini, ali je primijećeno da se prilikom njihova ispisa, uslijed velike količine boje deformira bazni papir te dolazi do utjecaja na definiciju ruba. Komercijalni sustavi obično koriste

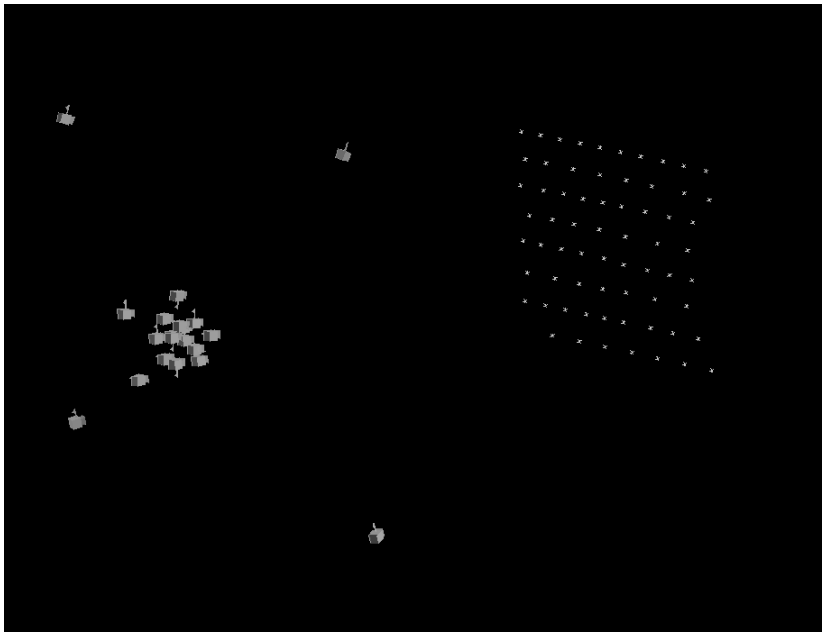
točke napravljene nekom od tiskarskih tehnika na samoljepljivoj foliji, što daje još jasniju definiciju ruba. Za svaku kodiranu točku vidljivu u kameri, prema jednadžbi 2.12. postavljaju se dvije jednadžbe veze između slikovnih osjeta i prostornih koordinata objektnih kalibracijskih mjernih točaka. Broj točaka u slici mora biti tako odabran da broj postavljenih jednadžbi bude veći od broja nepoznanica, a iskustveno se pokazalo da je za opremu korištenu u ovom radu dovoljno da je taj broj veći od 7. Raspodjela markacija na kalibracijskom objektu nije uvjetovana jednadžbom 2.11, ali za očekivati je da će konvergencija modela biti brža ako su markacije ravnomjerno raspoređene po objektu i jasno vidljive u svim snimkama. Osim povećanjem broja markacija, predefiniranost modela povećava se i korištenjem više kalibracijskih snimaka istog modela ali iz različitih prostornih položaja. Iz navedenog proizlazi zahtjev za krutošću kalibracijskog objekta i nepromjenjivošću položaja markacija tijekom provođenja procesa kalibracije. Uz pretpostavku poznatih unutrašnjih parametara i zanemarenje distorzije slike, a prema jednadžbi 2.11., kalibracijom je potrebno odrediti prostorne koordinate markera na površini kalibracijskog objekta, matricu rotacije koordinatnih sustava, te koordinate projekcijskog središta kamere X_{0j}, Y_{0j} , Z_{0j}. Korekcija mjerila provodi se pomoću kalibracijskih štapova, na temelju poznatog razmaka dvije točke. Kod kalibracije jedne kamere, ako se rješavanje metode najmanjih kvadrata na kojoj se temelji metoda izjednačenja zrakovnog snopa provodi funkcijama iz biblioteke TOM, dovoljno je snimiti četiri snimke markiranog kalibracijskog objekta iz iste pozicije, međusobno zaokrenute za približno 90° oko osi objektiva i dodatnu dislociranu snimku iz nekog prostornog položaja, što je za približno ravninski kalibracijski objekt s prostoručno zalijepljenim točkama ilustrirano *slikom 8.19.b.* Ako se odabere ravninski kalibracijski objekt i globalni koordinatni sustav postavi tako da neke dvije osi leže upravo u ravnini objekta, model se pojednostavnjuje, jer sada jedna od nepoznatih vrijednosti objektnih koordinata u jednadžbi 2.11 poprima vrijednost nula.



a) b)

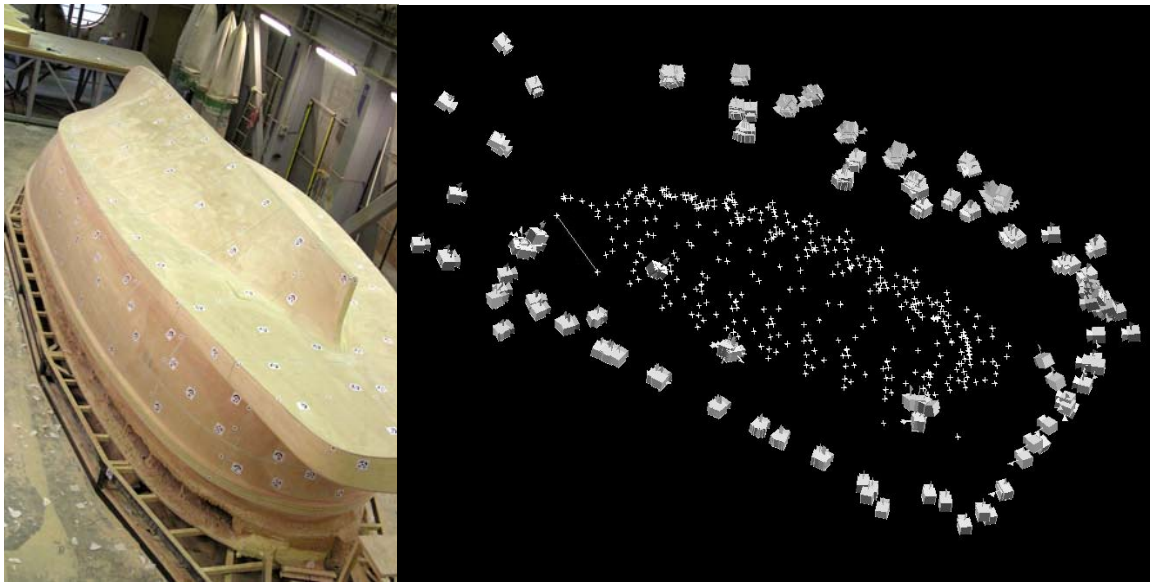
Slika 8.19. a) primjeri kodiranih točaka, b) položaji kamera pri kalibraciji jedne kamere slobodnim planarnim kalibrom

Kod istovremene kalibracije više od jedne kamere s istim kalibracijskim objektom, objektne koordinate kodiranih točaka koje ulaze u lijevu stranu jednadžbe 2.11. zajedničke su svim korištenim kamerama. Umjesto kalibracije svake kamere zasebno i dovođenja u zajednički koordinatni sustav putem markera na kalibracijskom objektu, rješavanje sustava jednadžbi može se provesti na kompletnom modelu svih korištenih kamera. Primjer kalibracije četiriju kamera slobodnim planarnim kalibrom prikazan je *slikom 8.20*. a slobodnim prostornim kalibrom *slikom 9.4.* Za kompletnu kalibraciju snimljeno je pet slika po kameri. Budući da se za svaku kameru postavljaju vlastiti skupovi prema jednadžbi 2.12, ne postoji ni uvjet da sve kamere moraju imati identične unutrašnje parametre. To znači da objektivi na svim kamerama ne moraju biti jednake žarišne duljine, ali im se ona ne smije mijenjati tijekom postupka kalibracije ni nakon njega.



Slika 8.20. Položaji kamera u odnosu na slobodni kalibar tijekom kalibracije sustava sa četiri kamere

Lijeva strana jednadžbe 2.11, odnosno metoda izjednačenja zrakovnog snopa ne zahtijeva planarni kalibracijski objekt, što je na primjeru kalibracije jedne kamere ilustrirano na polimernom modelu trupa brodice. *Slikom 8.21.a* pokazan je detalj trupa s nalijepljenim kodiranim točkama, dok je *slikom 8.21.b* prikazana prostorna raspodjela kodiranih točaka i rekonstruirani prostorni položaji kamere. U ovom slučaju cijeli model može se smatrati kalibracijskim objektom, čak i ako je gabaritima veći od trenutnog vidnog polja korištene kamere.



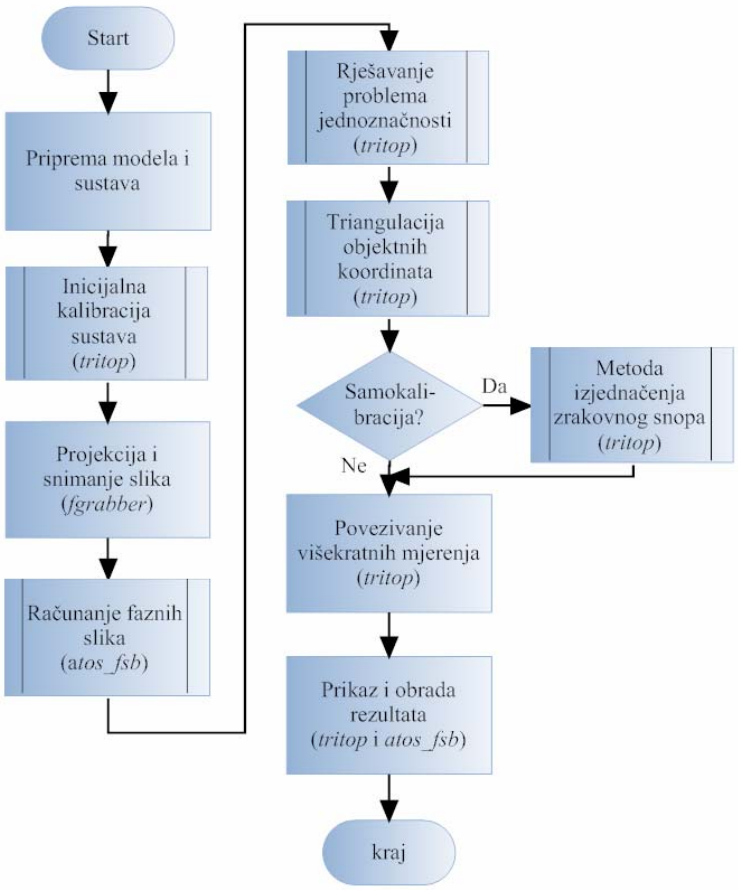
a) b)

Slika 8.21. a) detalj pripremljene površine brodice, b) oblak kalibracijskih točaka s ilustracijom položaja kamere

Pod uvjetom da su stereoparovi u korištenim kamerama pronađeni neovisno o susjednim kamerama, digitalizirane objektne točke na površni mjernog objekta mogu biti korištene kao kalibracijske točke. Neovisno o tome da li je inicijalna kalibracija provedena sa točkama na slobodnom planarnom kalibracijskom objektu ili nalijepljenim na površinu samog mjernog objekta, mjerni objekt postaje slobodni kalibracijski objekt. Broj mogućih jednadžbi prema jednadžbi 2.12 za svaku od kamera bio bi dva puta veći od broja u njoj indeksiranih stereoparova. Naknadnim provođenjem postupka izjednačavanja zrakovnog snopa, predefiniranost jednadžbi omogućit će samokalibraciju unutrašnjih i vanjskih parametara kalibracije kamere te položaja objektnih mjernih točaka.

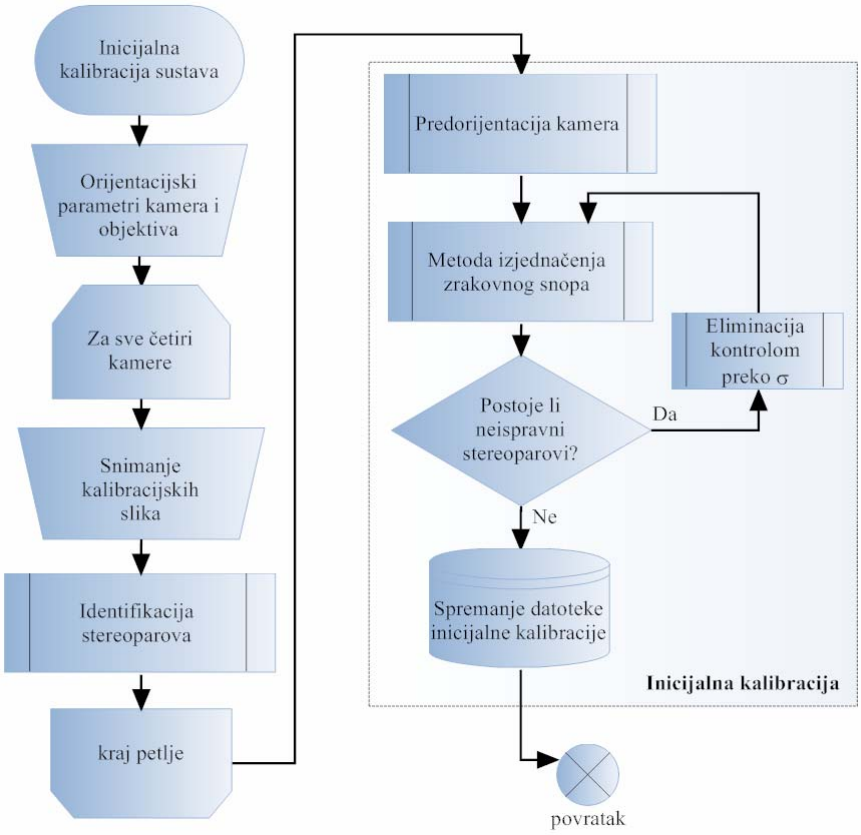
8.2. Struktura mjernog programa

Programski paket TOM sastoji se od više specijaliziranih programa koji su korišteni prilikom izrade ovog rada. *Fgrabber* je korišten za snimanje slika i predorijentaciju sustava, *Tritop* je korišten za inicijalnu kalibraciju, triangulaciju i samokalibraciju, dok je *Atos* odnosno proširena verzija *Atos_fsb* korištena za programiranje neophodnih funkcija za analizu slike. Za prikaz strukture mjernog programa odabran je pojednostavljeni prikaz preko dijagrama toka. Slikom *8.22.* prikazana je kompletna procedura od početka mjerenja do prikaza i obrade podataka. Potprogrami su označeni poljima sa dodatnim bočnim linijama, te su prikazani na zasebnim slikama.

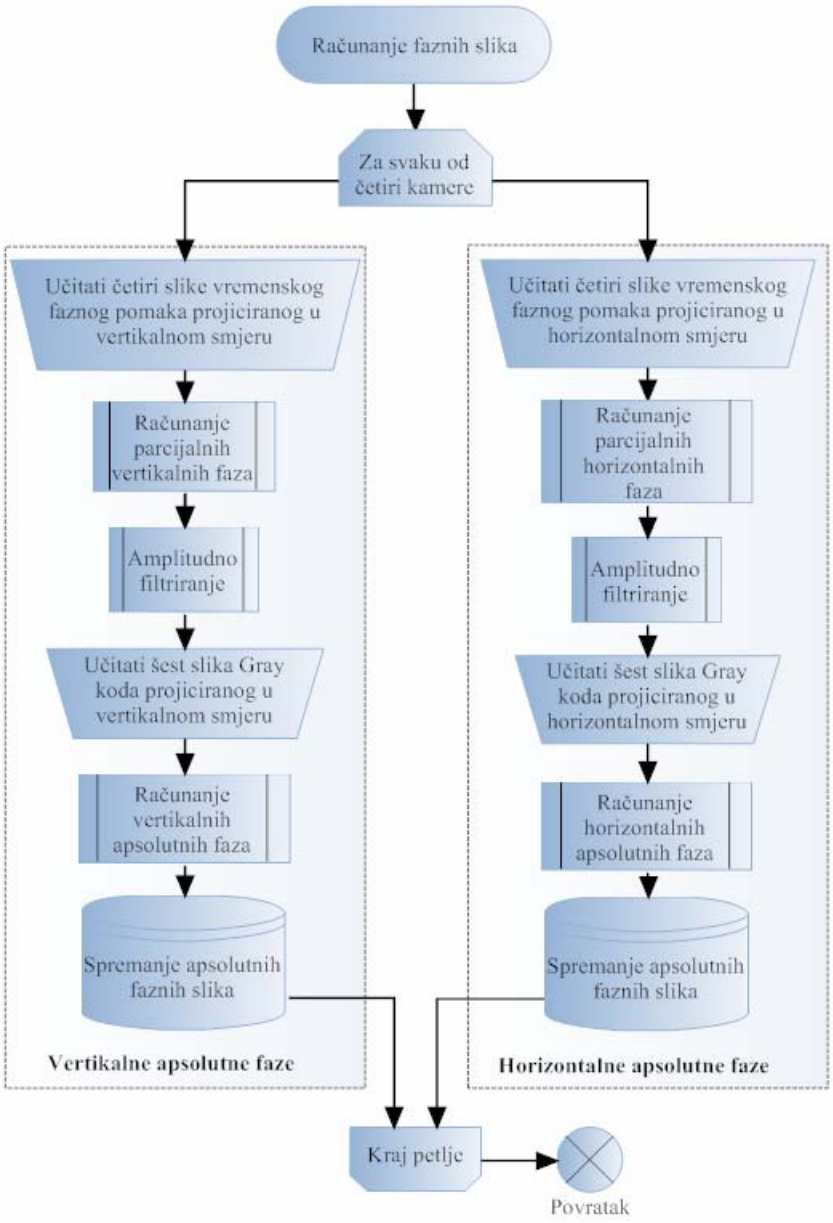


Slika 8.22. Dijagram toka mjerne procedure

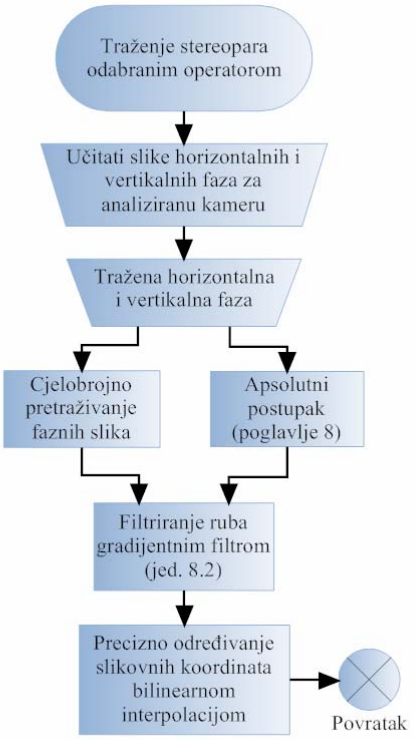
Slikom *8.23*. prikazan je tok inicijalne kalibracije sustava, *slikom 8.24*. računanje i filtriranje faznih slika, *slikom 8.25*. traženje stereoparova dok je rješavanje problema jednoznačnosti na *slici 8.26.* na *slikama 8.27.* i *8.28.* raščlanjeno prema načinima triangulacije odnosno prema načinima analize preko referentnih kamera.



