Usporedba metoda za određivanje oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija

Drvar, Nenad

Scientific master's theses / Magistarski rad

2004

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:235:746665

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

USPOREDBA METODA ZA ODREĐIVANJE OBLIKA I DEFORMACIJA MEHANIČKIH KONSTRUKCIJA

MAGISTARSKI RAD

Mentor:

prof.dr.sc. STJEPAN JECIĆ

NENAD DRVAR

ZAGREB, 2004.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 539.3 : 531.7

Ključne riječi: digitalizacija prostornog oblika, mjerenje deformacija, projekcijske digitalizacijske metode, kontaktna digitalizacija, metoda kodiranog svjetla, laserska triangulacija

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: STROJARSTVO

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

Mentor rada: Prof.dr.sc. Stjepan Jecić

Broj stranica: 118

Broj slika: 64

Broj tablica: 3

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 68

Datum obrane: _____

Povjerenstvo:

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

Dr.sc. Stjepan Jecić, red.prof. – voditelj magistarskog rada

Dr.sc. Damir Semenski, izv.prof. – član povjerenstva

Dr.sc. Mirko Husnjak, doc. – član povjerenstva

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

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

SADRŽAJ

Strana:
POPIS SLIKA IV
POPIS TABELA VI
POPIS VAŽNIJIH OZNAKA VII
PREDGOVOR VIII
SAŽETAK IX
SUMMARY X
KLJUČNE RIJEČI XI

1. UVOD 1

1.1. MOTIVACIJA 2
1.2. STRUKTURA RADA 3

2. PREGLED POSTOJEĆIH METODA ZA PROSTORNO ODREĐIVANJE OBLIKA I DEFORMACIJA 4

2.1. KARAKTERISTIKE PASIVNIH MJERNIH METODA 7
2.1.1. Izvedbe pasivnih mjernih sustava 7
2.1.2. Definicija mjerne točke 8
2.1.3 Definicija mjernog volumena 10
2.1.4. Optička svojstva površine 12
2.1.5. Mogućnost mjerenja oblika i deformacija 13
2.1.6. Primjena pasivnih mjernih sustava 14
2.2. KARAKTERISTIKE AKTIVNIH MJERNIH METODA 15
2.2.1. Definicija mjerne točke 17
2.2.2 Definicija mjernog volumena 18
2.2.3. Brzina mjerenja 21
2.2.4. Svojstva površine 22
2.2.5. Mogućnost mjerenja oblika i deformacija 23
2.2.6. Mogućnost mjerenja oblika i položaja tijela koja se gibaju u realnom vremenu 23

3. IZVEDBE MJERNIH SENZORA 25

3.1. IZVEDBE KONTAKTNIH MJERNIH SENZORA 25
3.2. IZVEDBE PROJEKCIJSKIH AKTIVNIH MJERNIH SENZORA 27
3.2.1. "Single point" i "light stripe" laserski skeneri 28
3.2.2. Time-of-flight (TOF) i Time-of-scan (TOS) laserski sustavi 31
3.2.3. Projiciranje strukturiranog svjetla.....33
3.2.4. Interferometrijski sustavi.....36

4. TEORIJSKE OSNOVE METODA 37

4.1. METODA PROJEKCIJSKOG KODIRANOG NEKOHERENTNOG SVJETLA 37
4.2. PRINCIP TRIANGULACIJE PROJEKCIJOM LASERSKOG KOHERENTNOG SVJETLA 46
4.3. PRINCIP DJELOVANJA KONTAKTNIH TMU 52
4.3.1. Mehanička struktura 53
4.3.2. Mjerni sustav 54
4.3.3. Mjerna glava.....55
4.3.4. Upravljačka jedinica i programska podrška 57
4.3.5. Pogonski sustav 57

5. TEMELJI USPOREDBE MJERNIH SUSTAVA 58

5.1. ANALIZA VANJSKIH FAKTORA 59
5.1.2. Karakteristike mjernog objekta 60
5.1.3. Utjecaji okoliša 71
5.1.4. Tehnološki utjecaji.....74
5.1.5. Rukovanje mjernom opremom 77
5.1.6. Programska podrška 78
5.1.7. Ljudski faktor 80
5.1.8. Zahtjevi naknadne obrade podataka 81
5.2. ANALIZA UNUTRAŠNJIH FAKTORA 82
5.2.1. Kontaktni TMU.....82
5.2.1. Projekcijski sustavi 82

6. EKSPERIMENTALNI DIO 92

6.1. KONCEPCIJA EKSPERIMENTA 92
6.2. PRIKAZ PROIZVOĐAČKIH SPECIFIKACIJA KORIŠTENIH MJERNIH SUSTAVA 94
6.2.1 Projekcijski sustav Atos 94
6.2.2. Laserski sustav Cyberware Mini-model shop 3030RGB/HIREZ/MM 95
6.2.3. Kontaktni trokoordinatni mjerni uređaj Ferranti Merlin 750 97
6.3. OPIS POSTUPKA I REZULTATA MJERENJA 98
6.3.2. Mjerenje sa projekcijskim sustavom ATOS 98
6.3.3. Mjerenje sa projekcijskim sustavom Cyberware 99
6.3.1. Mjerenje sa TMU Ferranti Merlin 750 103

7. RASPRAVA 105

7.1. UTJECAJ VANJSKIH FAKTORA 105
7.2. UTJECAJ UNUTRAŠNJIH FAKTORA 109
7.3. ANALIZA DIGITALIZIRANIH PODATAKA 110
7.3 KONSTRUKCIJA DODIRNIH PLOHA I LINIJE SRHA 113

8. ZAKLJUČAK 114

LITERATURA 115

KRATKI ŽIVOTOPIS

SHORT BIOGRAPHY

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela mjernih metoda s obzirom na način definicije mjerne točke 5
Slika 2. Izvedbe pasivnih mjernih sustava 8
Slika 3. Uz definiciju pasivnih mjernih točaka 9
Slika 4. Uz definiciju mjernog volumena 11
Slika 5. Primjeri upotrebe pasivnih metoda za mjerenje a) deformacija
b) oblika konstrukcije 13
Slika 6. Ilustracija trenutnih vidnih polja 18
Slika 7. Uz definiciju mjernog volumena 19
Slika 8. Uz definiciju brzine mjerenja 22
Slika 9. Shematizirani prikaz i realne izvedbe nekih osnovnih tipova TMU: a) konzolna,
b) portalna, c) mostna, d) stupna izvedba TMU 26
Slika 10. Područja primjene projekcijskih sustava 27
Slika 11. Shematizirana postava a) single point senzora
b) sa fotografijom projicirane točke 28
Slika 12. a) Shematizirana postava laserskog linijskog projekcijskog sustava sa
b) fotografijom projicirane linije 29
Slika 13. Putanja laserske zrake po zatvorenoj Lissajousovoj krivulji 30
Slika 14. Princip TOF sustava 31
Slika 15. Princip TOS sustava 32
Slika 16. Neke od varijanti projiciranih strukturiranih svjetlosnih uzoraka 33
Slika 17. Izvedbe projekcijskih senzora 35
Slika 18. Primjer interferometrijskog mjerenja oblika Moire efektom 36
Slika 19. Projekcijski mjerni senzor "Atos" 37
Slika 20. Princip projekcijskog senzora "Atos" (izvor http://www.gom.com) 38
Slika 21. Uz definiciju koordinatnih sustava 39
Slika 22. Veza slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljne orijentacije kamere 40
Slika 23. Triangulacija položaja točke P primjenom dvije kamere 41
Slika 24. Princip epipolarne ravnine 42
Slika 25. Princip metode vremenskog faznog pomaka 44
Slika 26: Princip metode Gray koda 44

Slika 27. Parcijalne, stepenaste i apsolutne faze izračunate kombinacijom metode vremenskog faznog pomaka i metode Gray koda 45
Slika 28. Princip triangulacije 46
Slika 29. Postava osnovnog laserskog projekcijskog sustava 47
Slika 30. Shematski prikaz postave mjernog senzora 49
Slika 31. Definicija koordinatnih sustava 50
Slika 32. Elementi kontaktnog TMU 52
Slika 33. Izvedbe vodilica kod TMU: a) kombinacija ravne i v-vodilice, 54
Slika 34: Shema a) transmisijskog i b) refleksijskog mjernog sustava 55
Slika 35. Princip djelovanja "trigger" i analogne mjerne glave 57
Slika 36. Princip pristupnog konusa 63
Slika 37. Utor koji se može izmjeriti, ali mu je dostupnost nedostatna 64
Slika 38. Zasjenjenost senzora površinskim artefaktom 64
Slika 39. Uz utjecaj površinske geometrije 65
Slika 40. Djelomična rekonstrukcija kocke 65
Slika 41. Kalota otiska glave ticala na površini čeličnog uzorka 67
Slika 42. Gubitak definicije točke zbog prodiranja 67
Slika 43. Uz definiciju komponenata površinskih refleksija 68
Slika 44. Refleksija svjetla sa Lambertske površine 69
Slika 45. Refleksija svjetla sa refleksne površine 69
Slika 46. Simulacija odziva a) Lambertske i b) refleksijske površine 70
Slika 47. Prividni pomak položaja centra projicirane točke 70
Slika 48. Formiranje zrnatosti 71
Slika 50. Projekcijski sustav Atos standard 94
Slika 51. Laserski sustav Cyberware Mini-model shop 3030RGB/HIREZ/MM 95
Slika 52. Kontaktni TMU Ferranti Merlin 750 97
Slika 53. Kalibracija ticala kuglastim kalibrom 98
Slika 54. Prihvat mjernog objekta 98
Slika 55. Rezultati mjerenja sa TMU Ferranti Merlin 750 99
Slika 56. Rezultati mjerenja sa projekcijskim sustavom Atos 101
Slika 57. Detalj digitalizacije udubljene strane 102
Slika 58. Detalj digitalizacije ispupčene strane 102
Slika 59. Rezultati mjerenja sa projekcijskim sustavom Cyberware 104
Slika 60. Numerička usporedba rezultata mjerenja 110
Slika 61. Detalj površine digitaliziran sustavom Atos 111