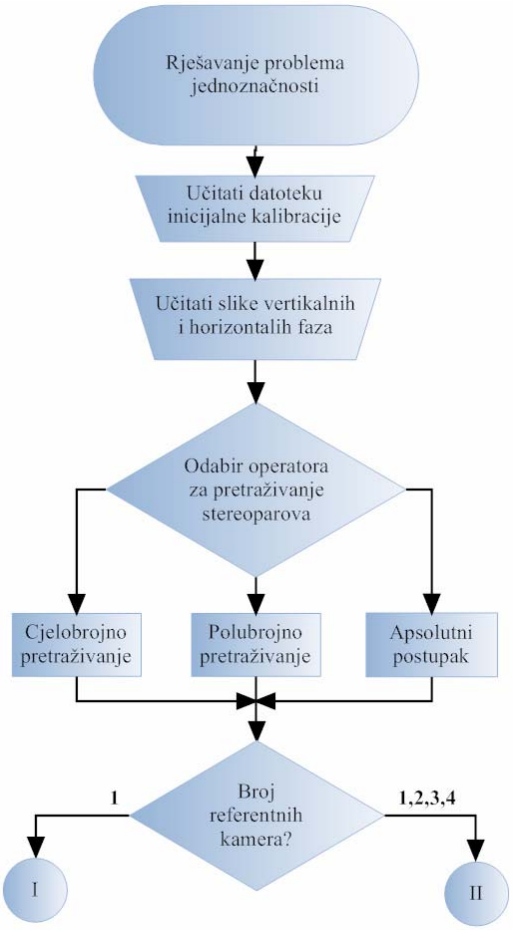
Slika 8.23. Dijagram toka inicijalne kalibracije sustava



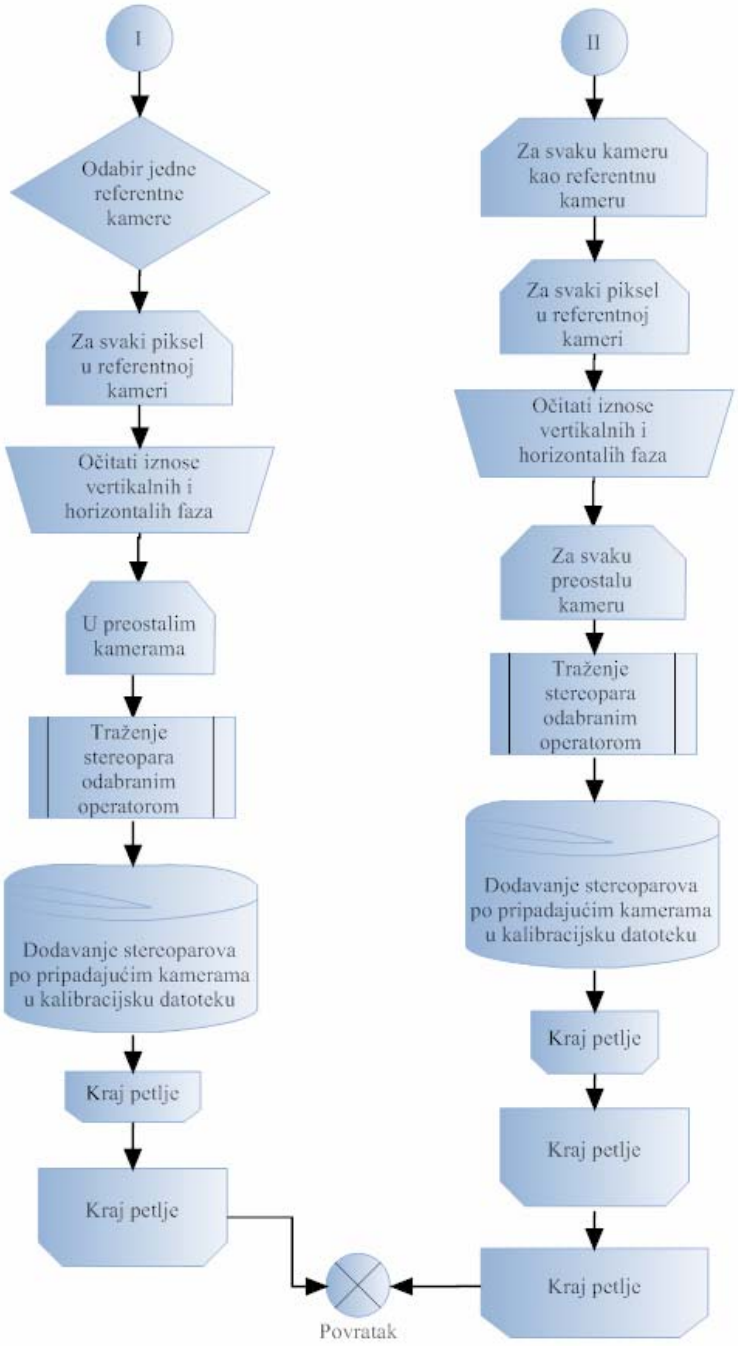
Slika 8.24. Računanje faznih slika



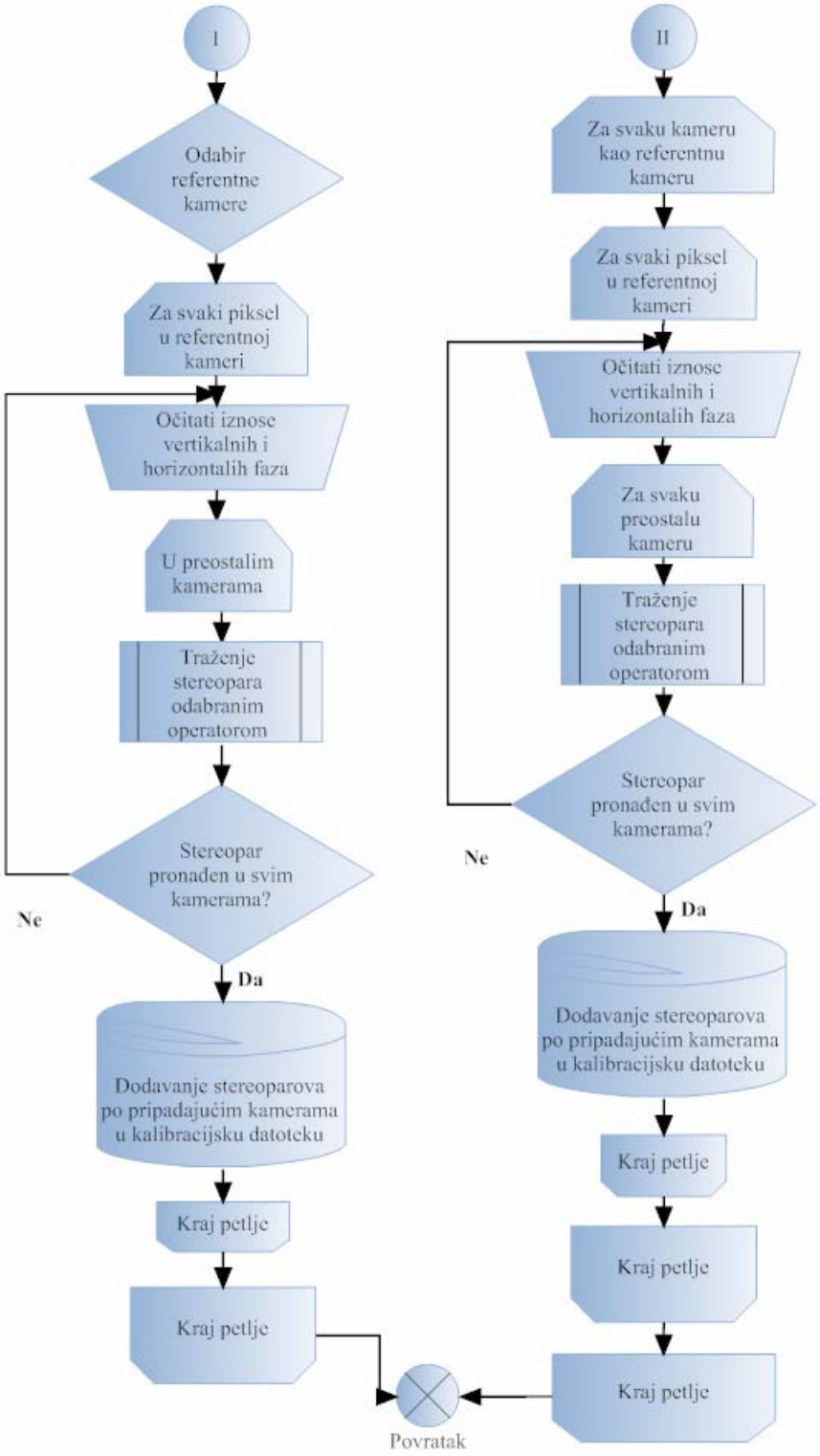
Slika 8.25. Traženje stereoparova odabranim operatorom



Slika 8.26. Dijagram rješavanja problema jednoznačnosti



Slika 8.27. Rješavanje problema jednoznačnosti u kombinaciji sa 4-3-2 metodom



Slika 8.28. Rješavanje problema jednoznačnosti ako su u sve četiri kamere ispravno pronađeni stereoparovi

8.3. Mjerna procedura

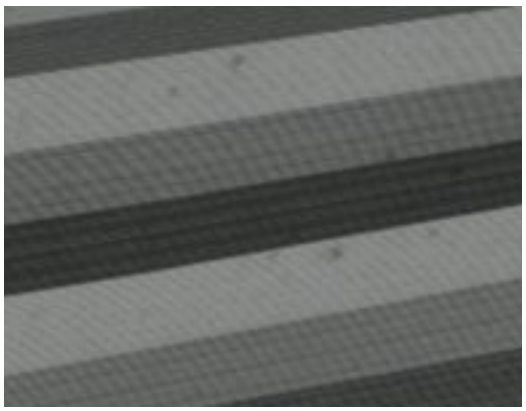
8.3.1. Priprema mjernog objekta

Postupak pripreme mjernog objekta izravno utječe na planiranje mjerenja te na rezultate i vrijeme trajanja samog mjerenja, pa je za ovu pripremnu fazu postupka digitalizacije iznimno važno izdvojiti dovoljno vremena. Planiranjem je potrebno uzeti u obzir gabarite i masu mjernog objekta kako bi se u sljedećem koraku mogla odabrati optimalna konfiguracija kamera i projektora te odabrati način ukrute. Ukruta mora pružiti stabilnost modelu tijekom procesa digitalizacije. Treba biti odabrana tako da ne zasjenjuje važne informacije na površini objekta, te da njenim pričvršćivanjem ne dođe do deformacije ili oštećenja samog objekta mjerenja. Naročitu pažnju treba posvetiti pripremi površine mjernog objekta. Reflektirajuće metalne površine treba tretirati sredstvima koja približno ostvaruju lambertsku raspodjelu reflektiranog svjetla, tako da naneseni sloj ne utječe na izmjerene dimenzije mjernog objekta ili kemijski ne reagira s materijalom modela. Ukoliko se sustav sa četiri kamere kalibrira slobodnim kalibrom, pri čemu se na površinu modela nanose kodirane točke, postupkom pripreme modela potrebno je odabrati njihov promjer i pozicije nanošenja. Promjer središnje točke kodiranog markera potrebno je odabrati tako da u snimljenoj slici sadržava barem 10 piksela. Markeri ne smiju zaklanjati površinska mjesta koja sadrže važne mjerne informacije te njihove pozicije treba odabrati tako da se prilikom nanošenja ne deformiraju ili drugačije oštete. Raspodjela markera u prostoru trebala bi biti takva da se dobro prate konture modela i da se što ravnomjernije vide u snimljenim slikama. Najpogodnije ih je postavljati na dijelove modela s ravnim plohama, a korištenjem prikladnih adaptera trebalo bi izbjegavati nanošenje izravno na izrazito zakrivljene plohe. Osim na sam mjerni objekt, u slučaju potrebe markeri se mogu postaviti i na samu ukrutu te na dodatne pozicije u prostoru oko mjernog objekta, uz uvjet da tijekom procesa digitalizacije ne dođe do međusobnog pomaka.

8.3.2. Podešavanje optičkih elemenata projektora i kamera

Postupak podešavanja optičkih elemenata sastoji se od odabira objektiva kamera i projektora, odabira konfiguracije kamera i projektora te podešavanja izoštrenosti i dubinske oštrine snimljene slike. Odabir objektiva za zadane kamere provodi se na osnovu gabarita mjernog objekta i procjene mjeritelja da li će se digitalizacija željenih informacija moći provesti u jednom ili će biti potrebno više projiciranja iz različitih orijentacija. Time će se utjecati i na ostvarene mogućnosti prostorne i mjerne rezolucije. Metoda izjednačenja zrakovnog snopa dopušta da objektivi na kamerama ne moraju biti iste žarišne duljine, ali je preporuka koristiti iste ili barem približno iste. U ovom radu korištena su dva para dostupnih objektiva: na kamere 1 i 2 stavljeni su objektivi žarišne duljine 12,5mm, a na preostale dvije kamere 12mm. Prema [16], kod objekata za čiju su digitalizaciju potrebni rasponi kalibracijskog volumena od 0,1 do 1 metra, kod sustava s dvije kamere zadovoljavajućim se pokazao objektiv žarišne duljine 12mm, pa analogno vrijedi i za sustave s više kamera kod pravokutne konfiguracije kamera. Odabrano je postavljanje kamera na tronožne stative u pravokutnu horizontalnu konfiguraciju, prema poglavlju 8.1.2.1. Udaljenost od mjernog objekta izračunava se prema jednadžbi 8.1**.** Projicirani uzorak potrebno je ispravno snimiti te je sljedeći korak izoštravanje slike. Radi se o subjektivnom postupku podešavanja parametara objektiva o kojem izravno ovisi kvaliteta snimljene snimke i rezultata mjerenja, a koji dodatno ovisi i o kvaliteti fokusa monitora na mjernom računalu. Postupak izoštravanja slike potrebno je provoditi pravilno udaljenom kamerom, približno okomitom na površinu mjernog objekta. Ukoliko objekt nije planaran, izoštravanje na površinu najbližu kameri negativno bi utjecalo na dubinsku oštrinu. Stoga su kamere korištene u ovom radu izoštravane prema ravnoj plohi postavljenoj približno na polovicu visine mjernog objekta, čija visina nije prelazila 60mm te nije prelazila veličinu trenutnog mjernog volumena sustava. Današnje rezolucije monitora veće su od rezolucije korištenih kamera te je prikladno promatrati sliku iz kamere u realnoj veličini. Jedan od načina podešavanja izoštrenosti kamere je uz pomoć bijelog papira na koji je otisnut crni tekst. Blenda kamere otvori se na maksimalan iznos i mijenja se oštrina objektiva dok tekst postane najčitljiviji, te se vijcima pažljivo fiksira objektiv u tom položaju. Eliminacija subjektivnog osjećaja mjeritelja moguća je

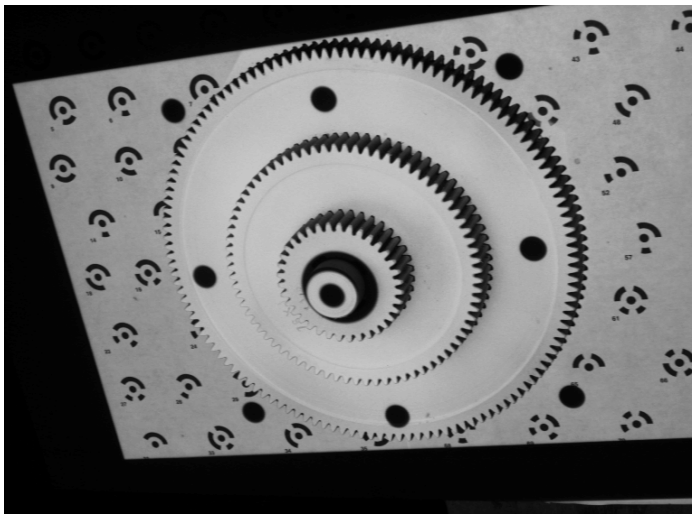
korištenjem *moiré efekta.* U tu svrhu dovoljno je na papir ispisati uzorak koji se sastoji od snopa gustih tankih paralelnih linija, s variranjem njihova razmaka. Ukoliko dođe do interferencije snopa paralelnih linija koje tvore fizički pikseli u kameri s amplitudno moduliranim paralelnim linijama na papiru, dolazi do njihove demodulacije. Tada na monitoru računala postaju vidljive interferencijske linije, koje su jasno vidljive upravo u trenutku optimalne izoštrenosti, što je ilustrirano *slikom 8.29.* Ako se za prikaz svakog snimljenog piksela ne koristi upravo po jedan fizički piksel na monitoru, doći će i do pojave dodatnog *moiré efekta* između piksela u kameri i ekrana, pa u tom slučaju izoštravanje nije moguće ispravno provesti. Ovaj način izoštravanja osjetljiv je na eventualnu trešnju objektiva te se pokazalo optimalnim mijenjati izoštrenost u nekoliko koraka kako bi se dopustilo kameri i stativu da se stabiliziraju. Pritom otvor blende nije nužno maksimalno otvoriti.



Slika 8.29. Primjena moiré efekta prilikom izoštravanja kamera

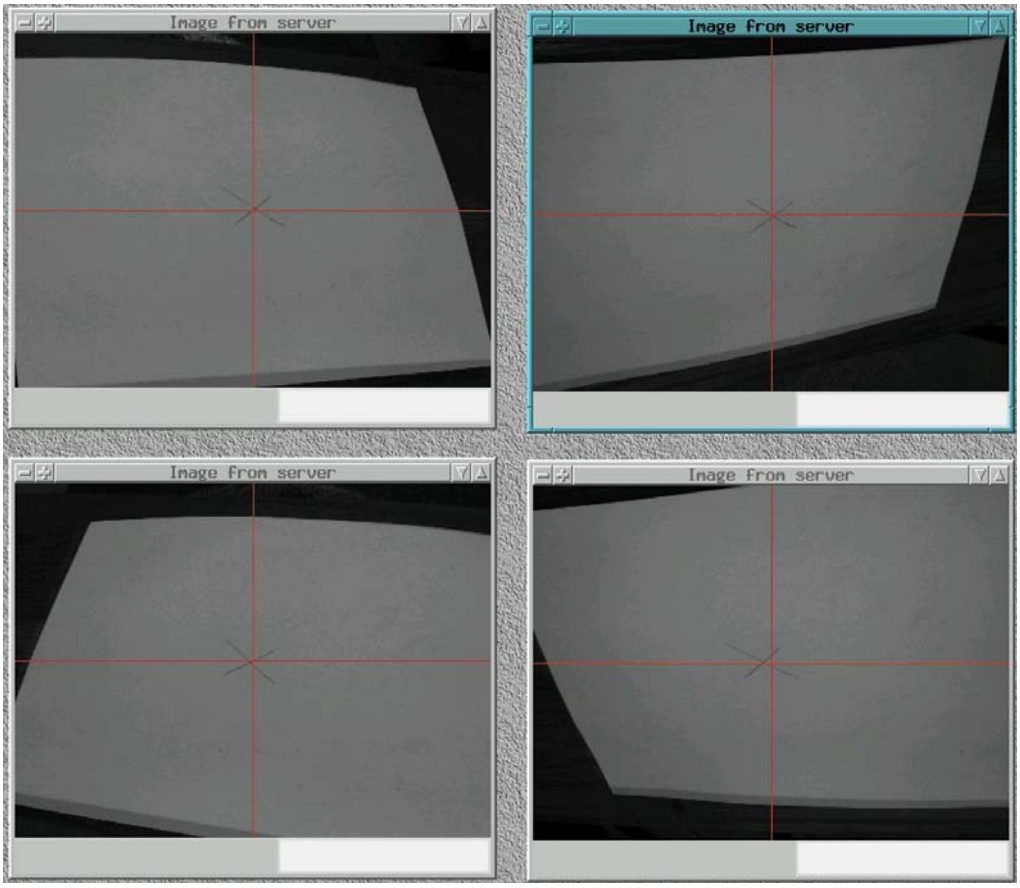
Izoštrenost projektora mogla bi se provesti postupkom analognim opisanom, ako bi se snop linija iz vremenskog faznog pomaka projicirao na papir sa sličnim snopom zakrenutim za neki mali kut. Međutim, dulje gledanje izravno u projicirani gusti snop linija kod većine ljudi izaziva nelagodu te stoga ovdje nije primjenjivana takva vrsta izoštravanja. Stakalce kod korištenog projektora izvedeno je tako da stvara približno sinusoidalan snop projiciranih linija te se one zbog nedostatka oštrog ruba ne mogu koristiti za ocjenu izoštrenosti. U tu svrhu korišten je dio stakalca s rozetom od devet kružnih točaka oštrog ruba. Središnja točka ima i dodatni tamni prsten, kao što je to

vidljivo na *slici 8.30***,** a subjektivno izoštravanje projektora provodi se s maksimalno otvorenom blendom rotiranjem prstena za izoštravanje sve dok rubovi većine točaka ne izgledaju podjednako oštro definirani.