Slika 62. Usporedni prikaz detalja površine digitaliziranog a) laserskim sustavom Cyberware, b) sustavom Atos 112
Slika 63. Rekonstrukcija površine nalijeganja 113
Slika 64. a) prostorna linija srha, b) projekcija linije srha na baznu ravninu 113

POPIS TABELA

Tabela 1. Usporedni prikaz karakteristika nekih komercijalnih laserskih senzora 30
Tabela 2. Usporedni prikaz mjernih karakteristika nekih komercijalnih senzora 35
Tabela 3. Ovisnost kontaktne sile o promjeru ticala 66

POPIS VAŽNIJIH OZNAKA

Mala slova

$a(x,y,t)$	- srednja vrijednost svjetloće piksla
c	- konstanta kamere, mm ili pikseli
d	- duljina bazne linije, mm
$s(x,y,t)$	- srednja vrijednost svjetloće piksla
$\mathbf{t}$	- vektor translacije, mm, piksli
$\mathbf{x}_c$	- koordinate objektne točke u odnosu na koordinatni sustav kamere, mm, piksli
$\mathbf{x}_f$	- koordinate objektne točke u odnosu na koordinatni sustav mjernog senzora, mm, piksli
$\mathbf{x}_w$	- koordinate objektne točke u odnosu na koordinatni sustav mjernog objekta, mm, piksli
x, y, z	- koordinatni sustav kamere, piksli
x_0, y_0	- slikovne koordinate glavne točke snimanja
z	- predmetna duljina, mm

Velika slova

$I(x,y,t)$, $I_{1..4}$	- intenzitet svjetloće piksla
K_1	- koeficijent radijalne distorzije
R	- matrica transformacije koordinatnog sustava
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
$\delta(x,y,t)$	- apsolutna faza u promatranom pikslu
θ	- deflektorski kut projicirane zrake, rad
σ_z	- standardna devijacija pogreške određivanja koordinate z
Φ	- kut vidnog polja, rad

Oznake u tekstu

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

PREDGOVOR

Četverogodišnji rad vezan uz optičke metode digitalizacije oblika i deformacija prostornih elemenata mehaničkih konstrukcija uglavnom predstavlja moju dosadašnju aktivnost te je ujedno i glavni povod za izradu ovog rada. Praćenjem literature, kao i izravnim kontaktom sa industrijom kao korisnikom usluga i proizvođačima mjernih senzora, primijećena su velika odstupanja u terminologiji i poznavanju osnovne problematike spomenutih digitalizacijskih metoda. S obzirom na dostupnu literaturu, zaključeno je da se istraživači uglavnom bave specifičnostima vezanim uz pojedine realne izvedbe mjernih senzora, te da se radovi koji se bave usporedbom mjernih sustava zapravo svode samo na usporedbu rezultata mjerenja. Pri tom se zaboravlja na činjenicu da će kod digitalizacije iste scene s dvjema istim mjernim senzorima, ali s različitim mjeriteljima nerijetko dati međusobno potpuno različite rezultate. Ovdje se vjerojatno odražava i krivnja ljudske prirode, kojoj su teško pojmljive rezolucije i točnosti reda veličine manjeg od jednog milimetra. Također je primijećeno da velik broj proizvođača optičkih digitalizacijskih senzora ne publicira temeljne matematičke modele svojih tehnologija, te time njihov mjerni uređaj postaje neusporediv sa bilo kojim drugim postojećim istovrsnim digitalizacijskim sustavom. Ovaj problem se očituje i u nedostatku standardizacije kojom do danas nije zadovoljavajuće pokriveno područje aktivnih i pasivnih beskontaktnih optičkih digitalizacijskih senzora. Ovim radom pokušalo se sistematizirati dostupno publicirano znanje, u vidu analize unutrašnjih i vanjskih utjecajnih parametara. Nadam se da će postati zanimljivo i korisno štivo svima onima koji su se već imali ili će se u budućnosti imati prilike susretati sa problemima digitalizacije i analize geometrije nekog proizvoljnog prostornog objekta.

U prvom redu, najveću zahvalnost na odabiru ovog izuzetno zanimljivog i iznimno aktualnog područja rada, kao i na pruženoj podršci, razumijevanju i strpljenju, dugujem svom mentoru, akademiku Stjepanu Jeciću. Nadalje, ugodna mi je dužnost zahvaliti se abecednim redom svim sadašnjim i bivšim kolegama i suradnicima sa Katedre za eksperimentalnu mehaniku na svakodnevnoj ugodnoj suradnji i asistiranju prilikom provođenja eksperimenata: Ante, Anthony, Gordane, Janošu i Mladene – velika vam hvala. Posebno bih još jednom izdvojio dr. M. Gomerčića kao neumoran izvor savjeta i svježih informacija, koji trenutačno radi na Atos-u, jednom od trenutačno najprihvaćenijih sustava za beskontaktnu digitalizaciju. Ne smijem izostaviti niti doc. dr. M. Husnjaka i prof. D. Semenskog kao izvore vrijednih informacija te pomoći pri ostvarivanju vrijednih kontakata sa industrijom. Svima vam još jednom – hvala!

Ovim putem želio bih se dodatno zahvaliti i prof. V. Mudronji, voditelju Katedre za mjerenja i kontrolu pri FSB-Zagreb, te gospodinu K. Curiću dipl. ing. iz Centra za proizvodne postupke na razumijevanju i ustupljenom vremenu na mjernim sustavima korištenim prilikom izrade ovog rada.

Na kraju, velika hvala mojoj obitelji bez koje ništa ne bi bilo moguće.

U Zagrebu, svibanj 2004.

Autor

SAŽETAK

U ovom radu izvršena je usporedba nedestruktivnih metoda za određivanje kompletnih ili parcijalnih prostornih oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija. Pritom su se analizirale aktivne optičke projekcijske metode, koje položaj mjerne točke na konstrukciji definiraju projekcijom koherentnog i nekoherentnog svjetla, te aktivne kontaktne metode koje položaj mjerne točke definiraju izravnim dodirom s površinom mjernog objekta. Za svaki od navedenih tipova mjernih metoda definirani su unutrašnji i vanjski utjecajni faktori koji utječu na postupak planiranja i provođenja, kao i mjernu nesigurnost ostvarenih rezultata.

Prvim dijelom rada dan je pregled postojećih metoda za određivanje prostornog oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija, prikazane su realne izvedbe pripadajućih mjernih sustava, te predstavljeni teoretski principi za postojeće mjerne senzore dostupne u Hrvatskoj.

U drugom dijelu rada, na osnovu postavljenih temelja usporedbe (baziranih na ocjeni unutrašnjih i vanjskih utjecajnih faktora), izvršena je eksperimentalna verifikacija teoretskih postavki i dana ocjena primjenjivosti na konkretnom praktičnom problemu određivanja nalijegne površine i položaja srha sirovog odljevka volana automobilskog upravljačkog mehanizma. Mjerenja su vršena sa trenutno u Hrvatskoj dostupnim digitalizacijskim uređajima: projekcijskim senzorom Atos, laserskim senzorom Cyberware Mini-model shop 3030/HIREZ/MM, te kontaktnim trokoordinatnim mjernim uređajem Ferranti Merlin 750.

Postignuti rezultati opravdali su provedbu usporedbe u odnosu na definirane unutrašnje i vanjske utjecajne parametre. Pokazalo se da široko područje uzroka unutrašnjih i vanjskih utjecaja (npr. optički, materijalni ili okolišni utjecaji) zahtijeva multidisciplinaran pristup prilikom usporedbe pojedinih mjernih metoda i pripadajućih mjernih senzora.

SUMMARY

This paper presents a comparison of nondestructive measurement methods which are suitable for determination of the complete or partial shape and deformations of real mechanical structures. The comparison was based on the analysis of the active optical projection based methods that define relative position of the measurement point by means of coherent and non-coherent structured light projection, as well as the active contact methods that define measurement point position by means of a direct physical contact with the surface of measurement object. For each of mentioned measurement methods internal and external influencing factors were defined.

First part of this paper presents a review of the existing shape and deformation measurement methods, both real variants of the associated measurement sensors are presented together with theoretical principles of sensors currently available in Croatia.

Second part of this paper, based upon the introduced influence factors, presents the experimental verification of presented theory by comparative measurement of the actual industrial problem: saddle form surface design with burr line extraction on the raw aluminum model of a steering wheel. Measurements were conducted on the currently available digitizers: non-coherent structured light sensor "Atos", laser senzor Cyberware Mini-model Shop 3030/HIREZ/MM, and a contact probe system Ferranti Merlin 750.

The achieved results justify introduced theoretical comparison based on the influence of internal and external parameters. It is shown that the wide basis of possible internal and external influencing factors require multidisciplinary approach to the comparison of each methods together with the associated measurement sensors.

KLJUČNE RIJEČI

HRVATSKI	ENGLESKI
digitalizacija prostornog oblika	shape digitalization
mjerenje deformacija	deformation measurement
projekcijske digitalizacijske metode	projection digitalization methods
kontaktna digitalizacija	contact digitalization
metoda kodiranog svjetla	coded light method
laserska triangulacija	laser triangulation

1. UVOD

Usporedno s naglim razvojem elektroničkih računala, zamjetno je da tijekom zadnjih dvadesetak godina dvadesetog stoljeća dolazi i do intenzivnog razvoja trokoordinatnih mjernih metoda i sustava koji omogućuju kontaktno i beskontaktno određivanje parcijalnog ili kompletnog oblika i dimenzija prostornih tijela. Ovom tempu intenzivnog razvoja iznimno su pogodovale i novostečene znanstvene spoznaje ostvarene u područjima fizike, optike, znanosti o materijalima te, naravno, mjeriteljstva. Pogodovao mu je i razvoj novih vrsta koherentnih i nekoherentnih izvora svjetla, te uređaja za akviziciju slike baziranih na CCD - i u novije vrijeme - CMOS tehnologijama. Značajan poticaj ovom naglom razvoju predstavlja dakako i izniman interes raznih grana industrije, koja uslijed velikog broja tržišnih konkurenata i nužnosti opstanka na sve zahtjevnijem svjetskom tržištu teži uvođenju onih tehnologija koje će omogućiti skraćivanje i pojeftinjenje proizvodnog procesa, doprinoseći pritom značajnim ulaganjima u razvoj novih tehnologija koje takove napretke omogućuju. Budući da mjerenje geometrije bez kvalitetne interpretacije mjernih rezultata nema samo po sebi nikakvu svrhu, usporedno s razvojem mjernih metoda razvijaju se i numeričke računalne metode parametarskog modeliranja prostornih CAD modela, numeričke simulacijske metode poput metode konačnih elemenata te raznih metoda za brzu produkciju modela iz polimernih materijala, direktno iz prostornih računalno generiranih modela (eng. rapid prototyping).

Brzi tempo razvoja novih proizvoda kao i zahtjeva za novim primjenama već postojećih mjernih senzora nerijetko postavlja pred istraživače i proizvođače mjerne opreme zahtjeve za razvoj specifičnih, netipskih izvedbi trokoordinatnih mjernih senzora, ovisno o trenutnim zahtjevima digitalizacije prostorne geometrije mjernog objekta, a nadasve specifičnosti površinske geometrije mjernog objekta. Pritom se ovi zahtjevi pretežno odnose na:

- zahtjeve postizive točnosti i pouzdanosti akvizicije mjernih informacija,
- zahtijevanu prostornu i mjernu rezoluciju odabrane metode,
- brzinu prikupljanja mjernih informacija (broj osjeta u jedinici vremena) i kapacitet mjerenja,
- potpunost digitalizacije mjernog volumena,
- mogućnost promjene veličine mjernog volumena i fleksibilnost prilagodbe novim mjernim objektima,
- neosjetljivost metode na mehanička i optička svojstva površine mjernog objekta,
- neosjetljivost metode na nagle diskontinuitete na mjerenoj površini,
- mjernu ekonomičnost i cijenu koštanja mjernog sustava,
- kontrolu mjernog procesa u realnom vremenu,
- stupanj automatiziranosti i brzinu obrazovanja operatora za korištenje metode,
- mogućnost prijenosa podataka u poznate CAD sustave,
- ostale specifične zahtjeve mjeritelja.

Široki spektar navedenih zahtjeva ukazuje na činjenicu da je za njihovo optimalno zadovoljenje potrebno temeljito poznavanje ne samo teoretskih osnova i temeljnih mjernih principa mjernih metoda, već i mogućnosti i ograničenja pripadajućih mjernih senzora prilikom njihove primjene u realnim mjeriteljskim situacijama. Poznavanje teoretskih principa mjernih metoda pruža osnovu za odabir odgovarajuće mjerne metode koja će sa svojim karakteristikama garantirati najekonomičnije zadovoljavanje postavljenih mjeriteljskih zahtjeva, ali će se samo uz iscrpno poznavanje odziva i ponašanja realnih

mjernih senzora u zadanim radnim uvjetima moći odabrati ona metoda i onaj tržišno raspoloživi mjerni senzor koji će zadovoljiti većinu zahtjeva koje su postavili mjeritelji.

1.1. Motivacija

Tijekom navedenog razvojnog perioda, usporedno su se razvijale metode koje omogućuju iznimno precizna mjerenja duljine, tj. razmaka između samo dvije mjerne točke na površini mjernog objekta [1], te mjerne metode koje omogućuju iznimno veliki broj osjeta [2] unutar zadanog mjernog volumena tijekom relativno kratkog vremenskog perioda, pružajući time iscrpnu informaciju o kompletnoj geometriji promatranog mjernog objekta. Posebna se pažnja posvetila razvoju nedestruktivnih metoda za akviziciju kompletnog prostornog oblika i deformacija mjernih objekata kojih se temperaturno stanje, geometrija i položaj u prostoru tijekom procesa mjerenja ne mijenjaju. (Mjerenja krutih tijela u trenutnoj stacionarnoj konfiguraciji, o čemu će više biti govora u poglavlju 3).

Kako se kontaktni trokoordinatni mjerni uređaji (TMU) razvijaju još od početka šezdesetih godina prošlog stoljeća, tako je u tom području dostupna i odgovarajuća opsežna dokumentacija o konstrukciji i faktorima koji utječu na pouzdanost mjernih vrijednosti. Tako su usvojeni standardi koji omogućuju nedvosmislenu međusobnu usporedbu i klasifikaciju postojećih tržišno dostupnih mjernih senzora po klasama postizive mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja prilikom standardiziranih mjernih postupaka (npr. ISO 10360-(1 do 6), ISO 14253-(1 do 4), ISO 15530-3, ANSI/ASME B89, VDI / VDE 2617-(1 do 7), VDI / VDE 2627).
Zbog velikog broja varijanti tržišno dostupnih optičkih mjernih senzora čiji se osnovni principi djelovanja temelje na međusobno nerijetko raznorodnim tehnologijama i nepoznavanju utjecaja pojedinih vanjskih i utjecajnih faktora na mjerni rezultat, upravo u smislu njihove standardizacije, kod optičkih mjernih metoda koje omogućuju određivanje kompletne geometrije i deformacije mehaničkih konstrukcija, čak i nakon više od četvrt stoljeća intenzivnog razvoja ne postoje jasno razrađene procedure za izražavanje mjerne nesigurnosti. (Postoje npr. njemačke preporuke VDI/VDE 2634, ali ne u smislu standarda). Posljedica ove nedorečenosti je konfuzna situacija na tržištu optičkih mjernih senzora, budući da proizvođači redovito izražavaju očekivane točnosti i rezolucije vlastitih mjernih senzora na temelju provedenih mjerenja koja ne samo da nisu službeno prihvaćena od široke mjeriteljske zajednice, te samim time međusobno usporediva, već nerijetko nisu niti odgovarajuće dokumentirana i potencijalnom korisniku kvalitetno prezentirana. Slično je stanje i u korištenoj terminologiji, budući da se pojam trokoordinatnih mjernih uređaja po inerciji i dalje odnosi na kontaktne TMU, zanemarujući pritom da je ostvarivanje prostornih osjeta danas moguće i s vrlo velikim brojem beskontaktnih mjernih metoda (slika 1). Nesređena situacija po pitanju standardizacije onemogućava i redovito periodičko atestiranje mjernih senzora od strane nadležnih institucija, tako da time niti sami korisnici redovito iznimno skupih optičkih mjernih sustava zapravo nemaju prave informacije o trenutnoj očekivanoj mjernoj nesigurnosti korištenih mjernih sustava, kao ni pouzdan način usporedbe sa ostalim tipovima mjernih senzora.

Stoga je cilj ovog rada po prvi puta u literaturi postaviti temelje relativne ocjene kontaktnih i beskontaktnih trokoordinatnih mjernih metoda na temelju analize unutrašnjih i vanjskih parametara koji utječu na točnost i primjenljivost pojedine metode, odnosno pripadajućeg mjernog sustava.

1.2. Struktura rada

U drugom poglavlju dan je sažeti pregled i diskusija postojećih aktivnih i pasivnih metoda za određivanje oblika i deformacija prostornih geometrijskih oblika. Prikazane su njihove općenite karakteristike i interakcije realnih mjernih senzora sa predmetom mjerenja koje je potrebno uzeti u obzir prilikom međusobne usporedbe kontaktnih i beskontaktnih metoda i pripadajućih mjernih senzora dostupnih u Hrvatskoj.