Slika 8.30. Projekcija 9 točaka za izoštravanje projektora

Nakon što je fiksirana oštrina projektora, pritvaranjem otvora blende dubinska oštrina projiciranih linija dodatno se povećava. Postupak izoštravanja kamera i projektora proveden je sa 75 % ukupne snage projektora kako bi se sačuvala rezerva snage u slučaju potrebe, te smanjilo zagrijavanje projektora i stakalca s uzorkom. Blenda na kamerama podešena je promatrajući projicirani uzorak vremenskog faznog pomaka, a provedena je tako da svjetloća vidljivih svijetlih i tamnih linija u konačnim snimkama leži u granicama između 30 i 230.



Slika 8.31. Podešavanje orijentacije četiriju kamera

Za olakšavanje relativne prostorne orijentacije kamera uvedena je dodatna funkcija *"Podešavanje kamera",* koja na ekranu omogućava istovremeno promatranje žive slike iz svih korištenih kamera, *slika 8.31*. Centar svake slike jasno je označen presjecištem horizontalne i vertikalne linije, te je sada jednostavno prilagoditi orijentaciju kamera tako da im se približno poklapaju središta snimljene slike. Dovoljno je približno na polovicu visine mjernog objekta (tj. trenutnog mjernog volumena sustava) postaviti papir (čije se dimenzije poklapaju s gabaritima projiciranog uzorka projektora) označen križićem ili nekom drugom markacijom, koji se poklapa sa središtem projiciranog rastera. Slobodnim pomicanjem svake od kamera križić na papiru dovodi se u sredinu pojedine slike, kao što je ilustrirano *slikom 8.31*.

8.3.3. Određivanje unutrašnjih i vanjskih parametara odabranog matematičkog modela postupkom inicijalne kalibracije

Postupku kalibracije unutrašnjih i vanjskih parametara pri korištenju četiriju ili više kamera prethodi snimanje kalibracijskih snimaka za svaku od kamera. Minimalan potreban broj snimaka po kameri je pet. Snimanje se provodi kamerom i objektivom koji se podešavaju prema naputcima iz prethodne točke. Postupak je identičan neovisno o tome da li su kalibracijske točke nalijepljene na planarnu ploču ili izravno na površinu mjernog (tj. kalibracijskog) objekta. Za očuvanje istih uvjeta osvjetljenja i dubinske oštrine kao kod kasnije digitalizacije površine, osvjetljenje kalibracijskog objekta provodi se Atos projektorom s transparentnim stakalcem. Prve četiri snimke u svakoj od kamera snimaju se kamerom okomitom na mjerni objekt, rotiranjem kamere oko osi objektiva za 90°. Pritom treba voditi računa o zadržavanju ispravne udaljenosti kamere od kalibracijskog objekta. Budući da korišteni stativi i fotografske glave na koje su učvršćene kamere ne dopuštaju ovu rotaciju, ukoliko to dopušta ukruta i masa kalibracijskog objekta, umjesto kamere rotira se kalibracijski objekt. Postupak snimanja kalibracijskih snimaka jednostavnije je provesti ako je odabrana horizontalna postava kod koje je kamera usmjerena vertikalno prema dolje na kalibracijski objekt. Snimanje posljednje snimke provodi se upravo iz pozicija iz kojih će kamere tijekom provođenja postupka digitalizacije promatrati površinu mjernog objekta. Snimanje kalibracijskih snimki provodi se programom za akviziciju slike *Fgrabber,* a potom slijedi postupak kalibracije metodom izjednačenja zrakovnog snopa programom *Tritop*. Korištena verzija paketa TOM nema opciju kontrole kamera i snimanja paketom *Tritop* jer je sustav predviđen za korištenje s ručnim kamerama. Postupak obuhvaća generiranje projekta sa četiri kamere kojima se dodjeljuju približni unutrašnji parametri. U projekt se po pripadajućim kamerama potom učitavaju kalibracijske snimke. Projekt se obrađuje kao klasičan fotogrametrijski projekt, najprije se provodi aproksimativna predorijentacija kamera na temelju približnih unutrašnjih parametara. Slijedi postupak izjednačavanja zrakovnog snopa u kojem se, sukladno jednadžbi 2.11, precizno izračunavaju prostorne koordinate kalibracijskih točaka, unutrašnji i vanjski parametri kamera. Potom se odbacuju eventualni neispravno prepoznati stereoparovi i ponavlja se postupak

izjednačavanja zrakovnog snopa. Projekt s podacima o kamerama i mjernom objektu sprema se u datoteku koja će prilikom određivanja objektnih točaka poslužiti kao kalibracijska datoteka.

8.4.3. Rješavanje problema jednoznačnosti projiciranjem unakrsno kodiranog svjetlosnog uzorka

Nakon što su provedeni postupci planiranja i nanošenja kodiranih točaka, kalibracija kamera i eventualno tretiranje površine, provodi se postupak uparivanja piksela koji promatraju istu točku na površini, poznat kao rješavanje problema jednoznačnosti. U jednadžbi 2.11 sada su poznati parametri koji za neku kameru opisuju unutrašnje i vanjske parametre te još jedino treba pronaći ispravne slikovne koordinate stereoparova kako bi se mogli triangulirati položaji objektne mjerne točke. U tu svrhu koristi se projekcija svjetlosnog uzorka. Pripremljeni model (sa ili bez kodiranih točaka) postavlja se u vidno polje kamera, pazeći da se ne pokvari njihova kalibracija. Ukoliko je kalibracija provedena slobodnim kalibrom, mjerni objekt već se nalazi u vidnom polju kamera. Unakrsno se slijedno projiciraju uzorci vremenskog faznog pomaka i uzorci Gray koda i istovremeno snimaju svakom od kamera. Zbog nepostojanja stakalca s kodovima u oba smjera, projektor je učvršćen na kranskom stativu, te ga je kod projiciranja dodatnih okomitih kodova potrebno rotirati oko osi objektiva. Os rotacije korištene pomične glave nije se poklapala s osi objektiva projektora, stoga je bilo potrebno dodatno pomicati projektor i stativ kako bi se ostvario približno okomiti raster, pazeći da se ne poremeti kalibracija kamera i optika projektora. Korištena verzija paketa TOM nekompatibilna je s upravljačkim protokolom zamjenske upravljačke jedinice te je pomak stakalca projektora na upravljačkom računalu provođen ručno, u novijoj verziji programa *Atos*. Stoga je i usporedno snimanje svim kamerama moralo biti provedeno na mjernom računalu paketom *Fgrabber*. Iz 20 snimljenih slika po kameri računaju se apsolutne vertikalne i horizontalne fazne slike, funkcijom *"Korigirane apsolutne faze"*. Ovisno o korištenom modelu analize, a s obzirom na broj referentnih kamera, potrebno je u jednoj kameri (gornja lijeva) odabrati područje u kojem će se provesti analiza. Slijedi

automatizirani postupak prepoznavanja stereoparova prema poglavlju 8.1.4. koje se potom dodaje u kalibracijsku datoteku prema pripadajućim kamerama.

8.3.5. Računanje objektnih koordinata

Za svaki ispravno kodirani piksel u nekoj kameri kojem su prethodnim postupkom pronađeni pripadajući stereoparovi, moguće je, prema relaciji 2.12, postaviti dvije jednadžbe. Kod sustava sa četiri kamere, ako je točka vidljiva u svim kamerama, radi se o osam jednadžbi naspram tri tražene koordinate objektne mjerne točke. Postupak računanja objektnih koordinata provodi se paketom *Tritop*. Nakon učitavanja datoteke sa stereoparovima raspoređenim po kamerama, potrebno je odabrati način triangulacije (prema poglavlju 8.1.4.1). Slijedi računanje objektnih točaka koje se u objektni prostor pozicioniraju na temelju podataka o unutrašnjim i vanjskim parametrima kamere, ostvarenim inicijalnom kalibracijom. Kalibracija je provedena u nekom konačnom broju diskretnih točaka, te se može dodatno optimizirati provođenjem ponovne procedure izjednačenja zrakovnog snopa, uzimajući kao kodirane točke i točke dobivene projiciranjem na površinu mjernog objekta. Pronalazak stereoparova ne ovisi o inicijalnoj kalibraciji, te mjerni objekt kod ponovljene procedure izjednačenja zrakovnog snopa preko samo nekih ili pak svih stereoparova postaje zapravo slobodni kalibracijski objekt, a metoda samokalibrirajuća.

8.3.6. Povezivanje rezultata mjerenja iz različitih orijentacija mjernog objekta

Pod pretpostavkom da nije došlo do relativnog pomaka kalibracijskih točaka i površine mjernog objekta, te ako u jednom koraku nije bilo moguće digitalizirati kompletnu željenu površinu mjernog objekta, kodirane točke preko kojih je provedena inicijalna kalibracija mogu se iskoristiti i za povezivanje oblaka točaka iz dvaju ili više odvojenih mjerenja u zajednički koordinatni sustav. Na mjestima na površini mjernog objekta koja

su bila opetovano digitalizirana u uzastopnim mjerenjima dolazi do preklapanja oblaka točaka. Ukoliko je u različitim mjerenjima došlo do pogrešaka prilikom određivanja položaja kodiranih točaka, preklopljeni oblaci bit će netočno repozicionirani. Ukoliko postoji preklapanje izmjerenih oblaka, nakon predorijentacije preko kodiranih točaka sustav omogućuje i dodatnu registraciju oblaka preko svih preklapajućih točaka. Na taj način smanjuje se utjecaj operatora za određivanje položaja kodiranih točaka na točnost relativnog pozicioniranja oblaka, ali se produljuje vrijeme analize.

8.3.7. Prikaz i obrada rezultata mjerenja

Programski paket *Tritop* u verziji 4.4.8, kojim je provedena triangulacija, nije predviđen za prikaz osjenčanih površina, te se koordinate objektnih točaka prema potrebi mogu prebaciti u format prikladan za učitavanje u standardni paket *Atos* funkcijom *"Points to cloud"*. Osnovne operacije s oblakom točaka, kao što su npr. uklanjanje viška točaka, poligonizacija, rezanje slojeva, mogu se provesti paketom *Atos* v4.4.8, dok novije verzije donose naprednije alate za obradu oblaka i približavaju se današnjim profesionalnim CAD paketima koji sve češće mogu učitavati *Atos* poligonizirane površine.

8.4. Korištena oprema

Digitalizacija slike provedena je sa četiri identične industrijske kamere, 8-bitne (256 razina svjetloće) monokromatske analogne Sony XC-75CE, temeljene na CCD čipu rezolucije 768*572 piksela. Konverzija intenziteta svjetla u digitalni signal provodi se preko 4-kanalnog 8-bitnog ICPCV digitalizatora ugrađenog u mjerno računalo. Na kamere su montirana dva para Cosmicar/Pentax objektiva B1218-2 KA i H1212B(TH). Prostorni položaji i orijentacije kamera fiksirani su sa četiri Manfrotto 55PROB tronožna stativa, dok je projektor postavljen na jednostupni kranski Plaubel stativ. Projektor koristi nekoherentni halogeni izvor svjetla jačine 200W, opremljen sa Schneider/Cinegon

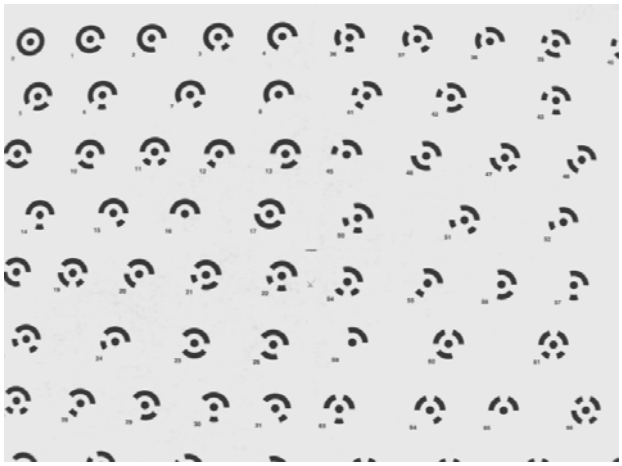
objektivom žarišne duljine 12mm. Rasterska struktura na stakalcu izvedena je s približno sinusoidalnim prijelazom ruba (svaka se linija zapravo sastoji od snopa linija različitih debljina, kako bi se dobio privid sinusoidalnosti). Time su se smanjile pogreške pri rekonstrukciji parcijalnih faza u odnosu na prethodni sustav, čije su linije imale oštre rubove. Površina mjernog objekta tretirana je tankim slojem titan-dioksida u prahu. Programiranje neophodnih funkcija za mjerenje i analizu slike provedeno je u programskom jeziku C, koristeći funkcije Toolkit for Optical Measurements (TOM), verzije 4.4.8, proizvedenog u GOM m.B.H, koji je izvršavan na Linux pogonjenom Athlon 800MHz računalu s 128Mb radne memorije. Upravljanje projektorom provedeno je sa standardnim paketom *Atos* verzije 5.3.0-8.

9. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio sadržajno je podijeljen u dva dijela. U prvom dijelu testirani su utjecaji kalibracijskog objekta, broja i raspodjele kamera na parametre kalibracijskog sustava s više kamera. Drugim dijelom obuhvaćena je digitalizacija općenitih površina projekcijskim sustavom sa četiri kamere. Mjerni objekti odabrani su tako da ilustriraju granične situacije koje se mogu pojaviti u mjernoj praksi. Provedena je digitalizacija piramidalne konstrukcije, polukugle, modela ljudske glave u realnoj veličini te realnog strojnog elementa. Predmeti mjerenja odgovarajuće su temperirani, tj. usklađeni s temperaturnim stanjem mjernog senzora. Temperatura u laboratoriju iznosila je 24°C uz vlažnost zraka od 60%, a prostorija u kojoj je provođeno mjerenje bila je zatamnjena kako bi sva mjerenja bila provedena u podjednakim uvjetima.

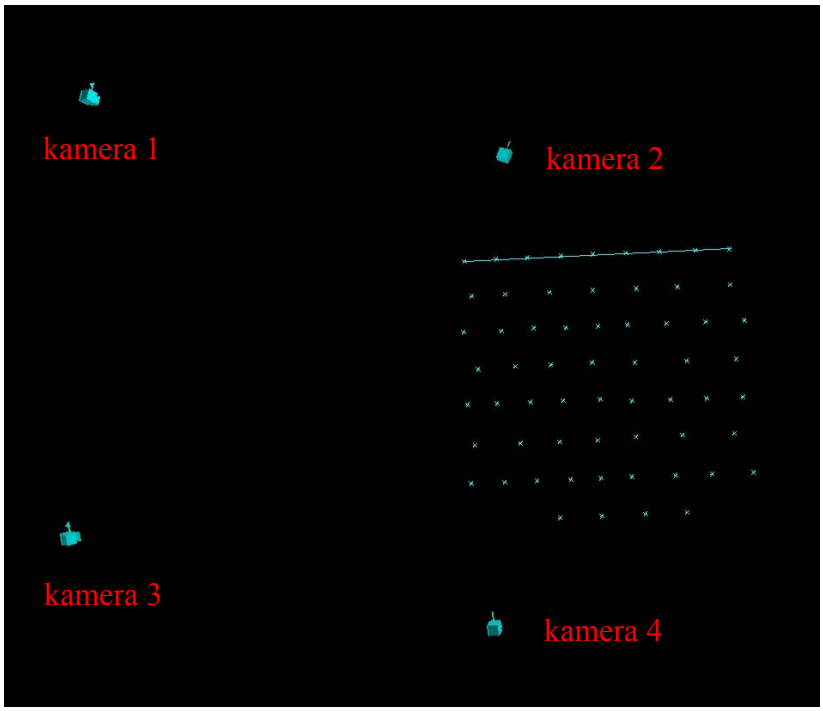
9.1. Kalibracija planarnim kalibrom

Standardni sustav *Atos* druge vrste za kalibraciju kamera koristi planarni kalibracijski objekt, stoga će se u prvom eksperimentu na primjeru planarnog kalibra analizirati utjecaj dodavanja dodatnih kamera u kalibracijski model, baziran na metodi izjednačavanja zrakovnog snopa. *Slika 9.1.* pokazuje detalj korištenog kalibra, s prostoručno raspoređenim crnim kodiranim točkama, gdje je promjer središnje točke 4mm. Točke su otisnute ink-jet printerom u rezoluciji 1200 dpi na samoljepljivi papir, a zatim nalijepljene na krutu nosivu ploču. Ploča je učvršćena u horizontalnoj ravnini i snimana sa četiri kamere u konvergentnoj pravokutnoj postavi, ali je radi jasnije vidljivosti pojedinih kamera u shematskoj *slici 9.2.* odabran prikaz modela kod kojeg se model prividno nalazi u vertikalnoj ravnini. Kamere označene brojevima 1 do 4 ilustriraju prostorne položaje kalibriranih kamera iz kojih će se snimati projicirani uzorak.



Slika 9.1. Detalj planarnog kalibracijskog objekta

Za svaku od kamera snimljeno je pet kalibracijskih snimaka. Od toga su četiri snimke snimljene kamerom orijentiranom okomito na kalibracijsku ploču, koja je slijedno zakretana za 90° oko osi okomite na ravninu ploče, a koja se približno poklapala s osi objektiva. Zadnja snimka snimljena je iz onog relativnog prostornog položaja kamere iz kojeg će se tijekom mjerenja oblika snimati projicirani uzorci. Vanjski parametri orijentacije podešeni su iskustveno, tako da svaka od kamera vidi gotovo cijelo projicirano područje i što veći broj točaka, kao što je to opisano u poglavlju 8.1.2.1. Udaljenost kamera od mjernog objekta određena je prema jednadžbi 8.1. Vanjski parametri kalibracije definirani su trenutnom postavom kamera, a unutrašnje određuju odabrani parametri objektiva. Svi eksperimenti u ovom radu provedeni su s identičnim kamerama (poglavlje 8.4), na koje su fiksirana dva para objektiva: na kamerama 1 i 2 objektivi žarišne duljine 12,5 mm, a na kamerama 3 i 4 objektivi žarišne duljine 12 mm. Za gornju postavu sustava analiziran je utjecaj broja korištenih kamera na karakteristične unutrašnje parametre objektiva: konstantu kamere i položaj glavne točke snimanja te njihove devijacije. Za zadani kalibracijski objekt provedena je kalibracija u tri koraka: najprije su kalibrirane dvije kamere (prvi par čine kamere 1 i 2), te su u sljedeća dva koraka ovom paru dodavane kamere 3 i 4. *Tablicom 9.1.* dan je prikaz unutrašnjih parametara za svaku od korištenih kamera i za svaki od tri slučaja kalibracije.