Proširenje prethodnog poglavlja dolazi u trećem poglavlju, u vidu prikaza realnih izvedbi mjernih senzora, kod njih primijenjenih aktivnih tehnologija definiranja mjerne točke, potrebnih sklopova mjernih uređaja te diskusije temeljnih principa djelovanja nekih osnovnih tipova mjernih sustava, bez ulaženja u teoretske osnove pojedinih metoda.

Četvrto poglavlje donosi teoretske osnove metoda baziranih na projekciji koherentnog i nekoherentnog svjetla te izravnom kontaktu ticala sa površinom mjernog senzora kojih će se odziv u realnim uvjetima mjerenja analizirati u okviru petog i šestog poglavlja.

Kroz raspravu vanjskih i unutrašnjih utjecajnih faktora koji utječu na točnost i pouzdanost pojedine mjerne metode u petom poglavlju postavljeni su temelji relativne ocjene svake od analiziranih metoda koji će se u šestom poglavlju eksprimentalno primijeniti na trenutno dostupnim komercijalnim mjernim senzorima, s težištem na slijedećim karakteristikama: razini očekivane i postignute točnosti, području i uvjetima primjene pojedinog mjernog sustava, dimenzijama mjernog volumena, prostornoj rezoluciji te mogućnosti akvizicije kompletnog mjernog volumena, prostornoj i međusobno relativnoj raspodjeli mjernih točaka s obzirom na potrebe naknadne analize rezultata mjerenja, potrebi predznanja o geometrijskim karakteristikama mjernog objekta, a vezano za planiranje mjerenog postupka, te ostvarenom stupnju automatiziranosti, ergonomičnosti i ekonomičnosti metode.

U šestom poglavlju eksperimentom je verificiran utjecaj unutrašnjih i vanjskih utjecajnih parametara na realnom industrijskom prostornom mjernom objektu, preko komparativnog mjerenja provedenog na varijantama mjernih senzora dostupnih u Hrvatskoj, tj. u četvrtom poglavlju analiziranih kontaktnih i beskontaktnih mjernih senzora.

Sedmo poglavlje donosi interpretaciju rezultata provedenih eksperimenata, temeljenu na analizi utjecaja unutrašnjih i vanjskih parametara definiranih petim poglavljem.

Rad završava osmim, zaključnim poglavljem u kojem se analiziraju rezultati rada te predlažu pravci daljnjih istraživanja.

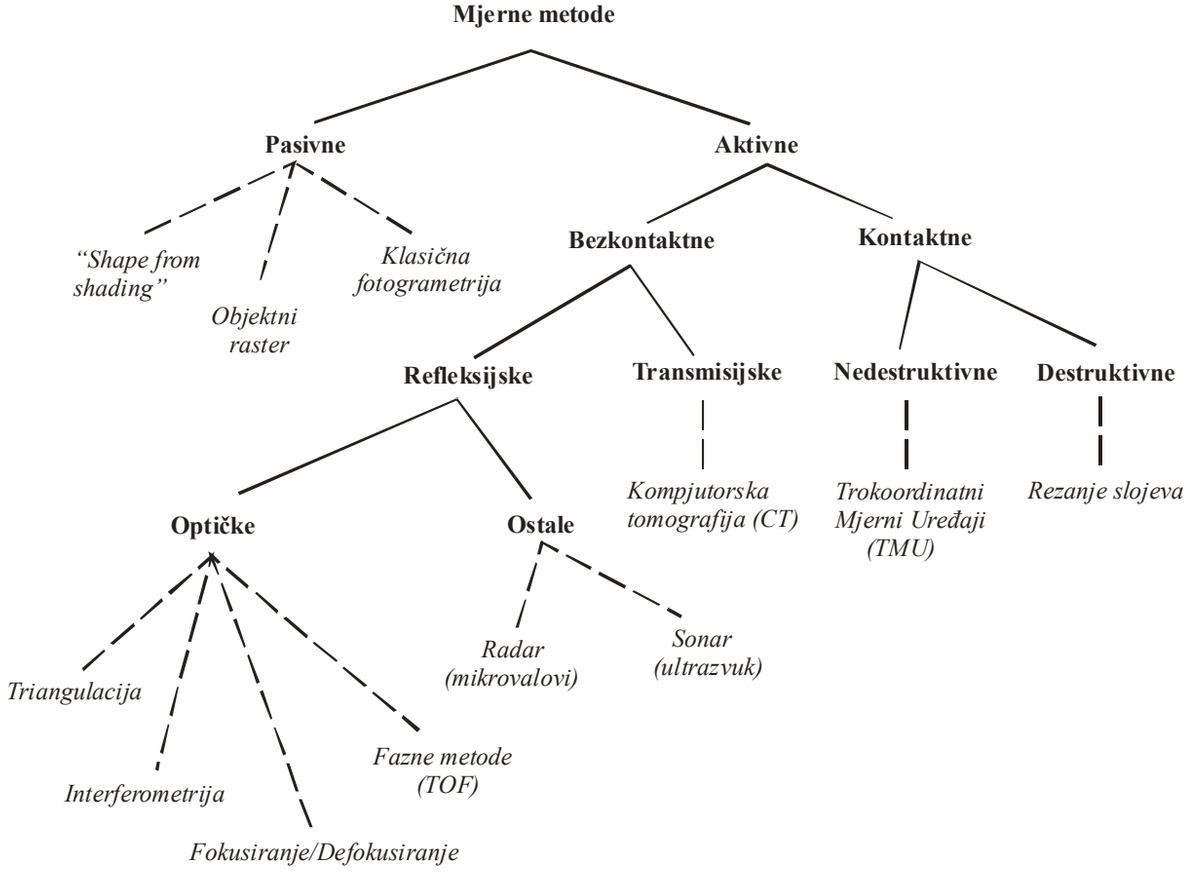
2. PREGLED POSTOJEĆIH METODA ZA PROSTORNO ODREĐIVANJE OBLIKA I DEFORMACIJA

Na temelju usporedbe broja postojećih mjernih metoda (slika 1.) za određivanje oblika i dimenzija prostornih tijela, koje su danas u intenzivnoj uporabi u mjerne svrhe sa ogromnom količinom publiciranih radova u posljednjih dvadesetak godina [2], lako je zaključiti da tijekom tog vremenskog perioda većina objavljenih radova nije predstavljala neki novi značajan doprinos koji bi rezultirao u novim mjernim metodama. Doprinos istraživača najvećim dijelom bio je usmjeren prema usavršavanju postojećih saznanja i analizi, te otklanjanju uzroka glavnine mjernih pogrešaka. Tako su s vremenom evoluirale mjerne metode koje prema načinu definiranja mjerne informacije razlikujemo kao *aktivne* i *pasivne* mjerne metode.

Aktivne mjerne metode u općenitom smislu definiraju prostorni položaj trenutno promatrane objektne mjerne točke na površini mjernog objekta relativno u odnosu na mjerni senzor. To se postiže bilo neposrednim fizičkim kontaktom vrhom kontaktnog ticala senzora (kao kod Trokoordinatnih Mjernih Uređaja - TMU, odn. CMM iz *eng.* Coordinate Measuring Machines) s površinom mjernog objekta, bilo posredno bez direktnog mehaničkog kontakta mjernog senzora i površine mjerenog objekta, a preko projiciranja neke vrste energije na mjerni objekt i analizom povratnog signala (npr. projiciranjem koherentnog ili nekoherentnog svjetla, ultrazvuka, infracrvenih ili X-zraka i sl.). Zbog mogućnosti jednoznačnog referenciranja objektnih koordinata u odnosu na trenutnu konfiguraciju koordinatnog sustava mjernog senzora, ovakav način definicije mjerne točke aktivne mjerne metode čini ih prikladnim za određivanje oblika mjernog objekta.

Za razliku od aktivnih, sve *pasivne* mjerne metode omogućuju dobivanje mjernih informacija o položaju mjerne točke bez ikakve potrebe za fizičkom interakcijom mjernog senzora sa površinom mjernog objekta. Pritom koriste samo postojeće ili naknadno nanesene karakteristike optički vidljive na površini mjernog objekta (geometrijski pravilne markacije tj. pravilna ili stohastička struktura površine mjernog objekta). Takav način definicije mjerne točke čini ih prikladnim za određivanje deformacija na površini mjernog objekta jer omogućuju vremensko praćenje položaja mjerne točke relativno u odnosu na koordinatni sustav u kojem se nalazi mjerni objekt.

Primjer osnovne klasifikacije postojećih mjernih metoda s obzirom na karakter metode kojom se vrši definicija položaja mjerne točke radi dobivanja pouzdane mjerne informacije dan je slikom 1 [3].



Slika 1. Podjela mjernih metoda s obzirom na način definicije mjerne točke

Prema podjeli mjernih metoda s obzirom na način definicije mjerne točke (slika 1), te sudeći po nesrazmjernom broju postojećih aktivnih mjernih metoda u odnosu na pasivne, vidljivo je da je dosadašnji razvoj aktivnih mjernih metoda bio značajno intenzivniji od razvoja pasivnih mjernih metoda. Ova se tendencija u novije vrijeme donekle mijenja kroz intenzivnu potrebu za razvojem elemenata strojnog vida (npr. navođenje robota, medicinska dijagnostika i sl.). Tome naročito pogoduje činjenica što pasivne optičke mjerne metode za definiciju položaja mjerne točke ne zahtijevaju dodatni vanjski izvor energije, već se za definiciju mjerne točke koriste već postojećim ili naknadno nanesenim pasivnim markacijama na samoj mjerenoj površini. Stoga su zbog pojednostavljene konstrukcije mjernih senzora takovi sustavi danas obično jeftiniji od ekvivalentnih aktivnih.

Intenzivniji razvoj aktivnih metoda započeo je šezdesetih godina prošlog stoljeća te je tijekom proteklog vremena išao u dva naizgled suprotna smjera. Inicijalno je razvoj kontaktnih metoda bio intenzivniji u odnosu na razvoj beskontaktnih, da bi s razvojem računala u posljednjih dvadesetak godina prošlog stoljeća započeo nagli razvoj beskontaktnih mjernih metoda.

Kod kontakta je temeljni princip zapravo vrlo jednostavan. Za digitalizaciju mjernog objekta potrebno je prikladno konstruiranim ticalom uzastopno doticati površinu mjernog objekta, kontakt ispravno detektirati i na temelju dostupnih podataka o smjeru i intenzitetu interakcije

s mjernim objektom izvesti zaključak o položaju mjerne točke. Zbog toga je zapravo i smjer razvoja kontaktnih senzora dosegao svoj vrhunac uvođenjem računala i adekvatnih mjernih senzora.

Potreba za izravnim dodirom mjernog senzora sa površinom mjernog objekta izbjegnuta je razvojem beskontaktnih mjernih senzora čiji se trenutni razvojni status može podijeliti na refleksijske metode (koje su ograničene na određivanje vanjskog oblika mjernih objekata frekvencijskim rasponom projiciranog zračenja od 0.01 MHz (ultrazvuk), preko područja mikrovalova (od 10 do 100GHz), kroz frekvencijsko područje vidljivog svjetla (od 100 do 1000THz)), te na transmisijske metode (koje projekcijom elektromagnetskog zračenja frekvencija većih od 1000THz (X-zrake) omogućuju određivanje gustoće volumena u i oko mjernog objekta). Kako su transmisijske metode u ovom frekventnom području zapravo iznimno štetne za ljudsko zdravlje i nisu prikladne za široku mjeriteljsku primjenu kakovu zahtijeva današnji industrijski razvoj, glavnina razvoja je usmjerena upravo na refleksijske metode za mjerenje oblika u području frekvencijskog opsega vidljivog svjetla.

Na osnovu provedene diskusije podjele mjernih metoda prema načinu definiranja mjerne točke može se zaključiti da će se u ovom radu zapravo uspoređivati trenutno stanje razvoja aktivnih beskontaktnih optičkih refleksijskih projekcijskih mjernih metoda: one položaj mjerne točke na površini mjernog objekta definiraju triangulacijskim metodama u odnosu na aktivne kontaktne nedestruktivne mjerne metode. Već i ovakva definicija teme rada koja uopće ne uzima u obzir specifičnosti izvedbe pojedinih mjernih senzora i njihove interakcije s mjernim objektom zorno govori o kompleksnosti ove zadaće.

Potrebno je istaknuti da je podjela prikazana slikom 1, u dijelu koji se odnosi na optičke beskontaktne mjerne metode za određivanje oblika, zapravo samo orijentacijski prikazana, budući da navedene metode svoj puni zamah u području određivanja oblika i geometrije mjernih objekata, kao i određivanja deformacije upravo ostvaruju. Iz tog razloga izrazito je teško kontinuirano pratiti i klasificirati sve one metode koje su trenutno u svom razvojnom stadiju.
Također, prikazana podjela ne pokazuje ni danas izraženu tendenciju hibridne sprege opisanih metoda, primjerice spregu pasivnih fotogrametrijskih i aktivnih optičkih projekcijskih metoda s ciljem transformacije koordinatnih sustava, niti spregu kontaktnih trokoordinatnih mjernih uređaja koji djelomice ili kompletno zamjenjuju mjerne glave sa projekcijskim aktivnim mjernim elementima.

Iako pasivne metode nisu izravan predmet ovog rada, u nastavku ovog poglavlja biti će prikazane neke usporedne zajedničke karakteristike aktivnih i pasivnih mjernih metoda koje se mogu u općenitom smislu ovdje diskutirati, kako bi se u kasnijim poglavljima čitatelju lakše prikazali osnovni pojmovi i problematika koja se javlja prilikom upotrebe senzora baziranih na aktivnim i pasivnim mjernim principima, kao i njihovim hibridnim varijantama.

2.1. Karakteristike pasivnih mjernih metoda

Da bi se neka mjerna metoda mogla smatrati pasivnom, treba biti zadovoljen temeljni uvjet nepostojanja interakcije, tj. direktnog fizičkog kontakta između površine mjernog objekta koju se digitalizira i samog uređaja za mjerenje (mjernog senzora). Iz navedenog izravno slijedi da se za dobivanje mjerne informacije pasivnim mjernim metodama mogu iskoristiti samo optički zakoni za dobivanje mjernih osjeta. To znači da je potrebno analizom reflektiranog vidljivog dijela spektra svjetla sa površine mjernog objekta dobiti informacije o relativnom prostornom položaju mjernih točaka na površini mjernog objekta u njegovoj trenutnoj konfiguraciji.
Izvor svjetla pritom može biti umjetnog ili prirodnog karaktera (npr. dnevno svjetlo), uz uvjet da kod pasivnih mjernih metoda izvor svjetla svojim djelovanjem ne sudjeluje aktivno u definiranju mjernih točaka na površini mjernog objekta, već samo omogućava njihovu vidljivost mjernom senzoru (na način da zamjena postojećeg izvora svjetla nekim ekvivalentnim izvorom svjetla tijekom mjerenja ne utječe na rezultate mjerenja i definiciju mjerne točke).

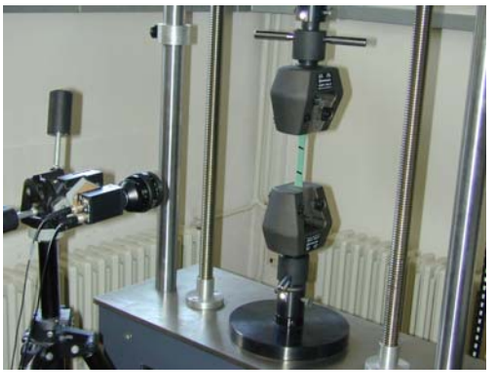
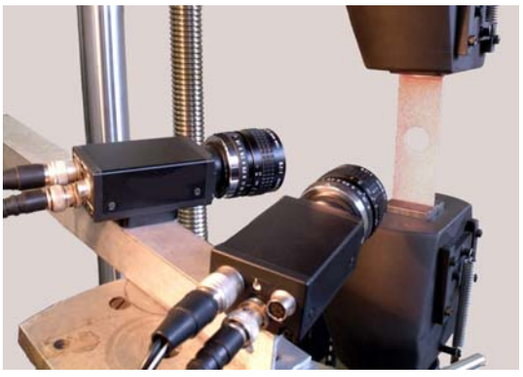
Metode kojih će se karakteristike u nastavku opisati odnose se na metodu objektnog rastera [4] i klasičnu fotogrametriju, budući da je njihova primjena u svakodnevnoj praksi više zamjetljiva. Mjerni sustavi ovih pasivnih mjernih senzora sastoje se od senzora koji sadrži jednu ili više optičkih komponenata za akviziciju slike, zatim posebno pripremljenog mjernog objekta, te programske podrške za analizu snimljenih slika.

2.1.1. Izvedbe pasivnih mjernih sustava

Današnji se sustavi pasivnih mjernih senzora (slika 2.) sastoje od uređaja za akviziciju slike, mjernog objekta površine unaprijed pripremljene za pasivna mjerenja, te odgovarajuće programske podrške za analizu slikovnih informacija. Pritom se za akviziciju slike koriste analogne ili digitalne kamere (odn. fotoaparati) sa CCD ili CMOS čipom, čiji broj pritom varira ovisno o zahtjevima promatranog efekta. Tako će npr. mjerenje oblika i prostornih deformacija zahtijevati istovremeno snimanje površine mjernog objekta s minimalno dvije fiksno postavljene kamere relativno jedna na drugu [4,5,6] ili samo sa jednom kamerom čiji se položaj u prostoru mijenja (ali su njezine postavke identične za sve snimljene položaje oko mjernog objekta), kako bi se moglo snimiti kompletno potrebno mjerno područje [7]. Za mjerenje deformacija na vratu epruvete dovoljna samo jedna kamera [6,7], kao što je ilustrirano slikom 2.

Svrha programske podrške je da preko upotrebe slikovnih operatora jednoznačno prepoznaje položaj određene mjerne točke na snimkama različitih stanja opterećenja ili iz različitih orijentacija kamere oko neopterećenog mjernog objekta, te na temelju tako sakupljenih slikovnih informacija vrši triangulaciju prostornog objektnog položaja mjerne točke. Slikovni operatori su objektno ili slikovno orijentirani operatori, koncipirani tako da na snimljenim slikama jednoznačno lociraju položaj mjernih točaka koje su određene strogo definiranom unaprijed poznatom geometrijom (kao što su to fotogrametrijske mjerne točke, slika 3d.) ili pronalaženjem sličnih slikovnih područja kao što je to prikazano na slici 3a-c.