Slika 9.2. Kalibracija planarnim kalibrom

Kamera	Broj kamera	c	σ_c	x_H	σ_{xH}	y_H	σ_{yH}
1	2	1346,8966	2,8829	25,8013	1,4146	18,1602	1,2141
	3	1497,1084	19,9117	-8,1505	6,0388	24,7959	8,8136
	4	1510,336	18,4592	-5,2187	5,6692	18,5836	8,2962
2	2	1583,677	4,032	64,6149	1,8173	-77,5515	1,679
	3	1558,041	21,6884	-38,9046	8,0421	-14,0665	11,4046
	4	1549,139	21,2381	-36,2046	7,8653	-11,1967	11,1571
3	3	1477,3326	18,9782	12,6867	7,2529	-14,3472	5,0855
	4	1473,7702	17,2168	11,785	6,5611	-14,1549	4,6139
4	4	1486,267	23,1639	0,5259	9,7208	-2,1046	10,6625

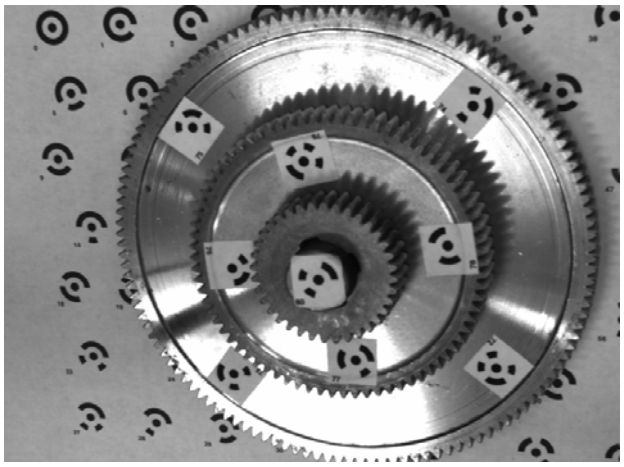
Tablica 9.1. Unutrašnji parametri za slučaj kalibracije planarnim kalibrom, izraženi u pikselima

Kalibracija sustava polazi od orijentacijskih vrijednosti konstante kamere *c*: za odabranu kameru i objektiv od 12,5 mm konstanta kamere iznosi 1470,59 piksela, dok za objektiv od 12 mm iznosi 1411,76 piksela. Također se pretpostavlja da se položaj glavne točke snimanja *H* poklapa sa središtem čipa u kameri. Zbog sličnosti objektiva, za očekivati je da će konstante kamere za svaki od parova objektiva biti slične, te da će za prvi par biti

veće nego za drugi par kamera. Položaj glavne točke snimanja ne može se sa sigurnošću procijeniti. Usporedimo li kalibriranu konstantu kamere za kamere 1 i 2, u sva tri slučaja kalibracije vidljivo je da za kameru 1 dodavanjem dodatnih kamera postoji konvergencija prema 1510 piksela, odnosno 1549 piksela za kameru 2. Uzme li se u obzir kalibracija s dvije kamere, kod koje je konstanta kamere 1 iznosila 1346 piksela, očito je postojanje još nekog utjecaja na kameru 1, čiji se utjecaj smanjuje dodavanjem dodatnih kamera, ali ga na temelju ovih vrijednosti nije moguće objasniti. Konvergencija je brža kod kamere 2 nego kod kamere 1, te bi kod sustava koji bi digitalizaciju provodio samo prvim parom kamera postojala znatna razlika u konstantama kamera, 1346 piksela kod kamere 1 naspram 1583 piksela kod kamere 2. Devijacije vrijednosti konstante kamere pokazuju skok nakon dodavanja treće kamere, ali se s prirastom broja kamera stabiliziraju. Zbog načina provođenja eksperimenta, za kamere 3 i 4 postoji manje podataka, ali je zamjetna brža konvergencija i bolje poklapanje konačne vrijednosti konstante kamere: od 1473 piksela kod kamere 3 naspram 1486 piksela kod kamere 4. Konačne vrijednosti devijacije usporedive su s prvim parom kamera, čak i kada usporedimo lijevi par kamera 1 i 3 s desnim parom. Kod korištenja idealno izrađenih i postavljenih optičkih elemenata i čipa u kameri, ako uzmemo da je slikovni koordinatni sustav u sredini čipa, položaj glavne točke snimanja poklopio bi se upravo s ishodištem ovog koordinatnog sustava. Budući da je poznato da parametri kamere i intenzitet osvjetljenja utječu na unutrašnje parametre kalibracije, nije moguće dati ocjenu položaja glavne točke snimanja samo na osnovu izmjerenih podataka. No, može se pretpostaviti da bi devijacija položaja glavne točke snimanja s obzirom na red veličine trebala sadržavati pravilnost. Zanemarimo li slučaj prvog para kamera kod kojeg su ove devijacije znatno manje nego u sljedećim slučajevima, zamjetno je da s dodavanjem novih kamera i devijacije koordinata glavne točke snimanja pokazuju tendenciju smanjenja.

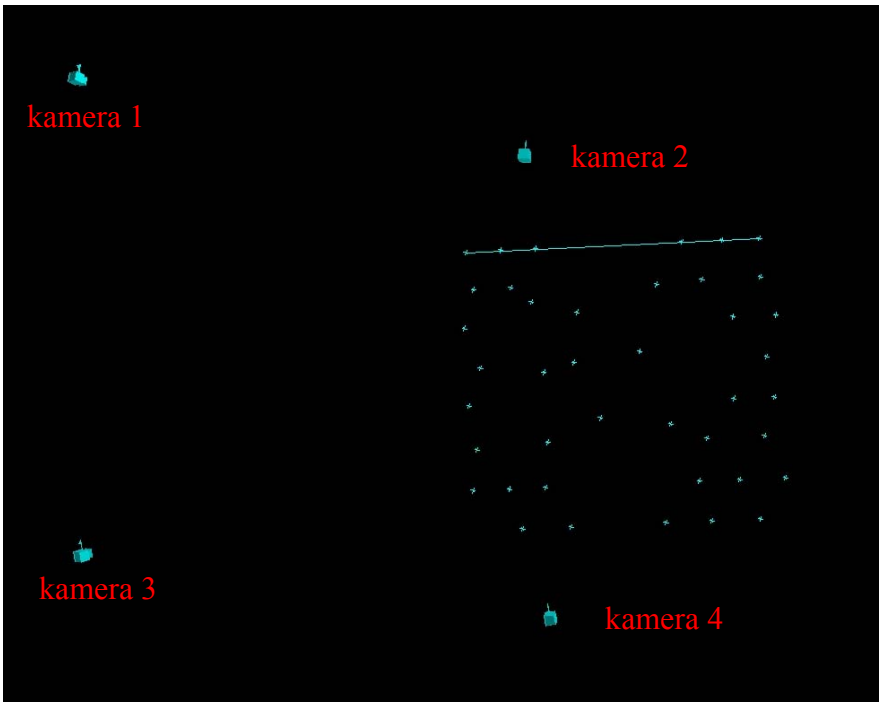
9. 2. Kalibracija slobodnim prostornim kalibrom

Dvostrukim projiciranjem kodiranog svjetla svaka točka na mjernom objektu može se smatrati kodiranom točkom, odnosno, kompletna površina modela može se koristiti kao slobodni kalibar. Međutim, zbog ovisnosti korištene verzije programskog paketa TOM o računalnim komponentama, koje se u usporedbi s danas dostupnim komponentama s pravom mogu nazvati zastarjelim, samokalibrirajući korak ponavljanjem metode izjednačavanja zrakovnog snopa nije se mogao provesti na kompletnom modelu. Stoga će se ovaj dio eksperimenta ograničiti na slobodni kalibar definiran preko diskretnih kodiranih točaka, simetrično raspodijeljenih po volumenu modela. Simetričnost raspodjele točaka doprinijela je pojednostavnjenju planiranja kalibracije i istovremeno osigurala ravnomjernu raspodjelu točaka po površini modela. *Slikom 9.3.* prikazan je piramidalni model koji se sastojao od tri zupčanika na zajedničkom vratilu, čija ukupna visina nije prelazila 60 mm. Osim devet kodiranih točaka na samom modelu, postavljene su dodatne točke i na nosivu ploču.



Slika 9.3. Prostorni kalibar s kodiranim točkama

Kalibracija je provedena istovjetno kao u prethodnom eksperimentu, s istom opremom i pazeći da pri pomicanju kamera ne dođe do promjene unutrašnjih parametara objektiva. Konačna raspodjela kamera i prostorna raspodjela kalibracijskih točaka ilustrirana je u *slici 9.4.* Unutrašnji parametri kalibracije prikazani su tablično u *tablici 9.2.*



Slika 9.4. Kalibracija slobodnim prostornim kalibrom

Kamera	Broj kamera	c	σ_c	x_H	σ_{xH}	y_H	σ_{yH}
1	2	1387,166	5,3479	25,9569	2,6929	15,5463	2,496
	3	1507,599	10,9456	-0,3371	3,5849	15,3539	5,1269
	4	1524,456	8,8419	4,2485	3,0012	7,1454	4,2681
2	2	1537,142	10,9061	62,7311	3,5171	-60,721	3,2799
	3	1511,799	7,8231	-18,779	2,5482	4,9565	2,5185
	4	1532,4	5,7661	-23,906	2,0169	0,5721	2,0216
3	3	1454,695	10,1362	6,398	4,0046	-20,468	2,8052
	4	1470,486	7,8581	11,8534	3,1904	-16,214	2,2436
4	4	1469,186	4,5791	8,7417	2,1005	-7,8134	2,143

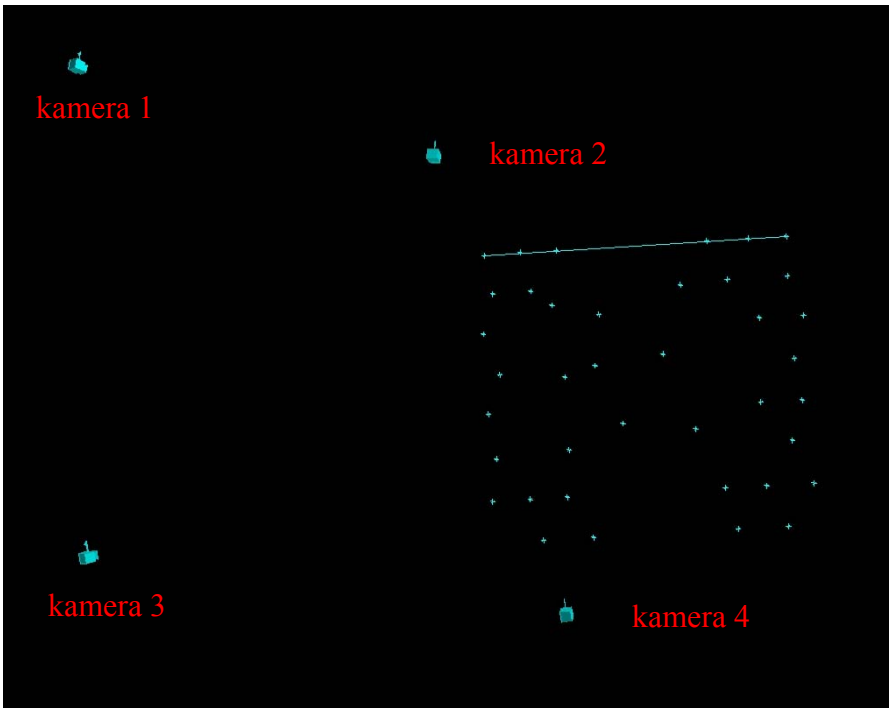
Tablica 9.2 Unutrašnji parametri za slučaj kalibracije slobodnim kalibrom, izraženi u pikselima

U slučaju kalibracije samo prvog para kamera, konstante kamera pokazuju sličnu karakteristiku kao i kod kalibracije ravninskim kalibrom. Dodavanjem kamera 3 i 4 iznosi konstanti kamera 1 i 2 značajno se približavaju (1524 piksela kod prve kamere i 1532 piksela kod druge), u odnosu na kalibraciju planarnim kalibrom gdje se ovaj iznos

kretao 1510 piksela za kameru 1, odnosno 1549 piksela za kameru 2. Utjecaj slobodnog kalibra još je izraženiji kod kamera 3 i 4, gdje je za slučaj kalibracije sa četiri kamere ovaj raspon tek nešto veći od jednog piksela. Zanemarimo li i ovdje prvi par kamera, devijacija konstante kamere i u ovom eksperimentu opada korištenjem dodatnih kamera, a po iznosu je dva do pet puta manja nego u prethodnom eksperimentu. Za položaj glavne točke snimanja vrijede ista ograničenja kao i kod planarnog kalibracijskog objekta i izmjereni podaci dodavanjem dodatnih kamera ne pokazuju tendenciju konvergencije. Devijacije glavne točke snimanja i u ovom slučaju znatno su manje i ujednačenije nego u prethodnom primjeru, kreću se u granicama između 2 i 4 piksela. Oba provedena eksperimenta pokazuju postojanje utjecaja raspodjele kalibracijskih točaka i broja kamera na iznose unutrašnjih parametara kalibracije, a devijacije svih promatranih vrijednosti konzistentno su manje kod kalibracije slobodnim prostornim kalibrom.

9.3. Kalibracija slobodnim kalibrom s pomaknutom kamerom

U ovom kalibracijskom eksperimentu, pazeći da se ne poremete unutrašnji parametri, kamera 2 primaknuta je približno 100 mm bliže zamišljenom centru sustava kamera (*slika 9.5.*). Kalibracija je ponovljena sukladno prethodno opisanom postupku. Za slučaj kalibracije sa sve četiri kamere, kalibrirani unutrašnji parametri prikazani su u *tablici 9.3.* Usporedimo li iznose konstanti kamera izmjerenih ovim eksperimentom s prethodnim eksperimentom, zamjetno je da postoji dobro preklapanje, što je naročito izraženo kod kamera 3 i 4. Devijacije konstante kamere također se neznatno razlikuju od prethodnog primjera, te se analogno može zaključiti i za devijacije glavne točke snimanja. Iz toga slijedi da je korištenjem slobodnog prostornog kalibra izvršen izravan utjecaj na kvalitetu same kalibracije sustava, o kojoj izravno ovisi kvaliteta samih rezultata kasnijih mjerenja. Može se zaključiti da unutrašnji parametri nisu apsolutno fiksni, bez obzira na to što tijekom pomaka kamera nije poremećena postava objektiva. S promjenom položaja kamera (vanjskih parametara kalibracije), osim vanjskih, dolazi i do promjene unutrašnjih parametara, ali će kod korištenja slobodnog prostornog kalibra ovaj utjecaj biti manje izražen nego kad je sustav kalibriran preko planarnog kalibracijskog.



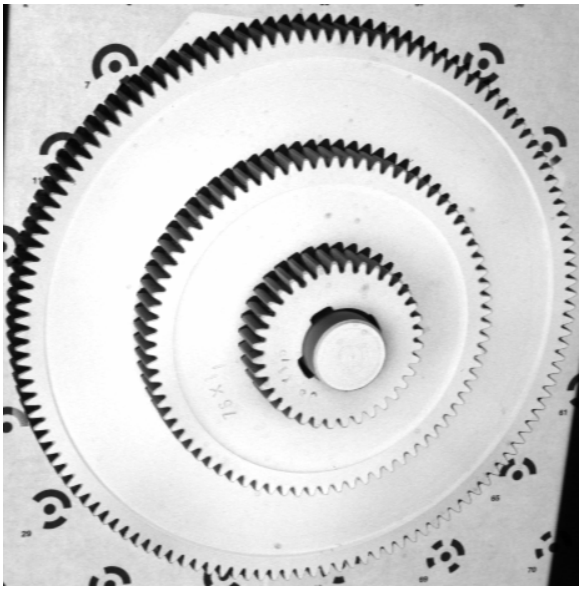
Slika 9.5. Kalibracija slobodnim prostornim kalibrom s pomaknutom kamerom 2

Kamera	Broj kamera	c	σ_c	x_H	σ_{xH}	y_H	σ_{yH}
1	4	1521,274	9,1546	2,7521	3,0927	10,7064	4,3697
2		1538,735	5,6436	-29,7843	2,1542	-0,163	1,8405
3		1458,585	8,0687	7,8306	3,2241	-18,9994	2,2597
4		1458,963	4,5769	14,8887	2,0158	-11,2284	2,1068

Tablica 9.3. Unutrašnji parametri za slučaj kalibracije slobodnim kalibrom i pomaknutom kamerom 1, izraženi u pikselima

9.4. Digitalizacija oblika piramidalne konstrukcije

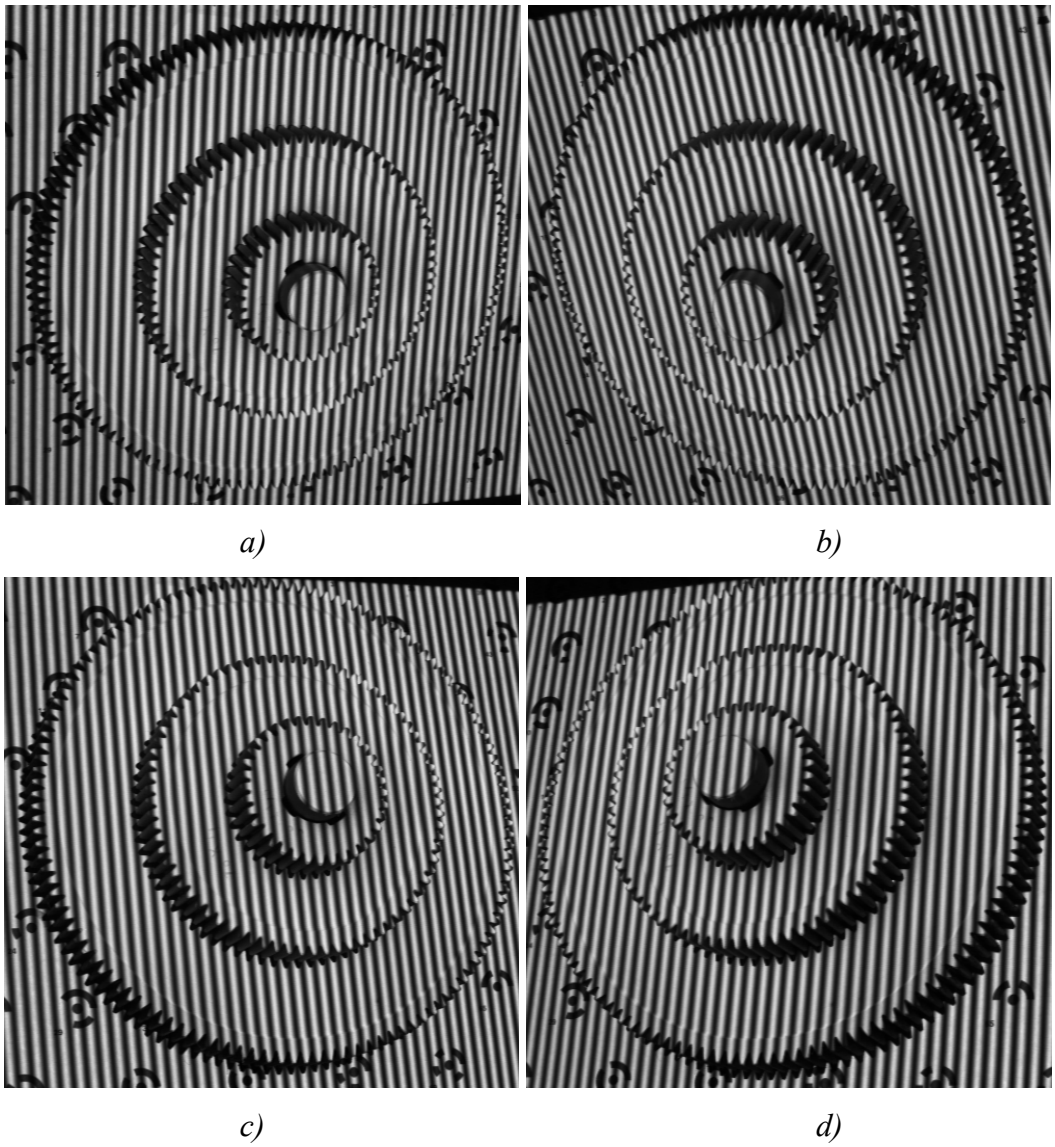
Kontinuirana ravna ploča predstavlja najpovoljniji slučaj za digitalizaciju projekcijskim metodama. Normale na površini međusobno su paralelne te je moguće orijentirati projektor tako da os objektiva stoji približno okomito na površinu mjernog objekta. Na taj način geometrija modela ne uzrokuje značajnu distorziju projiciranog uzorka, sve kamere mogu se postaviti tako da vide kompletno projicirano područje te u faznim slikama nema diskontinuiranih, zasjenjenih ili preklopljenih područja. Budući da je cilj ovog rada sustav koji bi mogao digitalizirati proizvoljne geometrijske oblike, eksperiment je bilo potrebno dizajnirati tako da se na temelju digitaliziranih podataka mogu ocijeniti načini analize prikazani u prethodnom poglavlju. Stoga je umjesto kontinuirane ravne ploče digitalizirana piramidalna forma koja je zamišljena da bude osnosimetrična s obzirom na jednu os, te da se sastoji od međusobno razmaknutih, približno planarnih površina. U tu svrhu iskorištena je postava čeonih zupčanika (približnih gabarita 200x200x60mm) prikazana *slikom 9.6.*



Slika 9.6. Stepenasta piramidalna konstrukcija

Prednost odabira čeonih zupčanika je u tome što su rubovi svake od stepenica dodatno diskontinuirani te predstavljaju zone u kojima su zbog pojave sekundarnih refleksija moguće pojave dodatnih pogrešaka. Zanemarimo li lokalna zaobljenja u zoni blizu

korijena zubiju, i kod ovog modela zadržana je paralelnost normala na površinu, ali je u usporedbi s kontinuiranom plohom površina dodatno volumenski diskontinuirana.



a) *b)*

c) *d)*

Slika 9.7. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na piramidalni model snimljena sa četiri kamere u pravokutnoj postavi s centralno postavljenim projektorom a) kamera 1, b) kamera 2, c) kamera 3, d) kamera 4.