Pod pojmom "mjerenje" kod pasivnih postupaka podrazumijeva se snimanje (fotografiranje) prethodno pripremljene površine mjernog objekta iz jednog ili više različitih položaja oko objekta, koje se provodi za svako od stacionarnih stanja opterećenja mjernog objekta, kao i naknadna numerička analiza snimljenih slika. (Kod metode objektnog rastera i kodiranih točaka radi se o fotogrametrijskoj triangulaciji prostornih koordinata mjernih točaka [4]).


a)

b)

Slika 2. Izvedbe pasivnih mjernih sustava

Iz navedenog slijedi da će se pogreške mjerenja pasivnim mjernim sustavima, bez obzira na konfiguraciju mjernog sustava, pojaviti uslijed problema nastalih prilikom jednoznačnog definiranja mjerne točke na površini mjernog objekta (vanjski faktori), uslijed akvizicije slikovnog materijala kao i problema jednoznačnog određivanja slikovnog položaja mjerne točke (unutarnji faktori pogreške).

Zbog velikog broja numeričkih operacija neophodnih za ispravno prepoznavanje položaja mjerne točke, karakteristično je za pasivne metode da se obrada unaprijed snimljenog materijala, prostorna orijentacija kamera te izračun objektnih koordinata vrši tek pošto je provedeno kompletno mjerenje, tj. nakon što su snimljene sve potrebne slike mjernog objekta (provodi se tzv. off-line analiza snimljenog materijala).

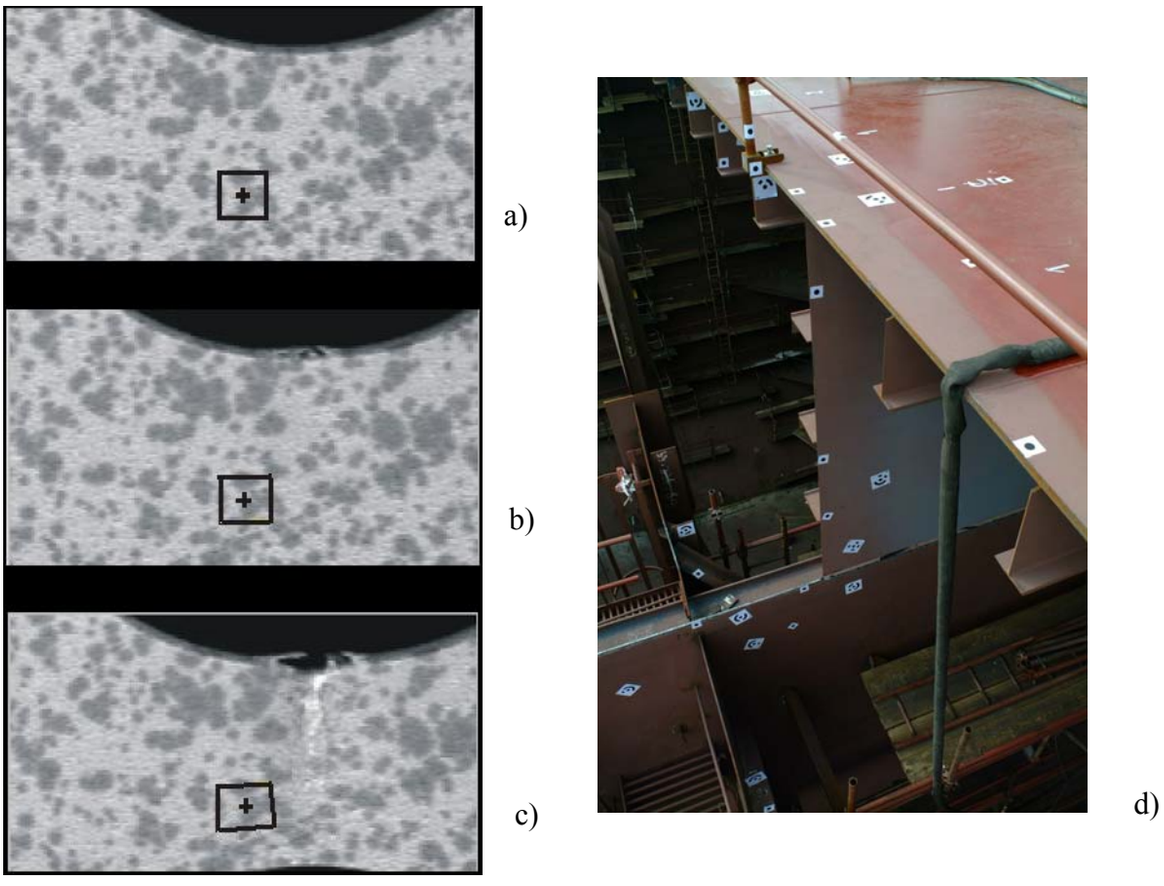
2.1.2. Definicija mjerne točke

Oko definicije mjerne točke kod pasivnih i općenito optičkih mjernih metoda nerijetko se u literaturi javlja dvosmislenost. Radi se o tome da se pod pojmom mjerna točka nerijetko podrazumijeva i točka na objektu kojoj određujemo koordinate, kao i slika te mjerne točke na snimljenoj slici mjernog objekta. U tom smislu, točku na objektu ćemo u nastavku teksta zvati objektna mjerna točka, a točku na slici slikovna mjerna točka.

Objektna mjerna točka kod pasivnih mjernih senzora definira se relativno u odnosu na površinu mjernog objekta preko optičkih markacija na samoj njegovoj površini. Time njen položaj zapravo ne ovisi o položaju i orijentaciji mjernog senzora. Položaj objektne točke na snimljenoj slici ovisit će, dakako, o relativnoj orijentaciji mjernog senzora i o promatranoj površini mjernog objekta. Definicija mjerne točke pritom treba zadovoljavati uvjet da ukoliko primjerice mjerimo deformaciju detalja površine nekog mjernog objekta sa dva ista međusobno nezavisna pasivna mjerna senzora, izmjereni efekt deformacije bude isti kod oba korištena mjerna sustava, jer je on ustvari u funkciji mjernog objekta i njegove trenutačne

konfiguracije, a ne korištenog mjernog senzora. Identično izmjereno polje deformacija trebalo bi se nalaziti kod takvog mjerenja u lokalnim koordinatnim sustavima u odnosu na korištene mjerne senzore, budući da je deformacija površine definirana lokalnom deformacijom mjernih točaka vezanih za površinu mjernog objekta.

Kao nositelji mjerne informacije o položaju objektne mjerne točke kod pasivnih mjernih metoda koriste se markeri geometrijski pravilnog ili stohastičkog oblika. Odabir tipa markera izvodi se zavisno o svrsi mjerenja (mjerenje oblika u diskretnim točkama ili deformacija mjernog objekta), te gabaritima mjernog objekta u obliku kodiranih ili nekodiranih fotogrametrijskih mjernih točaka. Ponekad se može koristiti i prirodna tekstura površine ili se površina tretira nanošenjem pravilne ili stohastičke strukture. Slikom 3a prikazan je detalj tretirane površine aluminijske epruvete [7] (eksperiment proveden u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku, FSB, Zagreb - u daljnjem tekstu LEM-FSB), na koju je za potrebe mjerenja metodom objektnog rastera nanesena stohastička struktura. Mjerna točka pritom je definirana izvjesnom slikovnom površinom, koja svojim položajem i deformacijom prenosi informaciju o pomaku i deformaciji podloge. To je shematizirano jednim istaknutim nedeformiranim kvadratnim poljem. Ukoliko opteretimo epruvetu, doći će do pojave deformacije osnovnog materijala koja će se prenijeti i na stohastički raster, te je slikama 3b i 3c prikazan smisao pomaka i deformacije slikovne mjerne točke, relativno u odnosu na mjerni objekt.



Slika 3. Uz definiciju pasivnih mjernih točaka

Prilikom snimanja samo jednom kamerom, ovako definirana slikovna mjerna točka mogla bi se smatrati istovremeno i objektnom mjernom točkom, dok bi prilikom usporednog korištenja

dvije ili više kamera prikazana slikovna mjerna točka zapravo definirala slikovnu projekciju objektne mjerne točke u jednu od korištenih kamera.

Sukladno zahtjevima naknadne obrade izmjerenih podataka, na površine čiji se oblik ili deformacije mjere pasivnim mjernim postupcima potrebno je nanijeti onaj minimalno dovoljan broj mjernih točaka da bi sve željene objektne karakteristike bile pokrivene optimalnim brojem markera. U smislu očuvanja pasivnosti mjerne metode markeri koji su naneseni na površinu mjernog objekta moraju biti izvedeni od takovog materijala i takovih dimenzija da svojim prisustvom ne utječu na stanje deformacija trenutne konfiguracije mjernog objekta. Svaka mjerna točka nužno zauzima izvjestan dio površine mjernog objekta. Njenu je veličinu i način definicije potrebno tako odabrati da se promatrani efekt može registrirati unutar očekivane točnosti, kao i prostorne rezolucije korištenog sustava.

Prostorni položaj objektne mjerne točke neovisno o načinu njene slikovne definicije određuje se korelacijom njenog slikovnog položaja iz uzastopnih snimaka mjernog objekta snimljenih iz različitih položaja mjerne kamere u prostoru oko mjernog objekta. Pritom je neophodno prilikom planiranja eksperimenta onemogućiti bilo kakvu promjenu u stanju opterećenja ili toplinskog stanja tijekom provođenja postupka pojedine faze mjerenja.

Vezano uz način definiranja mjernih točaka, te usko vezano uz optičke karakteristike korištene mjerne opreme kod pasivnih mjernih metoda, razlikujemo prostornu točnost i prostornu rezoluciju mjernog sustava. Pod pojmom točnosti podrazumijeva se red veličine unutar kojega je moguće očekivati točnost mjerenja položaja mjerne točke u odnosu na njen realni položaj u prostoru, dok pojam prostorne rezolucije definira najveću moguću gustoću mjernih točaka u prostoru, koje svojim položajem prikazuju digitalizirani volumen mjernog objekta. Stoga je pojam prostorne rezolucije u direktnoj ovisnosti o primijenjenoj metodi definicije mjerne točke.

2.1.3 Definicija mjernog volumena

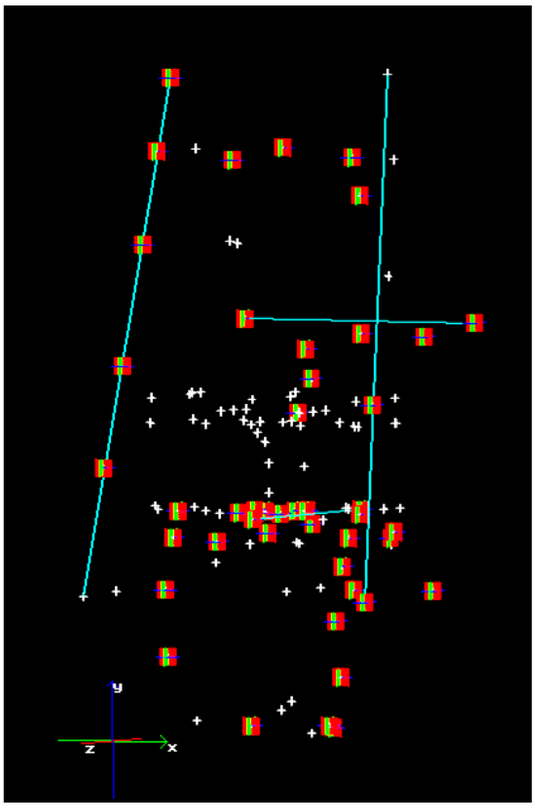
Temeljenost pasivnih mjernih metoda na optičkim zakonitostima i korištenje optičkih komponenata prilikom digitalizacije pojedine mjerne scene omogućuje dvoznačno definiranje mjernog volumena nekog pasivnog mjernog senzora. Pod pretpostavkom da je mjerni objekt veći od vidnog polja (eng. *Field Of View*) korištenog pasivnog mjernog sustava, u užem smislu pod pojmom mjerni volumen smatra se samo ono područje mjernog objekta koje se može u nekoj trenutnoj konfiguraciji vidjeti na snimljenim slikama, dakle, unutar trenutnog vidnog polja sustava koji se može sastojati od jedne ili više kamera.

Na slici 4.a. dana je ilustracija trenutnog vidnog polja mjernog senzora na detalju fotogrametrijskog mjerenja [6,7] provedenog u LEM-FSB pomoću fotogrametrijskog sustava Tritop proizvođača GOM, Njemačka. Pod pojmom mjerni senzor ovdje podrazumijevamo fotoaparat kojim je snimana pojedina scena, a slike su pohranjivane u digitalnom formatu prikladnom za naknadnu obradu. Mjerni objekt (univerzalna kidalica Messphysik BETA 50-5) je markiran u karakterističnim točkama posebnim refleksijskim fotogrametrijskim markerima. Tako pripremljen snimljen je mjernom kamerom iz dvadesetak pozicija oko mjernog objekta. Na svakoj od tako snimljenih slika vidljiv je unutar trenutnog vidnog polja kamere po jedan detalj volumena promatranog mjernog objekta. Stoga je na svakoj od njih vidljiv samo dio nanesenih fotogrametrijskih kodiranih točaka (slika 4.a.). Naknadnom

fotogrametrijskom analizom svih snimaka pomoću programskog paketa Tritop (odn. svih trenutnih vidnih polja mjernog senzora) digitalizirane su prostorne koordinate nanesenih markera, (ilustr. slikom 4.b). Na slici 4.b, koja predstavlja položaj prostornih koordinata fotogrametrijskih markera, relativno u odnosu na mjerni objekt, bijelim linijama označeni su mjerni štapovi korišteni za konverziju mjerila slikovnih koordinata u objektne, a križićima prostorne koordinate digitaliziranih markera.

Ukupni mjerni volumen ovdje korištene pasivne mjerne metode zapravo je superponiran preko trenutnih vidnih polja mjernog senzora. Iz tog razloga nije fizički limitiran trenutnim vidnim poljem mjernog senzora, čime je upravo definiran mjerni volumen u širem smislu.


a)



b)

Slika 4. Uz definiciju mjernog volumena

Kod sustava koji za digitalizaciju promatrane scene koriste konstrukciju senzora sa dvije međusobno fiksno postavljene kamere (npr. sustav za analizu deformacija površina mjernih objekata Aramis, dostupan u LEM-FSB, istog proizvođača, slika 2.b), trenutni mjerni volumen je zapravo ono kalibrirano vidno polje (slika 3.a-c) unutar kojeg je odabranim mjernim senzorom moguće ostvariti mjerne osjete.

Iz navedene diskusije proizlazi zaključak da je kod pasivnih mjernih senzora prikladnom teoretskom modifikacijom matematičkog modela mjerne metode omogućeno da ukupni mjerni volumen bude veći od vidnog polja primijenjenog mjernog senzora, tako da on zapravo nije limitiran fizičkom geometrijom mjernog senzora (kao što je to slučaj kod primjerice kontaktnih TMU).

2.1.4. Optička svojstva površine

Oslanjanje pasivnih metoda na definiciju mjerne točke preko optičkih karakteristika prethodno definiranih na površini mjernog objekta zahtijeva da mjerna površina bude neprozirna, sa Lambertskom karakteristikom refleksije [8]. Promatrana scena treba biti jednoliko osvijetljena bez izražene refleksije ili samozasjenjenja, kao i bez drugih vanjskih izvora zasjenjenja promatrane površine. Opisane uvjete nije potrebno zadovoljiti po cijeloj površini mjernog objekta, već samo u onim točkama koje prenose relevantnu mjernu informaciju, te ukoliko je osnovna površina mjernog objekta naknadno lokalno tretirana nanošenjem umjetnog rastera ili diskretizirana nanošenjem fotogrametrijskih mjernih točaka. Pritom je poželjno da se uslijed optičkih svojstava osnovne površine ne pojavljuju neželjene refleksije ili drugi optički efekti koji mogu utjecati na proces mjerenja (npr. vidljiva refleksija bljeskalice u snimljenoj slici).
Sukladno navedenim zahtjevima transparentne površine, površine koje dopuštaju difuzno prodiranje svjetla (npr. mramor, vuna, vata), izrazito refleksne površine, kao i površine sa izraženim kosinama koje nije moguće snimiti iz više od jedne pozicije, a bez drastične promjene u intenzitetu svjetloće markera, zbog nejednoznačnosti definicije položaja mjerne točke nisu pogodne za mjerenje oblika i deformacija klasičnim pasivnim metodama.

Tijekom trajanja procesa mjerenja, a zbog očuvanja točnosti i rezolucije u svakoj od trenutnih konfiguracija mjernog objekta, pasivne metode zahtijevaju održanje slične raspodjele intenziteta promatrane scene, odnosno ujednačenu jednoličnost osvijetljena površine mjernog objekta tijekom trajanja mjerenja za sve korištene kamere, kako pri mjerenju samo jednog mjernog stadija, tako i kod višestrukih ekspozicija. To se postiže korištenjem vanjskih izvora svjetla koji svojim intenzitetom moraju kompenzirati svaku promjenu u intenzitetu pozadinske rasvjete. U tu se svrhu pretežno koriste topli izvori svjetla sa žarnom niti, budući da pružaju kompletan spektralni raspon svjetla. Korištenjem izvora svjetla koji to ne omogućuju (tzv. hladni izvori kao što su neonske lampe), digitalizacijski čip u mjernoj kameri nije u mogućnosti zabilježiti odgovarajuću reflektiranu sliku uslijed njegove kalibriranosti na spektralni raspon dnevnog svjetla. Međutim, prilikom deformiranja (a posebno velikih gradijenata deformacija), lako može doći do drastičnih promjena kako u relativnom položaju između kamera i mjernog objekta, tako i do promjene u svjetloći i konfiguraciji trenutne mjerne točke. Time se unosi pogreška u izmjereni rezultat, te je prilikom planiranja mjerenja potrebno odrediti onu relativnu orijentaciju "senzor-mjerni objekt", kao i onu optimalnu konfiguraciju optičkih elemenata mjernog senzora, kako bi se navedeni efekt kompenzirao.