Projektor je postavljen okomito na bočne stranice zupčanika, tako da se središte objektiva približno poklapalo s osi vratila. Ilustracija projiciranja jednog od uzoraka vremenskog faznog pomaka prikazana je *slikom 9.7.* Odabranim načinom projiciranja svjetla osigurano je ispravno kodiranje najveće moguće površine modela, ali iz odabrane

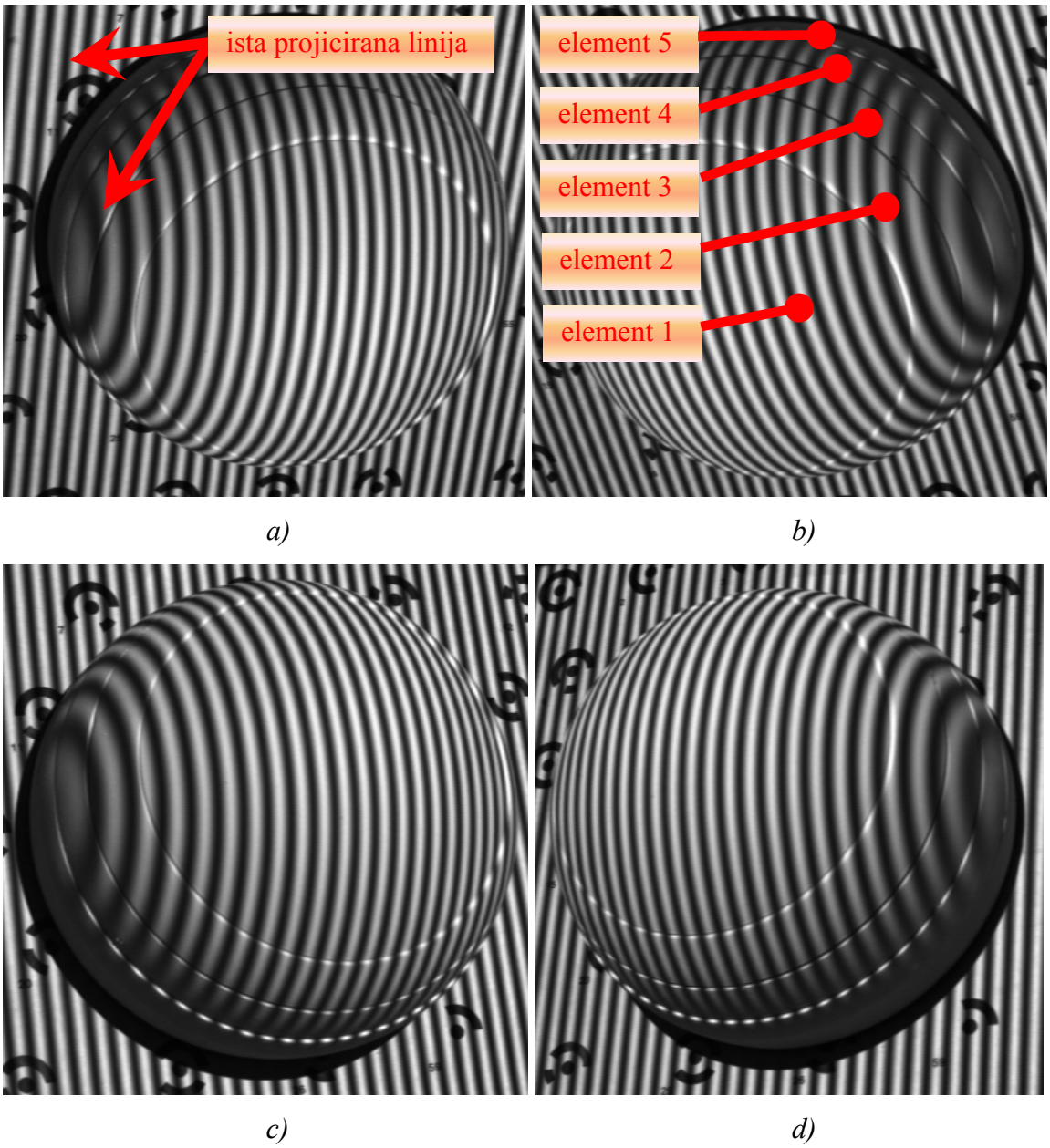
orijentacije kompletna djelatna površina zubiju nije mogla biti kodirana. Zbog pravokutne raspodjele kamera, za očekivati je da će se pojedini dijelovi djelatne površine zubi zupčanika vidjeti u jednoj ili maksimalno u dvije kamere. Zbog orijentacije projektora okomito na bok zupčanika, zubi nisu mogli biti izravno osvijetljeni projektorom, pa iz tog razloga niti točke na njihovoj površini ne mogu imati ispravni kod. Međutim, u vertikalnoj faznoj slici u kameri 1 (*slika 8.9.*) vidi se da između pojedinih bočnih ploha zupčanika nema diskontinuiteta (u vidu crnih zona), što znači da su dijelovi površine zubi ipak na neki način bili osvijetljeni. Osvjetljenje je moglo biti izravno ako se os projektora nije idealno poklopila s normalom površine, ili neizravno, preko sekundarnih refleksija s niže stepenice. Uzevši u obzir relativnu orijentaciju modela i projektora, ova područja ne mogu biti ispravno kodirana, te stoga ne nose korisnu informaciju. Iz tog razloga su iz faznih slika eliminirana amplitudnim filtriranjem, što je prikazano *slikom 8.9.*, te za ovaj model detaljnije opisano poglavljem 8.1.4. Stepenasta prostorna raspodjela površina uvjetovala je postojanje zasjenjenih, ali ispravno kodiranih zona u svakoj od kamera. Neovisno o odabranoj metodi pretraživanja stereoparova, bilinearnom interpolacijom pronalazi se necjelobrojna koordinata traženog stereopara u preostalim kamerama. Zasjenjenje dovodi do pogrešaka kod provođenja bilinearne interpolacije jer u zoni ruba postoje područja u kojima četiri piksela susjedna pronađenom pikselu mogu prijeći s jedne razine na drugu i uzrokovati prividan pomak stereopara. Ove zone lokalizirane su gradijentnim filterom s korakom 20, te eliminirane iz analize, što je detaljnije opisano u poglavlju 8.1.4., i na ovom modelu ilustrirano *slikom 8.10. a)* i *b)*. Prostorna geometrija mjernog objekta i raspodjela kamera uvjetuje postojanje zona koje će biti vidljive u sve četiri kamere istovremeno, ali i takovih zona istovremeno vidljivih u tri ili svega dvije kamere. Ako je točka ispravno kodirana, opravdano je koristiti i one točke na površini koje su vidljive u svega dvije kamere. Programska podrška zamišljena je tako da se stereoparovi traže u svakoj od kamera, neovisno o tome jesu li istovremeno vidljivi u svim kamerama. Triangulacija objektnih točaka provedena je u dvije varijante: samo za točke koje su ispravno vidljive u svim kamerama (*slika 8.11.*), te je za istu zonu ponovljena metodom 4-3-2 triangulacije stereoparova (*slika 8.12*). Kada se prepoznavanje stereoparova provodi cjelobrojnom ili polubrojnom metodom (prema [Mladen]), zbog potrebe za referentnom kamerom svi ispravno kodirani pikseli na površini se ne mogu iskoristiti jer kod prostornih

diskontinuiranih modela postoje i takove zone na površini koje su zbog zasjenjenosti višim površinskim artefaktima nevidljive u referentnoj kameri (*slika 8.13.*). Ovaj nedostatak jedne referentne kamere eliminiran je uvođenjem 4,3,2,1 analize, kod koje svaka od kamera postaje referentna (*slika 8.14*). Efekt 4,3,2,1 analize je povećanje gustoće točaka na površini modela, a prednost joj je što se može po potrebi provesti na već izračunatim faznim slikama. Rezultat primjene ove analize prikazan na *slici 8.16.* može se usporediti s klasičnom analizom prikazanom *slikom 8.15.,* a detaljnije je opisan poglavljem 8.1.4.2.

9.5. Digitalizacija oblika polukugle

U prethodnom eksperimentu digitaliziran je model kod kojeg su sve normale na površini bile paralelne i usmjerene u istom smjeru. Model kugle predstavlja drugu krajnost, jer se osim malog broja normala približno kolinearnih s osi projektora ovdje pojavljuje i velik broj normala koje su iz težišta kugle usmjerene u svim smjerovima u prostor. Kompletan volumen kugle ne može se digitalizirati na osnovu samo jedne serije unakrsnih projiciranja, iz razloga što projektor iz jedne pozicije ne može ispravno osvijetliti sve točke na površini kugle. S porastom kuta normale na površinu u odnosu na kut upadne zrake, smanjuje se mogućnost digitalizacije. Kao mjerni objekt korišten je dio kugle promjera 120 mm, načinjene od polimernog materijala. Kugla se sastojala od osam elemenata, od kojih su četiri činila jednu polovicu kugle. Na mjestima spojeva prijelaz s elementa na element nije gladak, te se na *slici 9.8.* vidi stepenasti prijelaz. Elementi se mogu razdvajati, a u ovom eksperimentu korišteno je pet elemenata. Iz tog razloga se u svakoj od slika na mjestu oslanjanja modela na nosivu ploču vidi i zasjenjeno područje koje pripada najnižem, petom elementu, jer su normale na tu površinu orijentirane tako da ih projektor ne može osvijetliti. Ne može se procijeniti gubitak oštrine projiciranog uzorka u ovisnosti o položaju na kugli na osnovi promatranja slike, jer projektor projicira raster sinusoidalne raspodjele svjetloće bez oštro izraženih rubova. Stoga je interesantno analizirati širinu projiciranih linija koja će biti najmanja upravo u točki na koju je projektor okomito orijentiran, a rast će s udaljavanjem od te točke, odnosno s povećanjem kuta normale. Ovaj je efekt najizraženiji na bočnim stranama kugle (označenoj strelicama

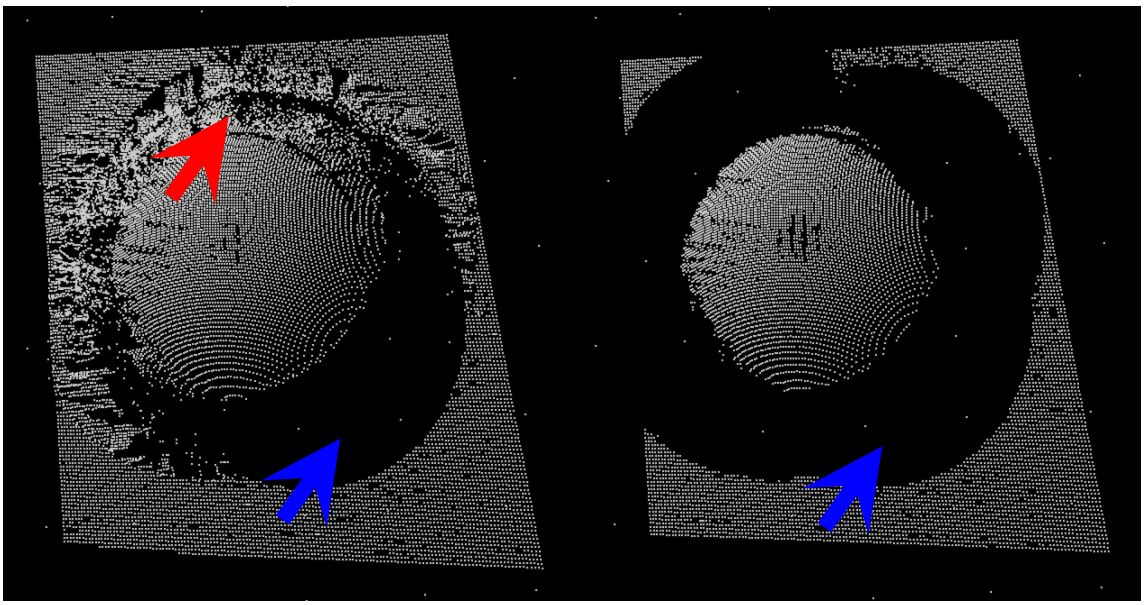
na *slici 9.8.a*) gdje završavaju projicirane linije, odnosno na mjestu gdje prestaje podloga, a započinje kugla.



Slika 9.8. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na model kugle; snimljeno sa četiri kamere u pravokutnoj postavi s centralno postavljenim projektorom a) kamera 1, b) kamera 2, c) kamera 3, d) kamera 4.

Utjecaj ovog efekta mogao bi se umanjiti korištenjem uzorka promjenjive širine linija, kojima bi se kompenzirao utjecaj geometrije na širinu projiciranih linija. Za ispravno

provođenje ove vrste kompenzacije trebalo bi približno poznavati geometriju modela i posjedovati mogućnost jednostavne promjene širine projiciranih linija, što kod korištenog projektora s fiksnim rasterom na stakalcu nije moguće postići. Osim što geometrija utječe na deformaciju oblika linije, zbog velikog kuta između normale na površinu i osi kamere, u toj zoni otežana je i digitalizacija. Prema *slici 9.8.* vidljivo je da je površina elementa 1 gotovo u potpunosti vidljiva u svim kamerama. Može se zaključiti da na površini kugle gotovo da i ne postoji točka koja pripada elementima 2, 3 ili 4, a koja se istovremeno vidi u svakoj od kamera. Projicirani raster u potpunosti pokriva površinu elementa 1. Iz navedenoga slijedi da bi, u slučaju triangulacije samo preko točaka koje su ispravno kodirane u svim kamerama, jedino u zoni elementa 1 smjeli postojati rezultati u oblaku točaka. *Slikom 9.9* prikazana je triangulacija za točke koje su vidljive u sve četiri kamere preko jedne referentne kamere s gradijentnim operatorom, kod kojeg je u slučaju *a)* korak iznosio 20000 (operator se može smatrati ugašenim), a u slučaju *b)* 20.

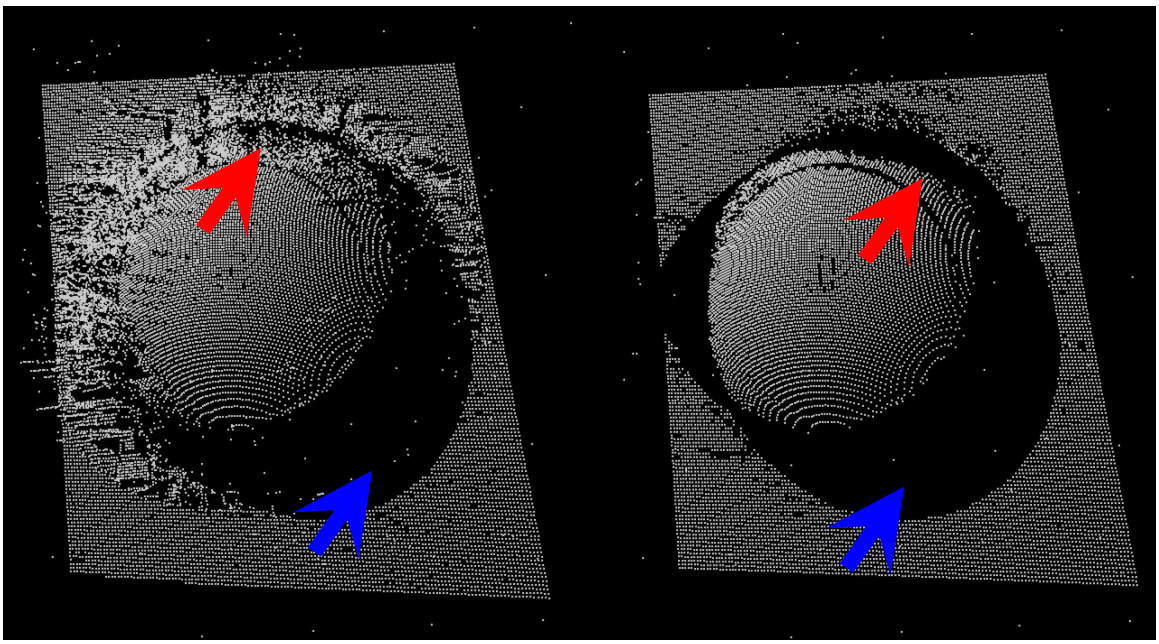


a) *b)*

Slika 9.9. Triangulirane samo one točke koje su vidljive u sve četiri kamere s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000, b)20

Zbog jasnije slikovne predodžbe, odabrano je prikazivanje svake treće triangulirane točke. Kao što je prethodno pretpostavljeno, zona elementa 1 je kod oba načina filtriranja digitalizirana gotovo u potpunosti, *slika 9.9 b*. Nefiltrirani oblak (*slika 9.9 a*) sadrži i dio

elementa 2 (označenog crvenom strelicom), ali sa zamjetnim šumom i nepravilnim rasporedom točaka u prostoru. Osim površine kugle, na slikama projiciranih faznih kodova vidljiv je i dio oslonca. Za svaku od kamera model zasjenjuje dio površine koja je ispravno kodirana, ali se nalazi iza modela. U slučaju triangulacije samo onih točaka koje su istovremeno vidljive u svim kamerama, na tom području također ne bi smjeli postojati rezultati. Oblak točaka na ravnoj površini ukrute, dobiven filtriranjem (*slika 9.9 b*), poklapa se s prethodnom pretpostavkom. Crno područje bez mjernih rezultata (označeno plavom strelicom) nalazi se na zasjenjenim mjestima, iza modela, gledano iz smjera kamere 1. Sastoji se od četiri polukružna spojena dijela koja oblikom odgovaraju polukružnoj silueti modela. Nefiltrirani oblak točaka i u zasjenjenoj zoni ukrute sadrži točke zamjetnog šuma, dok je zasjenjeno područje ispravno definirano tek u zoni nasuprot referentne kamere. Ponovimo li analizu 4-3-2 triangulacijom, broj trianguliranih točaka na modelu i na podlozi morao bi se povećati.

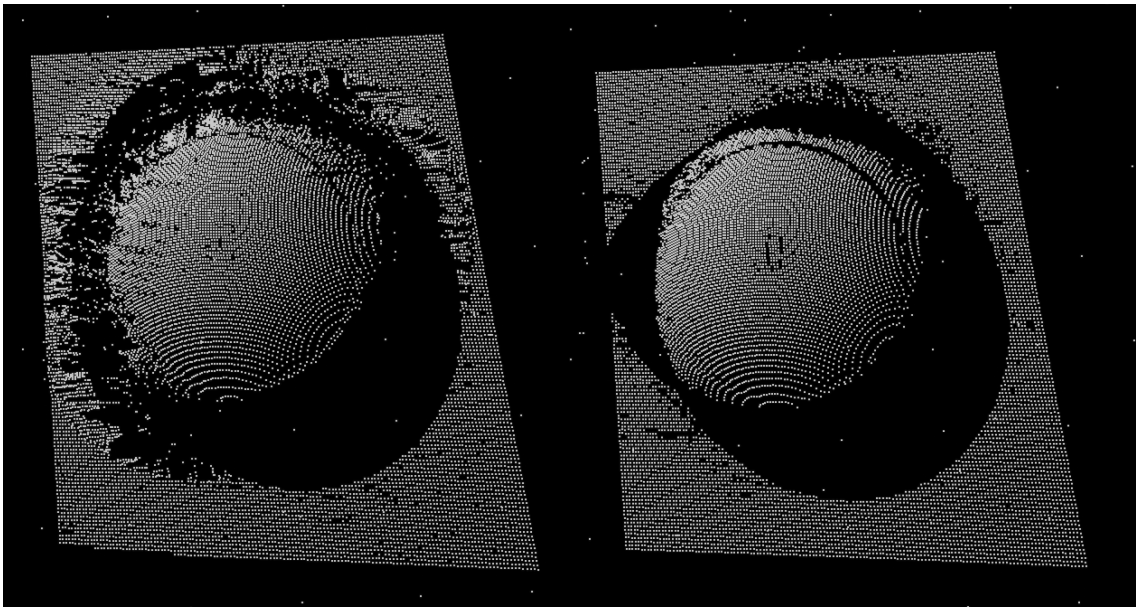


a) b)

Slika 9.10. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000, b)20

Na slici filtriranog modela (*slika 9.10 a*) crvenom strelicom je označena zona elementa 2, koja je bila vidljiva u kamerama 1 i 2. Istovremeno, u nefiltriranoj slici ova zona je veća, ali sa zamjetnim šumom. Zona ukrute (prema *slici 9.10. b)* sada je daleko bolje definirana

u odnosu na *sliku 9.9. b,* jer je triangulirano i ono područje koje je istovremeno vidljivo i u referentnoj i u barem još jednoj kameri. Zona bez rezultata, u istoj slici označena plavom strelicom, nije vidljiva u referentnoj kameri te je stoga bila preskočena u analizi iako je djelomično vidljiva u kamerama 2, 3 i 4. Prethodna diskusija odnosila se na one točke čija je devijacija prilikom triangulacije ulazila unutar područja 4σ. Slikom *9.11* prikazane su točke čija je devijacija prilikom 4-3-2 triangulacije ulazila unutar područja 1σ. Vidljivo je da je oblak dobiven bez filtriranja djelomice očišćen od pogrešnih točaka, dok filtrirani oblak gotovo da se i ne razlikuje od slučaja 4σ.

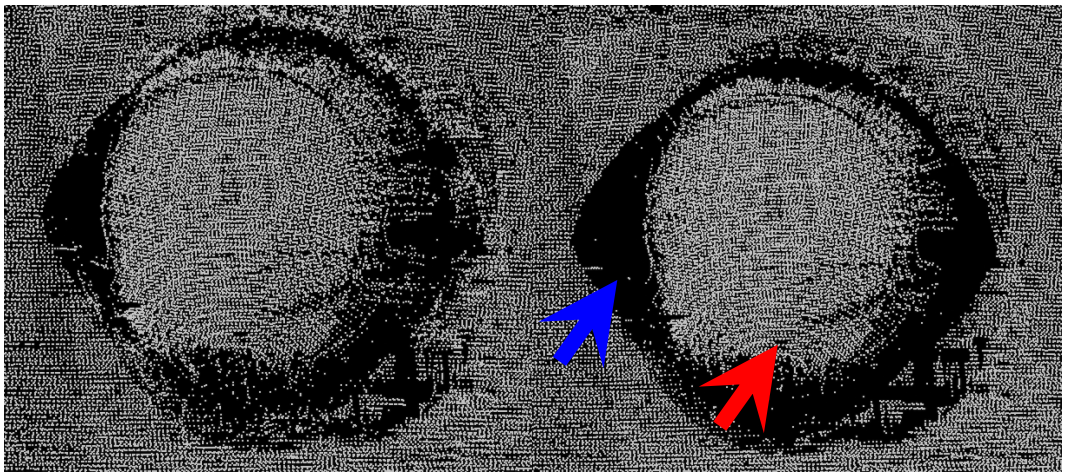


a) *b)*

Slika 9.11. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 1σ i gradijentom a) 20000 b)20

Na istim faznim snimkama provedena je i 1,2,3,4 analiza kombinirana sa 4-3-2 triangulacijom, a rezultati su prikazani *slikom 9.12.* za točke čija devijacija triangulacije ulazi u 4σ i 1σ. Oblaci su izračunati filtriranjem faznih slika s korakom 20, a zbog povećanja gustoće točaka zbog 1,2,3,4 analize za prikaz je korištena tek svaka peta točka. *Slikom 9.12.* prikazan je oblak točaka na kojem se vidi da je zbog korištenja 1,2,3,4 metode ravna podloga digitalizirana u daleko većoj mjeri nego kod prethodnih načina analize. Zaostala su crna područja (označena plavom strelicom), koja se istovremeno nisu vidjela u barem dvije kamere, te ona u kojima nisu pronađeni ispravni stereoparovi. Element 1 i ovdje je u potpunosti digitaliziran, te se povećala potpunost digitalizacije i

elementa 2, što je naročito izraženo u zoni modela koja je bila zasjenjena u referentnoj kameri 1 (označeno crvenom strelicom). Sada je i šum nešto izraženiji nego u prethodnim slučajevima, ali je lokaliziran u zonama u kojima je došlo do znatne deformacije projiciranih faznih linija.



a) *b)*

Slika 9.12. Triangulacija kombinacijom 1,2,3,4 analize i 4-3-2 triangulacije za točke čija je devijacija triangulacije a) 4σ, b) 1σ.

Vanjska i unutrašnja površina kugle predstavljaju površine čija geometrija projekcijskim sustavima prve i druge vrste predstavlja značajan problem kod digitalizacije oblika. Korištenjem četiriju kamera povećana je digitalizirana površina ostvarena u jednom mjerenju, u odnosu na sustave s dvije kamere. Budući da su sve četiri kamere orijentirane inicijalnom kalibracijom u zajednički koordinatni sustav, kod korištenja 1,2,3,4 metode nije potrebno provoditi postupak registracije, odnosno dovođenja oblaka točaka u zajednički koordinatni sustav. Sustav *Atos* druge vrste u tu svrhu koristi markere nalijepljene na i oko modela. Ako bi sustav s dvije kamere koristio kamere 1 i 2 u njihovoj trenutnoj poziciji, već i za potpunu digitalizaciju elementa 1 trebao bi provesti projiciranje iz barem jedne dodatne pozicije (pozicije kamera 3 i 4), te povezati ova dva mjerenja u jedinstveni koordinatni sustav. Zbog korištenja samo dvije kamere, ako bi se ovaj model snimao standardnim sustavom *Atos* iz dvije pozicije koje bi odgovarale korištenim pozicijama parova kamera 1 i 2, odnosno 3 i 4, površina ukrute sadržavala bi nešto manje rupe, oblikom vrlo slične onima prikazanima *slikom 9.9. b*.

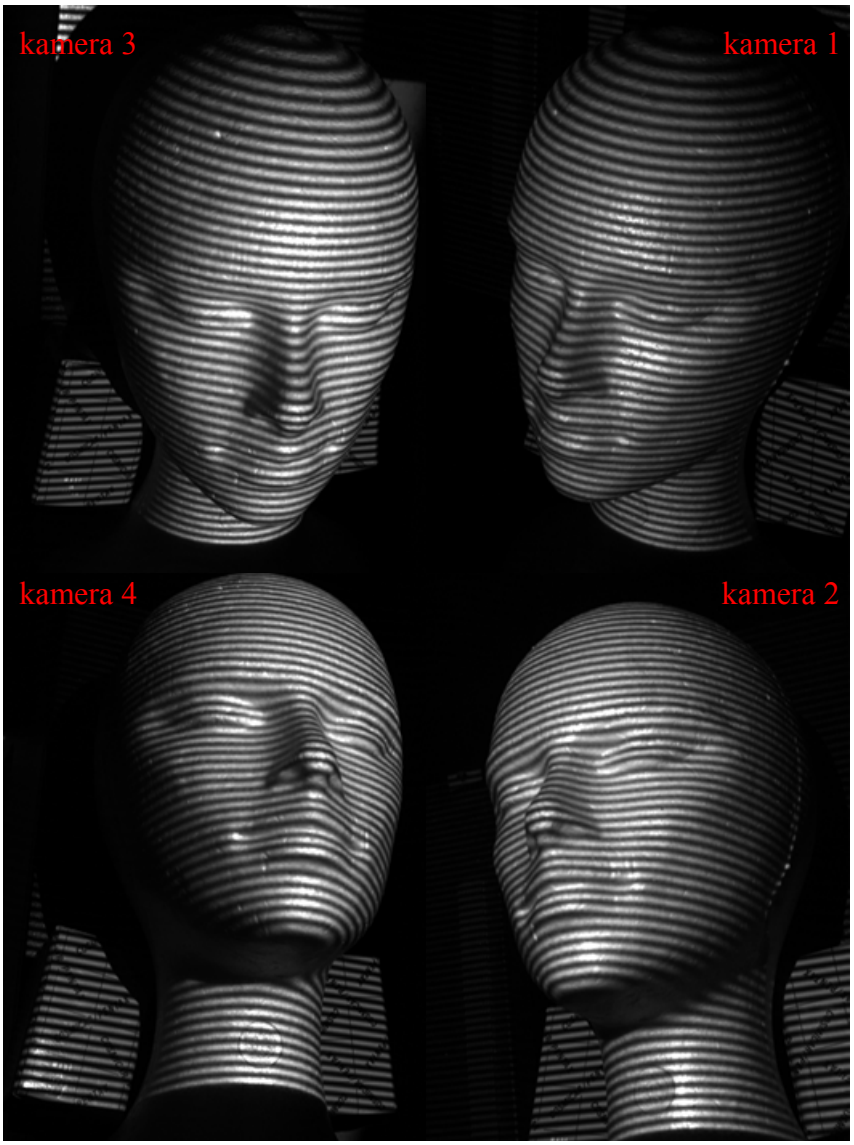
9.6. Digitalizacija modela ljudske glave

Model ljudske glave (*slika 9.13.*) naizgled nema dodirnih točaka s prethodnim eksperimentima, ali je ovdje odabran zbog toga što je područje lica prostorna forma koja istovremeno sadrži glatka izbočena područja (primjerice u zoni obraza ili čeonog područja), udubljena područja (zona oko očiju) i ispupčena područja (zona nosa). Prijelazi sa zona različitih zaobljenosti su glatki i kontinuirani. Upravo geometrija lica predstavlja izazov mjernim sustavima prve ili druge vrste jer bi za kompletnu digitalizaciju površine bilo potrebno spojiti više odvojenih projiciranja u zajednički oblak točaka.

Slika 9.13. Model ljudske glave

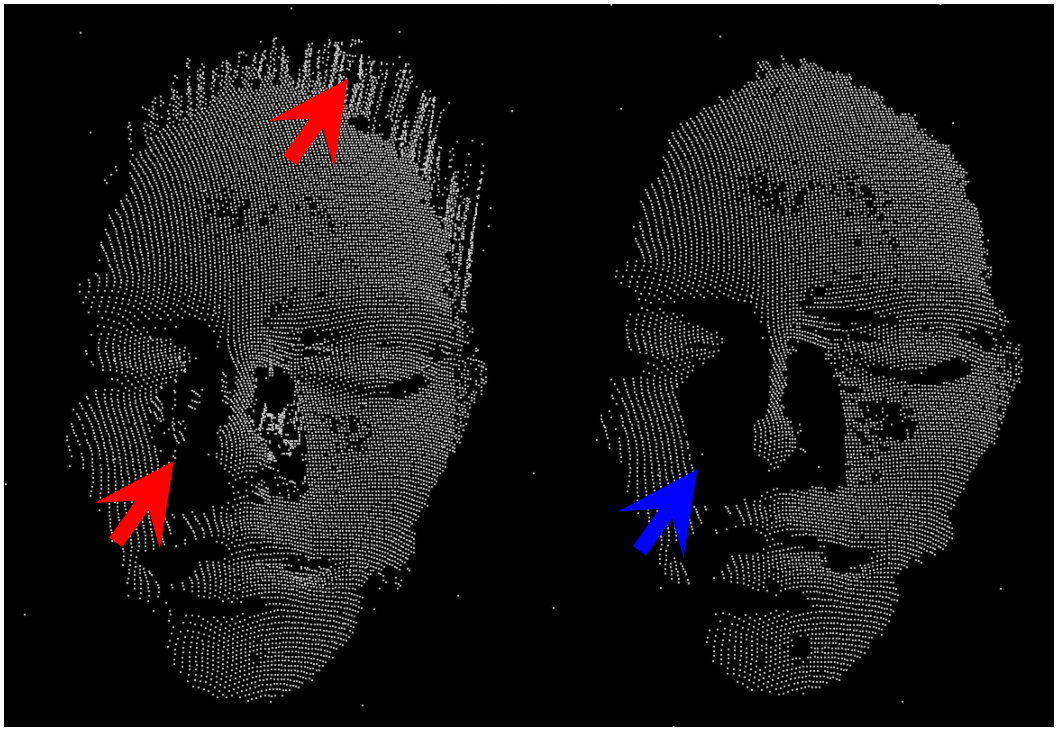
U tu svrhu se neki sustavi (sve varijante sustava *Atos*) koriste dodatnim markerima koje je potrebno nalijepiti na površinu modela. Površina ispod ovih markera nije vidljiva sustavu te se time svjesno uzrokuje pojava rupa u oblaku točaka, koju je potrebno naknadno zatvoriti u nekom od CAD sustava. Zbog potrebe projiciranja dvadeset uzoraka ovim sustavom, nužno je da model miruje. Stoga je umjesto digitalizacije lica neke osobe odabrana digitalizacija modela načinjenog od polistirena, koji gabaritima približno odgovara prosječnoj ljudskoj glavi. Zbog svojih optičkih karakteristika površina kože nije

pogodna za digitalizaciju ovim sustavom te stoga ni površina zamjenskog modela nije tretirana difuznim slojem boje. Zbog lokalne glatkoće površina je lokalno ispoljavala izrazito refleksijske karakteristike, koje se vide kao izrazito svijetla područja na *slici 9.13.* Model je, kao i prethodni modeli, digitaliziran s identično postavljenim sustavom, s kamerama u pravokutnoj postavi i centralno postavljenim projektorom, a oblaci pokazuju svaku treću digitaliziranu točku s površine objekta. Polegnut je na horizontalni nosač, a postavljen je tako da kamere 1 i 2 vide pretežno lijevu stranu lica, dok kamere 3 i 4 podjednako vide obje strane lica (*slika 9.14.*).



Slika 9.14. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na model ljudske glave

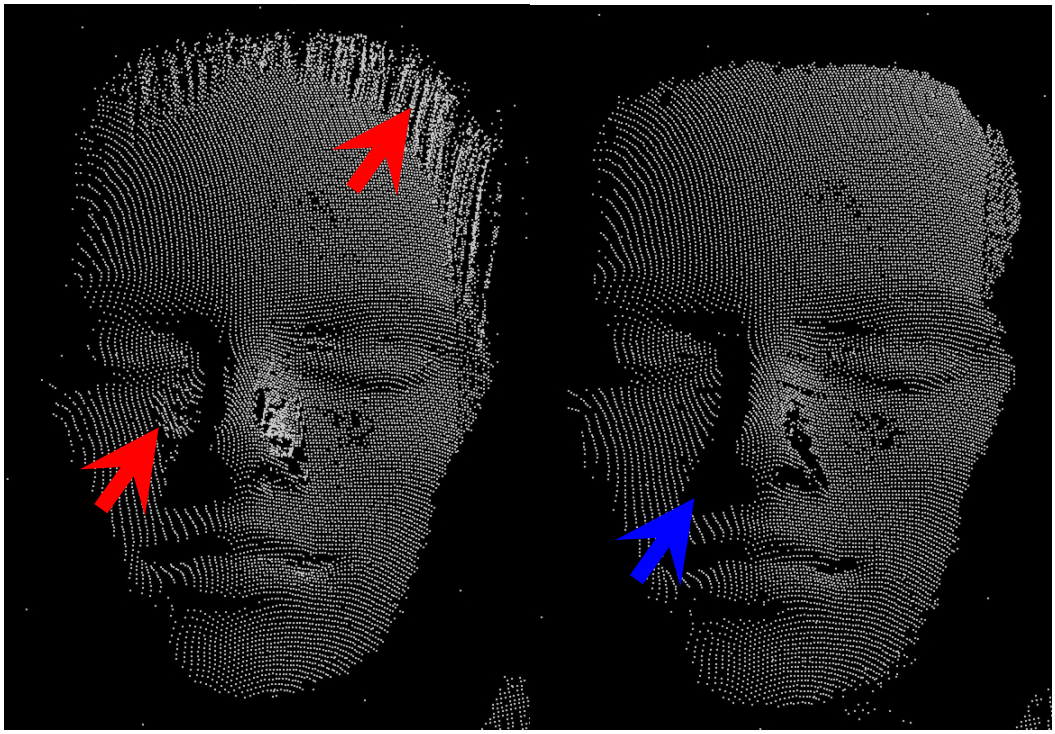
Promjene u zakrivljenosti površine blaže su nego kod modela kugle iz prethodnog eksperimenta. Stoga je i područje utjecaja gradijenta, lokalizirano na zonu tjemena i nosa, što je na *slici 9.15.a* označeno crvenim strelicama. Kod triangulacije samo preko točaka koje su ispravno kodirane u svim kamerama, na obje *slike 9.15.* zamjetno je postojanje rupa u zoni nosa i na onim područjima koja su nevidljiva referentnoj kameri 1.



a) *b)*

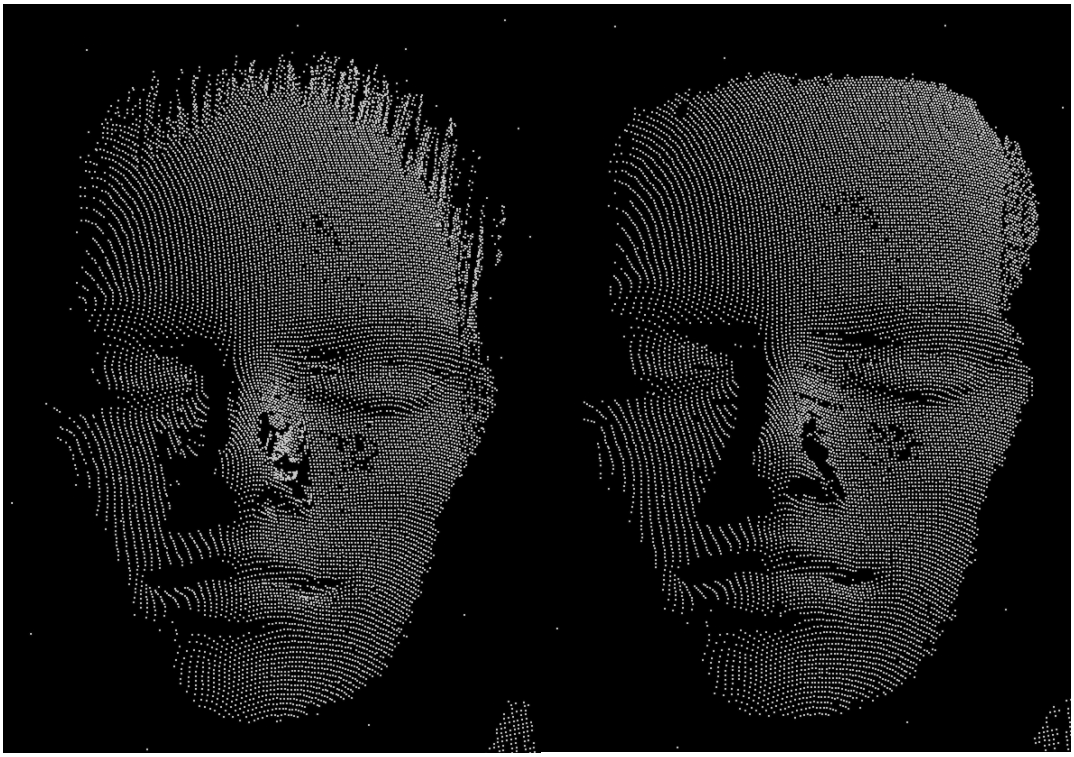
Slika 9.15. Triangulirane samo one točke koje su vidljive u sve četiri kamere s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000 b)20

Provedemo li na istim slikama 4-3-2 triangulaciju (*slika 9.16.*), vidljivo je da je površina lica uvećana, smanjene su rupe u oblaku točaka u zoni nosa, oko očiju i usta. Područje označeno plavom strelicom zasjenjeno je u kameri 1, te iako je vidljivo u kamerama 3 i 4, ovdje nije moglo biti uzeto u obzir. Nefiltrirana slika i dalje zadržava zamjetne pogreške u zoni tjemena i nosa, kojih nema u filtriranoj slici. Ponovljena je i analiza samo preko točaka koje ulaze unutar područja 1σ (*slika 9.17.*),. Slika *9.18.* pokazuje isti smisao kao i kod modela kugle.



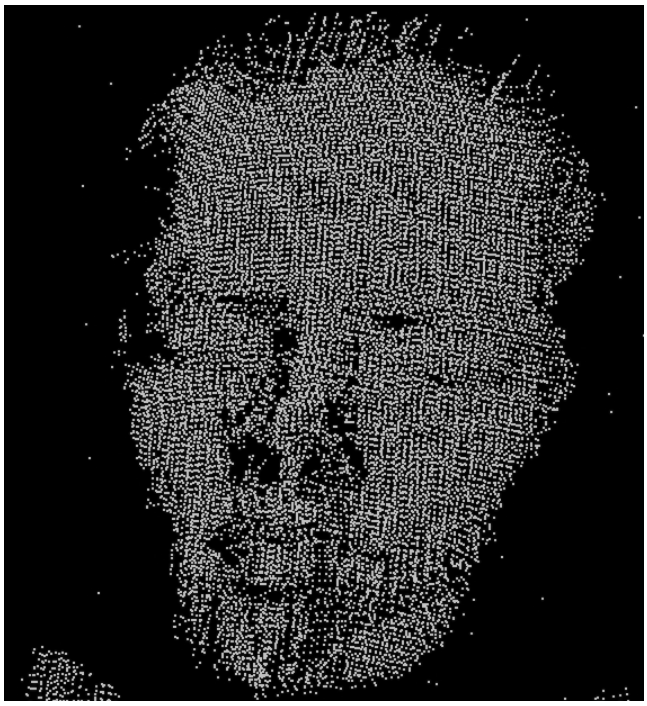
a) *b)*

Slika 9.16. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 4σ i gradijentom a) 20000, b)20



a) *b)*

Slika 9.17. Triangulacija 4-3-2 postupkom s devijacijom 1σ i gradijentom a) 20000, b)20

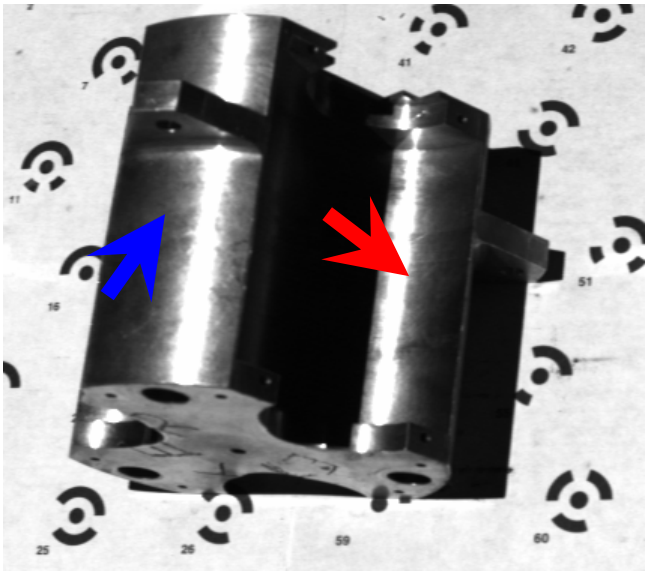


Slika 9.18.Triangulacija kombinacijom 1,2,3,4 analize i
4-3-2 triangulacije za točke čija je devijacija triangulacije 1σ

9.7. Digitalizacija strojnog elementa

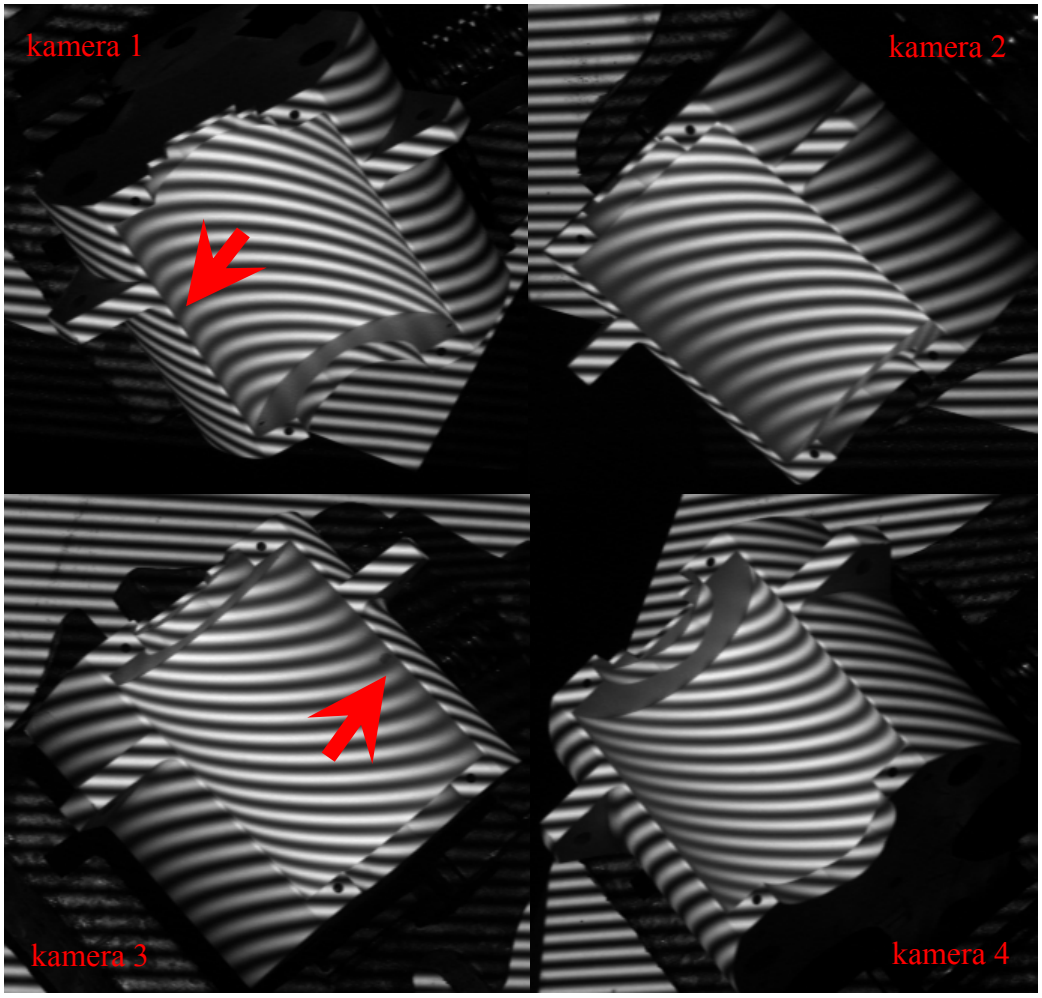
U prethodnim eksperimentima testirani su operatori za analizu snimljene slike, te nisu provjeravane performanse sustava u smislu netočnosti određivanja prostornog položaja točke ili ocjene mjerne nesigurnosti sustava. Kako bi se ovo moglo provjeriti uz zadržavanje sljedivosti s komercijalnim sustavima, trebalo bi provesti eksperiment prema preporukama VDI/VDE 2634, gdje se provodi test s mjerenjem razmaka i oblika dviju kugli. Provjerava se *"Probing error"* i *"Spacing error"*. "Probing error" pokazuje rasipanje izmjerenih rezultata od kugle interpolirane kroz digitalizirane točke, dok "Spacing error" pokazuje pogrešku mjerila snimke i deformacije mjernog volumena. Osim toga, radi se i *"Flatnes test",* tj. mjerenje ravnoće na ravninskim normalima. Zbog nedostupnosti potrebnih kalibara za provođenje spomenutih testova, kao zadnji eksperiment digitaliziran je realni strojni element prikazan *slikom 9.19*. Trokoordinatnim

kontaktnim mjernim uređajem *Ferranti Merlin 750* (u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina pri Katedri za mjerenja i kontrolu FSB Zagreb) i projekcijskim sustavom sa četiri kamere na strojnom elementu izrađenom od aluminijske legure provedena je komparativna digitalizacija s ciljem određivanja dvaju radijusa, unutrašnjeg (površina označena crvenom strelicom) i vanjskog (površina označena plavom strelicom).

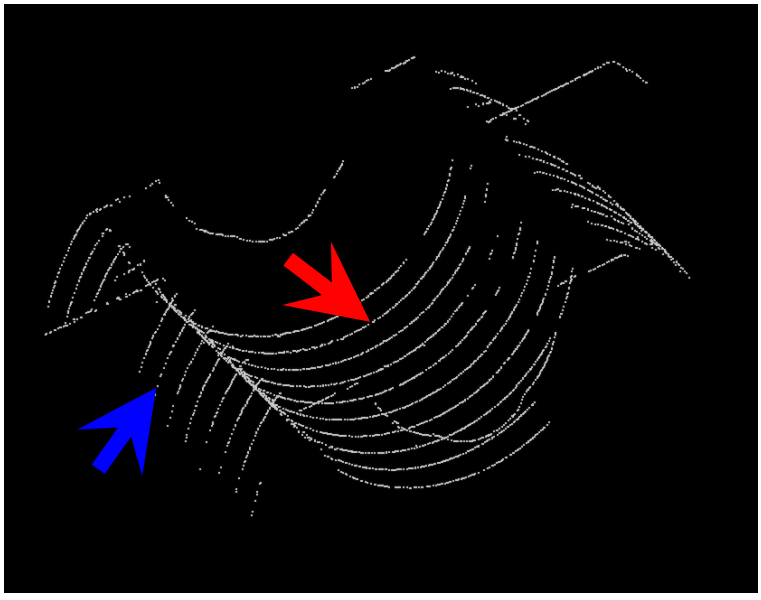


Slika 9.19. Strojni element

Korištena je identična postava kamera kao i u prethodnim eksperimentima. Površina modela tretirana je difuznim slojem boje jer je model imao uglačanu, izrazito refleksu površinu. Digitalizacija ovog modela usporediva je s problemom digitalizacije vanjske površine polukugle. Površina koja je digitalizirana dio je unutrašnje i vanjske stijenke valjka. Na unutrašnjoj stijenci normale u točkama najbližim rubu modela postaju gotovo okomite na smjer projicirane zrake. U toj zoni je, slično kao kod modela kugle, zamjetna deformacija projiciranog rasterskog uzorka (označeno crvenom strelicom u *slici 9.20.*), te u rezultantnom oblaku točaka na tim mjestima nema mjerne informacije (*slika 9.21.*). Kako bi se postigla što veća digitalizirana površina, model je postavljen pod kutom od približno 45° stupnjeva u odnosu na projektor, a analiza je provedena 4-3-2 triangulacijom s jednom referentnom kamerom.



Slika 9.20. Projekcija uzorka vremenskog faznog pomaka na strojni element



Slika 9.21. Profil strojnog elementa

Uređaj	Unutrašnji promjer	Vanjski promjer
Ferranti Merlin 750	55,6731mm	89,6947mm
Sustav sa 4 kamere	54,666mm	88,058mm

Tablica 9.4. Usporedba digitaliziranih promjera

Rezultati usporedne digitalizacije prikazani *tablicom 9.4.*, pokazuju da su promjeri u slučaju digitalizacije sa sustavom sa četiri kamere u oba slučaja manji nego kod kontaktnog mjerenja. Podijelimo li međusobno unutrašnje i vanjske promjere, omjer unutrašnjih promjera iznosi 1,0184, a vanjskih 1,0185. Iz sličnosti omjera može se zaključiti da je kod projekcijske metode došlo do sustavne pogreške u poremećaju mjerila. Razlog tome je nedostupnost umjerenog štapa potrebne dužine i promjera točke, te je zamjensko mjerilo sustava dobiveno prijenosom mjerila s umjerenih štapova od invara duljine jednog metra na točke nalijepljene na čeličnu ploču dimenzija 150x70x20 mm. Nakon toga je ovo mjerilo preneseno na kodirane točke nalijepljene na površinu modela, kako čelična ploča ne bi zbog svojih dimenzija ometala digitalizaciju. Ovim postupkom prijenosa mjerila svjesno je prilikom mjerenja unesena pogreška, ali njena magnituda nije bila poznata. Mjerilo, odnosno zamjenski umjereni objekt korišten je priručno, nije bio tema ovog rada te njegov utjecaj nije zasebno analiziran.

10. Zaključak

Svjedoci smo vremena u kojim optičke metode za digitalizaciju oblika postaju važan parametar u procesu koji proizvod prolazi od prvotne ideje, da bi u svojoj konačnoj formi zadovoljio potrebe krajnjeg korisnika. Razvoj projekcijskih metoda započeo je sa sustavima s jednom kamerom i jednim projektorom koji su unaprijeđeni uvođenjem druge kamere. Ovom intervencijom omogućeno je povećanje broja slikovnih osjeta, čime je matematički model sustava postao predefiniran, a posredno je eliminirana i potreba za kalibracijom projektora. Kod sustava baziranih na faznim metodama, stereoparovi slikovnih osjeta nisu određeni nezavisno, već su potpomognuti pretpostavkom o nepromjenjivosti geometrije sustava definiranom inicijalnom kalibracijom. Kalibracija se provodi specijalnim objektima zadane geometrije i oblika koji svojim gabaritima odgovaraju trenutnom mjernom volumenu, a najčešće su planarni. Kvaliteta digitaliziranih podataka izravno ovisi o mnogo parametara, kao što su krutost i temperaturna stabilnost konstrukcije, inicijalna kalibracija, primijenjeni matematički modeli i način rješavanja problema jednoznačnosti. Ovaj kratki osvrt odnosi se na komercijalno dobavljive sustave prihvaćene od strane mjeriteljske zajednice. Sustav treće vrste, razvijen u ovoj instituciji, daje novu dimenziju rješavanju problema jednoznačnosti uvođenjem unakrsnog projiciranja projekcijskog rastera. Ovom modifikacijom omogućeno je prepoznavanje stereoparova neovisno o načinu na koji je modelirana veza između kamera. Time se otvara mogućnost razvoja sustava četvrte vrste, obuhvaćenih ovim radom. Cilj ovog rada bio je razvoj sustava s više od dvije kamere, koji bi imali mogućnost ostvarivanja varijabilnih vanjskih parametara kalibracije. To bi omogućilo slobodnu promjenu relativnog položaja kamera i projektora, kao i ostvarivanje digitalizacije maksimalne površine mjerenog objekta i velike količine površinskih detalja uz minimalan broj projekcija. Želi se ostvariti mogućnost kalibracije sustava slobodnim kalibrom, koji bi se, slično kao kod kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja, mogao prilagoditi gabaritima i specifičnostima oblika proizvoljnog mjernog objekta. Također, želi se iskoristiti utjecaj predefiniranosti sustava na pojavu samokalibracije, odnosno na

povećanje fleksibilnosti novog sustava, uz smanjivanje utjecaja krutosti konstrukcije i utjecaja toplinskih izvora svjetla na performanse novog digitalizacijskog sustava. Predloženom apsolutnom metodom određivanja stereoparova za unakrsno projicirane svjetlosne uzorke vremenskog faznog pomaka i Gray koda eliminirana je potreba za dvostrukim pretraživanjem faznih slika, te utjecaj diskontinuiteta. Ubrzano je indeksiranje stereoparova, pa je svaki piksel u korištenoj kameri kodiran jedinstvenim kodom, neovisno o susjednim pikselima. Kombinacijom amplitudnog filtriranja slike parcijalnih faza i gradijentnog filtriranja slike apsolutnih faza eliminirana su kritična područja te smanjen broj pogrešno identificiranih stereoparova. Povećanjem broja korištenih kamera povećava se broj nezavisno ostvarenih slikovnih osjeta iste objektne točke, što omogućuje kontrolu inicijalne kalibracije, a time i umanjivanje važnosti krutosti sustava. Iz objektivnih razloga ovaj samokalibracijski korak nije mogao biti proveden, zbog ovisnosti dostupne programske biblioteke o danas zastarjeloj arhitekturi računala. Osim na kvalitetu digitaliziranih podataka, krutost sustava utječe i na način planiranja mjerenja, prilikom kojeg treba uzeti u obzir brojne unutrašnje i vanjske parametre. Provedenim eksperimentima pokazalo se da je povećanje broja kamera kroz mogućnost variranja vanjskih parametara orijentacije kamera dovelo do povećanja potpunosti digitalizacije površine, odnosno do smanjenja neophodnog broja projekcija u odnosu na sustave prethodnih tipova. Uvođenjem 1, 2, 3, 4. načina analize, bez potrebe za dodatnim projiciranjem ili pomakom elemenata sustava, povećana je prostorna rezolucija, odnosno definicija površinskih detalja. Uvođenjem 4-3-2 postupka triangulacije omogućeno je trianguliranje i onih točaka koje nisu istovremeno vidljive u svim kamerama. Mogućnost promjene vanjskih parametara orijentacije dovodi do veće slobode u prilagođavanju projekcijskog sustava zadanom mjernom zadatku, a spregom triangulacije 4-3-2 postupkom i 1,2,3,4 načina analize postignuta je i mogućnost digitalizacije površina djelomično zasjenjenih površinskim artefaktima. Sustav je baziran na metodi izjednačavanja zrakovnog snopa, što je omogućilo uvođenje slobodnog prostornog kalibracijskog objekta. Umjesto specijalnih objekata strogo zadane geometrije i rasporeda točaka za kalibraciju, pokazano je da je novi sustav moguće kalibrirati korištenjem samo nalijepljenih markacija ili projiciranih uzoraka na i oko mjernog objekta. Za korekciju mjerila neophodan je precizno umjereni štap s dva markera.

Eksperimenti su pokazali da povećanje broja kamera utječe na ujednačavanje kalibriranih unutrašnjih parametara kamera, što je posebno izraženo kod slobodnog prostornog kalibracijskog objekta. Sustav je programiran modularno i može digitalizirati površinu s proizvoljnim brojem kamera, većim od jedan.

Smjernice budućeg razvoja:

- Projekcijski uzorak korišten za rješavanje problema jednoznačnosti zahtijeva projiciranje i digitalizaciju dvadeset snimaka po kameri, što implicira zahtjev za stacionarnim mjernim objektom. Bilo bi korisno istražiti mogućnosti zamjene projiciranja Gray koda nekim od direktnih ili objektnih projekcijskih uzoraka, te istražiti utjecaj takovog hibridnog sustava na položaj stereoparova.
- Bilo bi korisno istražiti primjenjivost novih generacija digitalnih projekcijskih uređaja s ciljem pojednostavnjenja konstrukcije projektora, te tako eliminati potrebu za fizičkim zakretom projektora, odnosno izradu stakalca s dva međusobno okomita uzorka.
- Ispitati interakciju monokromatskih izvora svjetla s definicijom stereoparova kod binarnih projekcijskih uzoraka temeljenih na vremenskom faznom pomaku ili promjeni gustoće projiciranih linija.
- Prototip sustava koristi više programskih paketa za pojedine zadaće te ih je iz čisto praktičnih razloga potrebno objediniti i povećati automatiziranost sustava. Vezano uz ovaj korak, potrebno je istražiti mogućnost povezivanja dva ili više standardnih sustava Atos u jedan sustav s više kamera.
- Ispitati mogućnost variranja kuteva projiciranja uzorka, bazirano na apsolutnom operatoru predloženom u ovom radu.
- Potrebno je pojednostavljenje postupka inicijalne kalibracije, posebno kod sustava koji koriste identične kamere i objektive.
- Optimirati algoritam metode izjednačavanja zrakovnog snopa, kako bi se u potpunosti iskoristila mogućnost samokalibracije.
- Dizajnirati faktorski eksperiment kojim bi se objasnila važnost pojedinih unutrašnjih i vanjskih utjecajnih parametara na rezultat digitalizacije.

- S ciljem standardizacije ovih sustava potrebno je definirati virtualni kalibar koji bi omogućio transparentnu usporedbu zatvorenih komercijalnih digitalizacijskih sustava.

Rekapitulacija znanstvenog doprinosa:

- Razvijeni sustav omogućuje aktivnu digitalizaciju općenitih površina korištenjem proizvoljnog broja kamera, bez potrebe kalibracije projektora te posjeduje mogućnost variranja vanjskih parametara orijentacije kamera.
- Povećanjem broja kamera matematički model metode postaje predefiniran te posjeduje mogućnost korekcije inicijalne kalibracije.
- Uvedena je kalibracija sustava slobodnim prostornim kalibrom te je eksperimentalno dokazan povoljan utjecaj na parametre matematičkog modela sustava. Mjerni objekt postaje kalibracijski objekt, što povoljno utječe na volumensku kalibraciju sustava.
- Predloženim operatorom za rješavanje problema jednoznačnosti uvedeno je kodiranje svakog piksela u kameri zasebnim jedinstvenom kodom. Operator je primjenjiv na rješavanje problema jednoznačnosti neovisno o vrsti projekcijskog uzorka ako se projekcijom definiraju dvije unakrsne stepenaste kodirane plohe.
- Gradijentnim filterom u sprezi s amplitudnim filtriranjem eliminirana su kritična područja u faznoj slici te smanjen broj pogrešno identificiranih stereoparova.
- 4-3-2 triangulacijski postupak je omogućio digitalizaciju i onih objektnih točaka koje nisu istovremeno vidljive u svim kamerama.
- Uvođenje 1,2,3,4 načina analize u kombinaciji sa 4-3-2 triangulacijskim postupkom za zadanu digitalizacijsku opremu dovelo je do povećanja prostorne rezolucije i definicije detalja na površini. To je utjecalo na postupak planiranja mjerenja, odnosno na smanjenje broja potrebnih projekcija za digitalizaciju istog mjernog područja u odnosu na sustave prvog i drugog tipa

LITERATURA

[1] F. Sadlo, T. Weyrich, R. Peikert, M. Gross, *A Practical Structured Light Acquisition System for Point-Based Geometry and Texture*, Proceedings of Eurographics Symposium on Point-Based Graphics 2005, pp. 89-98, Stony Brook, USA, 2005.

[2] D. Scharstein, R. Szeliski, *High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light*, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2003), volume 1, pages 195-202, Madison, WI, June 2003.

[3] S. Zhang, P. S. Huang, *Novel Method for Structured Light System Calibration*, Opt. Eng., Vol. 45, No. 8, pp. 083601-1-8, 2006.

[4] M. Aggarwal, N. Ahuja, *Estimating Sensor Orientation in Cameras*, 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'00) - Volume 1, pp. 896-899, Barcelona, 2000.

[5] Z. Zhang, *Camera calibration with one-dimensional objects*, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 26, Issue: 7, pages 892- 899, July 2004.

[6] Y. Ikeda, Y. Morimoto, M. Fujigaki, S. Yoneyama, *Absolute Phase Analysis Method for 3D Surface Profilometry Using Frequency Modulated Grating*, Optical Engineering, Vol. 42, No. 5,1249-1256, 2003.

[7] M. Young Kim, H. Cho, *An active trinocular vision system for sensing mobile robot navigation environments*, Sensors and Actuators A 125, pages192–209,2006.

[8] J. Sun, G. Zhang, Z. Wei, F. Zhou, *Large 3D free surface measurement using a mobile coded light-based stereo vision system*, Sensors and actuators, vol. 132, no2, pp. 460-471, 2006.

[9] L. M. Song, M. P. Wang, L. Lu, H. J. Huan, *High precision camera calibration in vision measurement*, Optics & Laser TechnologyVolume 39, Issue 7,Pages 1413-1420,October 2007.

[10] L. Lucchese, *Geometric calibration of digital cameras through multi-view rectification*, Image and Vision ComputingVolume 23, Issue 5, Pages 517-539,1 May 2005.

[11] C. Brenner, J. Böhm, J. Gühring, *Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector*, SPIE Videometrics VI', Vol. 3641, 1999.

[12] J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm, D. Fritsch, *Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector*, ISPRS Congress 2000, IAPRS 33(5), Amsterdam, Netherlands, 2000.

[13] D. Bergmann, R. Ritter, *3D deformation measurement in small areas based on grating method and photogrammetry*, Available from: http://www:gom.com.

[14] S. Jecić, N. Drvar, *The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements*, Proceedings of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Bizovac, Hrvatska, 237-244, 2003.

[15] S. Jecić, N. Drvar, *3D shape measurement influencing factors*, Matest 2004, Zagreb 2004.

[16] M. Gomerčić, *Doprinos automatskoj obradi optičkog efekta u eksperimentalnoj analizi naprezanja, doktorska disertacija*, FSB Zagreb, 1999.

[17] N. Drvar, *Usporedba metoda za određivanje oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija*, magistarski rad, FSB Zagreb, 2004.

[18] G. Hausler, *Three-dimensional sensors-potentials and limitations*, Handbook of computer vision and applications, Volume1, 485-506.

[19] M. Werman, M. Qiu, S. Banerjee, S. Dutta Roy, *Inner Camera Invariants and their Applications*, Technical Report, Dept. Computer Science and Enginnering, IIT Delhi, August 2001.

[20] R. I. Hartley, P. Sturm, *Triangulation, Computer Vision and Image Understanding*, Volume 68 , Issue 2 , Pages: 146 – 157, 1997.

[21] D. Winter, *Optische Verschiebungsmessung nach dem Objektrasterprinzip mit Hilfe eines flächenorientierten Ansatzes*, doktorat, TU Braunschweig 1992.

[22] J-A. Beraldin et al., *Active 3D Sensing*, Modelli E Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica, NRC 44159,pp 22-46, 2000.

[23] D. Forsyth, J. Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.

[24] A. Gruen, T. S. Huang, *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*, Springer Series in Information Sciences, Germany,2001.

[25] D. Oram, *Rectification for any epipolar geometry*, 12th British Machine Vision Conference (BMVC 2001), September 2001.

[26] A. Bartoli, P. Sturm, *Nonlinear Estimation of the Fundamental Matrix with Minimal Parameters*, ieee transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 26, no. 4, april 2004.

[27] H.X. Zhong *, Y.J. Pang, Y.P. Feng, *A new approach to estimating fundamental matrix*, Image and Vision Computing 24,56–60,2006

[28] Q.T. Luong, O. D. Faugeras, *The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis*, International Journal of Computer Vision, Issue Volume 17, Pages 43-75, Number 1 / January, 1996.

[29] C.L. Feng, Y.S. Hung, *A Robust Method for Estimating the Fundamental Matrix*, Proc. VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications, Sydney, 2003.

[30] Q.T. Luong, , R. Deriche, O.D. Faugeras, T. Papadopoulo, *On Determining the Fundamental Matrix: Analysis of Different Methods and Experimental Results*, INRIATR RR-1894, 1993.

[31] K. Kanatani, *Optimal Fundamental Matrix Computation: Algorithm and Reliability Analysis*, Proceedings of Symposium on Sensing via Image Information, Vol. 6;pages 291-296, 2000.

[32] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley, A Fitzgibbon, *Bundle Ajustment - A Modern Synthesis*, Vision Algorithms: Theory and Practice, Vol. 1883, pages 298-372, 2000.

[33] A.F. Habib, M. Morgan, Y.-R. Lee, *Bundle Adjustment with Self-Calibration Using Straight Lines*, The Photogrammetric Record 17 (100), 635–650, 2002.

[34] J. Salvi, X. Armangue, J. Batlle, *A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation*, Pattern Recognition 35, 1617-1635, 2002.

[35] Z. Zhang, *Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty:A Review*, International Journal of Computer Vision, 27(2), 161–198, 1998.

[36] M. Kimura, H. Saito, *3D reconstruction based on epipolar geometry*, IEICE Trans Inf Syst, vol. E84-D; no. 12, pages 1690-1697, 2001.

[37] S. Jecić, N. Drvar, *The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements*, Proceedings of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics, 237-244, 2003.

[38] W. X. Li, L. D. Mitchell, *Laser scanning system testing – errors and improvements*, Measurement 16, 91-101, 1995.

[39] G. Hausler, *Three-dimensional sensors-potentials and limitations*, Handbook of computer vision and applications, Volume1, 485-506, 1999.

[40] W. Boehler, M. Bordas, A. marbs, *Investigating laser scanner accuracy*, Proceedings of the XIXth CIPA symposium, 2003.

[41] E. Baltsavias, *A comparison between photogrammetry and laser scanning*, IPRS Journal of photogrammetry and remote sensing 54, 83-94, 1999.

[42] J. Leopold, H. Gunther, R. Leopold, *New developments in fast 3D-surface quality control*, Measurement 33, 179-187, 2003.

[43] T.A. Clarke, *An analysis of the prospects for digital close-range photogrammetry*, Photogrammetry, IPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 50(3), 4-7, 1995.

[44] A. Wendt, C. Rosing, M. Weisensee, *Comparison of different sensor types and validation of an approach for multi sensor fusion*, ISPRS Symposium Comm. V, 2002.

[45] M. Trobina, *Error model of a coded-light range sensor*, Technical Report BIWI-TR-164, ETH-Zentrum, 1995.

[46] A. Marbs, *Experiences with laser scanning at i3mainz*, CIPA Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, 2002.

[47] F. W. DePiero, M. M. Trivedi, *3-D Computer Vision Using Structured Light: Design, Calibration and Implementation Issues*, Advances in Computers (43), Academic Press, 243-278, 1996.

[48] K. Takamasu , M. Abbe, R.Furutani, S. Ozono, *Estimation of uncertainty in feature based metrology*, 5th ISMTII, 47-52, 2001.

[49] V. Mudronja, *Prilog istraživanju graničnih mogućnosti primjene trokoordinatnih mjernih uređaja s gledišta točnosti*, doktorska disertacija, FSB Zagreb, 1989.

[50] K. H. Lee, S. K. Lee, S.-M. Kim, *Design of a universal fixture for laser scanning*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology. IJAMT, 19:426-431, 2002.

[51] S. Spitz, *Dimensional inspection planning for coordinate measuring machines*, Doktorska disertacija, IRIS,1999.

[52] B. Curless, M. Levoy, *Better Optical Triangulation through Spacetime Analysis*, Proceedings of 5th International Conference on Computer Vision, 987-994, 1995.

[53] C. Liska, R. Sablatnig, *Adaptive 3D acquisition using laser light*, Czech pattern recognition workshop, 111-116, 2000.

[54] G. Godin, M. Rioux, J. A. Beraldin, M. Levoy, l. Cournoyer, F. Blais, *An assessment of laser range measurement on marble surfaces*, 5th Conference on optical 3D measurement techniques, 2001.

[55] G. Guidi, D. Ostuni, F. Costantino, M. Pieraccini, G. Tucci, J-A Beraldin, *Photogrammetry and 3D scanning: assessment of metric accuracy for the digital model of Donatello's Maddalena*, Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling. Applications of Heritage, Industry, Medicine & Land, 2001.

[56] M. Baba, D. Narita, K. Ohtani, *An advanced rangefinder equipped with a new image sensor with the ability to detect the incident angle of a light stripe*, Journal of optics A:Pure and applied optics, 10-16, 2004.

[57] K. H. Lee, H. Park, S. Son, *A framework for laser scan planning of freedom surfaces*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17, 171-180, 2001.

[58] H. Helmers, M. Schellenberg, *CMOS vs. CCD sensors in speckle interferometry*, Optics and laser technology 35:8 , 587-595, 2003.

[59] J. H. Chandler, J. G. Fryer, A. Jack, *Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement*, Photogrammatic Record, 20(109), pp. 12-27, 2005.

[60] A. F. Habib , A. M. Pullivelli , M. Morgan, *Quantitative measures for the evaluation of camera stability*, Optical Engineering, Volume 44, 2005.

[61] W.J. Hsueh, E. K. Antonsson, *Automatic high-resolution optoelectronic photogrammetric 3D surface geometry acquisition system*, Machine Vision and Applications 10(3): 98-113, 1997.

[62] T. A. Clarke, *A Frame Grabber Related Error In Subpixel Target Location*, The Photogrammetric Record 15 (86), 315–322, 1995.

[63] J. Salvi, X. Armangue, J. Batlle, *A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation*, Pattern Recognition 35, 1617-1635, 2002.

[64] C. S. Fraser, K. L. Edmundson, *The Metric Impact of Reduction Optics in Digital Cameras*, The Photogrammetric Record 15 (87), 437–446. 1996.

[65] J. Heikkilä, *Accurate camera calibration and feature-based 3-D reconstruction from monocular image sequences*, Dissertation, 1997.

[66] S.Bakula, *Prilog istraživanju vanjskih i unutrašnjih utjecaja na točnost trokoordinatnih mjernih uređaja*, Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 1996.

[67] R. G. Dordch, G. Hausler, J. Herrmann, *Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement*, Applied optics, Vol. 33 No. 7, 1994.

[68] Z. Huicheng, C. Jihong, Y. Daoshan, Z. Ji, S. Buckley, *Datacloud fusion in three-dimensional laser comparator*, Measurement 27, 93-99, 2000.

[69] J. Salvi, J. Pages, J. Batlle, *Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems,* Pattern Recognition 37(4), pp. 827-849, April 2004.

[70] R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Second Edition, Cambridge University Press, March 2004.

[71] A. Shashua, *Trilinear Tensor: The Fundamental Construct of Multiple-view Geometry and its Applications*, Lecture Notes in Computer Science: Algebraic Frames for the Perception-Action Cycle, Volume 1315/1997, Springer Berlin / Heidelberg, 1997.

[72] J. Sato, *Recovering Multiple View Geometry from Mutual Projections of Multiple Cameras*, International Journal of Computer Vision, Volume 66 , Issue 2, pages: 123 – 140, 2006.

[73] R. I. Hartley, *Lines and Points in Three Views and the Trifocal Tensor*, International Journal of Computer Vision 22(2), 125–140, 1997.

[74] C. Ressl, *Experimental Results on the Determination of the Trifocal Tensor Using Nearly Coplanar Point Correspondences*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress, Vol XXXV, Part B/3, 64 – 69, Istanbul 2004.

[75] P.H.S. Ton, A. Zisserman, *Robust parameterization and computation of the trifocal tensor*, Image and Vision Computing 15, 591-605, 1997.

[76] C. Ressl, *Geometry, Constraints and Computation of the Trifocal Tensor*, Dissertation, 2003.

[77] A. Heyden, *Geometry and Algebra of Multiple Projective Transformations*, Doctoral Thesis, Lund, Sweden, 1995.

[78] T. Moons, *A Guided Tour Through Multiview Relations*, Lecture Notes in Computer Science, volume 1506, pages 304-346, 1998.

[79] A. Heyden. *Multiple view geometry using multifocal tensors*, In *DSAGM*, Kopenhamn,1999.

[80] A. Heyden, *Tensorial properties of multiple view constraints*, Mathematical Methods in the Applied Sciences, vol. 23, pp. 169–202, 2000.

[81] A. Shashua, L. Wolf, *On the Structure and Properties of the Quadrifocal Tensor*, Lecture Notes in Computer Science, 6th European Conference on Computer Vision, Volume 1842, pages 710-724, 2000.

[82] R. I. Hartley, *Computation of the Quadrifocal Tensor*,Lecture Notes In Computer Science; Vol. 1406, Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision-Volume I, pages 20 – 35, 1998.

KRATKI ŽIVOTOPIS

Nenad Drvar rođen je 15. veljače 1976. godine u Zagrebu, gdje je završio osnovnu i potom Srednju strojarsko-tehničku školu. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu upisuje 1994. godine. Diplomirao je 1999. na usmjerenju Strojarske konstrukcije, smjer Mehaničke konstrukcije. Tijekom studija četiri godine bio je demonstrator pri Zavodu za tehničku mehaniku.

Od 2000. godine zaposlen je na Katedri za eksperimentalnu mehaniku pri Zavodu za tehničku mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u svojstvu znanstvenog novaka. Trenutno je u zvanju asistenta angažiran u nastavi te na istraživanjima u okviru znanstvenog projekta "Eksperimentalna simulacija oštećenja mehaničkih i biomehaničkih sustava" br. 0120-1201910-1907. U međuvremenu je upisao poslijediplomski studij koji je dovršio u lipnju 2004. obranom magistarskog rada pod naslovom "Usporedba metoda za određivanje oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija". U radu je proveo komparativnu analizu postojećih metoda 3D skeniranja i promjene oblika deformabilnih tijela. Za vanjske naručioce surađivao je na određivanju prostornih oblika tijela i njihovih promjena.

Aktivno sudjeluje u znanstveno-istraživačkom radu, te je do sada objavio 18 znanstvenih i stručnih radova te sudjelovao na brojnim domaćim i inozemnim znanstvenim konferencijama. Osim u istraživačkom radu, aktivno sudjeluje u izvođenju nastave iz kolegija Mehanika I i II , Fotogrametrija i vizualizacija te Eksperimentalna analiza naprezanja. Član je Hrvatskog društva za mehaniku.

Govori engleski, te se služi njemačkim jezikom.

SHORT BIOGRAPHY

Nenad Drvar was born on February 15th 1976. in Zagreb, where he graduated on Secondary School of Mechanical Engineering. He enrolled at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb in 1994. and graduated in 1999. majoring in Engineering Design. He was a student assistant for four years at the Department of Engineering Mechanics.

Since 2000. he has been working as a junior researcher at the Chair of Experimental Mechanics of the Department of Engineering Mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. At present, he is working on a scientific project number 0120-1201910-1907 "Experimental simulation of damages of mechanical and biomechanical systems". Meanwhile, he has attended postgraduate studies that he finished in June 2004 by defending his Master thesis entitled "Comparison of the methods for shape and deformation determination of the mechanical structures". In his thesis he conducted comparative analysis of the existing 3D shape and deformation scanning methods. He has been involved in industry related projects.

He has been actively involved in the research, and has published 18 professional and scientific papers, and took part in numerous international scientific conferences. Besides research activities, he has also been involved in teaching the following courses: Statics, Dynamics, Photogrammetry and Visualization, and Experimental Stress Analysis. He is a member of Croatian Society of Mechanics. He speaks English language and has a basic knowledge of German language.