Vezano uz prethodnu diskusiju, a s obzirom da su temeljni nositelji informacija o položaju mjerne točke površinske markacije fizički direktno vezane uz površinu mjernog objekta, pasivne metode pretpostavljaju da se relativni položaj objektnih mjernih točaka u odnosu na površinu mjernog objekta tijekom vremena ne mijenja. Mjerna točka stoga treba vjerno prenositi deformaciju podloge, što omogućuje da je uz pomoć pasivnih mjernih metoda može digitalizirati geometrija promatranog mjernog objekta. To se odnosi na trenutnu konfiguraciju u nekom proizvoljnom vremenskom trenutku i vremensku promjenu njegove geometrije uslijed djelovanja vanjskog opterećenja.

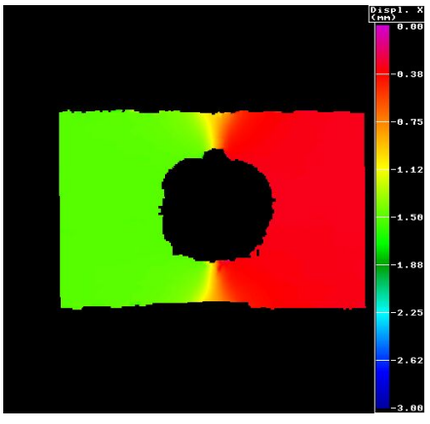
2.1.5. Mogućnost mjerenja oblika i deformacija

Za precizno određivanje planarne ili vanplanarne prostorne promjene geometrije nekog deformabilnog tijela potrebno je u svakom vremenskom trenutku jednoznačno znati što se tijekom deformacije dešavalo sa nekom promatranom točkom na površini promatranog deformiranog objekta.

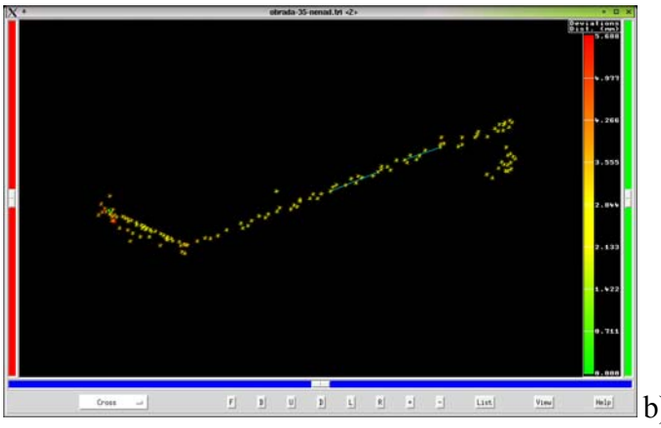
Jednoznačna identifikacija neke točke u referentnom nedeformiranom stanju, kao i nekom od deformiranih stanja mjernog objekta moguća je samo ukoliko ju je jednoznačno moguće vizualno prepoznati na površini mjernog objekta u odnosu na neki referentni slučaj opterećenja [5,6,7,8], (odn. ako postoji mogućnost slijednog određivanja njenih trenutnih slikovnih koordinata) te potom prikladnim fotogrametrijskim metodama odrediti i trenutne prostorne koordinate tijekom svakog od stadija deformiranja. Pasivne mjerne metode zbog ranije opisane definicije mjerne točke relativno u odnosu na površinu mjernog objekta upravo su pogodne za mjerenje deformacija. Mjerenje će biti tim točnije što su površine koje se deformiraju planarnije i što su gradijenti deformacije veći.

Ukoliko je pak cilj mjerenja pasivnom mjernom metodom određivanje samo trenutne diskretne geometrije neopterećenog mjernog objekta ili čak relativnog međusobnog položaja više mjernih objekata u prostoru, pretpostavlja se uvjet krutosti mjernog objekta tijekom trajanja mjerenja.

Uslijed relativno malog broja diskretnih mjernih osjeta i problema koji se javljaju prilikom povezivanja višestrukih mjerenja u zajednički koordinatni sustav, pasivne metode najčešće ne omogućuju određivanje kompletne geometrije mjernog objekta (gusti oblak točaka velike prostorne rezolucije koji zatvara kompletni volumen promatranog tijela kao kod projekcijskih metoda), već omogućuju ili samo prostorno određivanje koordinata u diskretnim mjernim točkama (npr. detalj fotogrametrijskog određivanja geometrije palube broda prikazan slikama 3.d i 5.b) ili samo lokalne deformacije iz jednog relativnog položaja mjernog senzora (slika 3.a-c).



a)



b)

Slika 5. Primjeri upotrebe pasivnih metoda za mjerenje a) deformacija b) oblika konstrukcije

Raspon dimenzija i deformacija koje se mogu ovako određivati pritom je limitiran samo trenutnom postavom optičkih komponenata mjerne opreme (potrebno je samo konfiguraciju leća na korištenim kamerama prilagoditi veličini mjernog objekta, tako da se zadovolje zahtjevi o zahtijevanoj slikovnoj rezoluciji). Praktički je moguće mjeriti mjerne objekte

dužine i nekoliko desetaka pa čak i stotina metara, pa sve do mikroskopskih mjerenja oblika pukotina te pomaka (CTOD, CMOD) i deformacija oko vrška pukotine.

2.1.6. Primjena pasivnih mjernih sustava

Moderne mjerne metode za određivanje oblika, dimenzija i deformacija geometrijskih tijela pronašle su primjenu u svim sferama ljudskog života, uključujući sve aspekte industrijske proizvodnje, znanstvena istraživanja, geološka istraživanja, svemirska istraživanja, medicinu, arheologiju te su se proširili u novije vrijeme s razvojem Interneta te potrebe za specijalnim efektima u filmskoj industriji i na široko potrošačko tržište.

U početno pretežno industrijski orijentiranom periodu razvoja metoda za određivanje prostornog oblika i volumena tijela, gotovo isključivo je pažnja istraživača prvenstveno bila orijentirana na razvoj metoda za određivanje samo geometrije zadanih tijela, zanemarujući pritom optička svojstva površine (boju, teksturu), dok se u novije vrijeme razvoj okreće i prema metodama koje omogućuju osim mjerenja oblika i registriranje optičkih svojstava površine mjernog objekta, te jednostavnu izradu vjernih računalnih modela.

Zbog mogućnosti akvizicije slike sa danas već relativno jeftinim prijenosnim, komercijalno dobavljivim digitalnim fotoaparatima (koji ne zahtijevaju zasebne, obično vrlo skupe digitalizacijske kartice i imaju povoljan odnos ukupnog broja piksela i cijene), te pojednostavljenju programskih alata pasivnim mjernim sustavima, uporaba se proširila iz domene čisto industrijske i mjeriteljske upotrebe i u područja svakodnevnog života. Tu mjeriteljska točnost akvizicije prepušta mjesto mogućnosti povremene, jednostavne, jeftine i brze digitalizacije i vizualizacije predmeta i kompletnih objekata ne gubeći drastično mjerna svojstva pri mjerenju objekata od raznorodnih materijala (prilikom oglašavanja novih proizvoda na Internetu, omogućavanje preliminarnog virtualnog razgledavanja, npr. kod kupnje obuće, nekretnina, automobila, rezervacije hotela i sl.) [9].

2.2. Karakteristike aktivnih mjernih metoda

Realne površine industrijskih proizvoda, kojima je iz nekog razloga potrebno odrediti kompletnu geometriju površine (npr. zbog izrade tehničke dokumentacije, redizajna, numeričkih simulacija opterećenja i sl.), nerijetko nemaju dovoljno izraženu teksturu površine (npr. jednobojne površine polimera, tamne, mat ili pak izrazito reflekse površine metalnih dijelova), koja je nužno potrebna za određivanje njihova oblika i dimenzija, a da bi se za određivanje njihova oblika mogle uspješno primijeniti mjerne metode bazirane na pasivnim mjernim tehnikama. U slučaju da postojeće pasivne mjerne metode ne mogu pružiti onaj stupanj prostorne rezolucije, točnosti mjerenja i potpunosti digitalizacije kompletnog mjernog volumena koji su u tom trenutku od strane proizvodnog procesa zahtijevani, potrebno je primijeniti neku od prikladnih aktivnih mjernih metoda.

Danas se u širokoj industrijskoj primjeni (prema slici 1.) nalaze aktivne mjerne metode. One se za jednoznačno prostorno kodiranje položaja svake zasebne mjerne točke koriste dodatnim mehaničkim ticalima ili nekom od optičkih projekcijskih metoda (kontrolirana projekcija kodiranog nekoherentnog ili laserskog svjetla).

U odnosu na pasivne metode koje se za definiciju položaja mjerne točke oslanjaju isključivo na površinske markacije i korelacijske operatore za njihovo prepoznavanje te obradu slike, aktivne mjerne metode neposredno aktivno definiraju položaj mjerne točke, relativno u odnosu na mjerni senzor, direktno na površini mjernog objekta neovisno o optičkim i geometrijskim karakteristikama mjerene površine. To se postiže izravnim mehaničkim dodirom osjetila mjernog instrumenta sa površinom mjernog objekta (npr. TMU) [10], tj. projiciranjem neke vrste strukturiranog svjetla na površinu mjernog objekta [11].

Pritom se poopćeno pretpostavlja da je smisao opterećenja mjernog objekta tijekom provođenja procesa mjerenja ostao nepromijenjen te da je zadržano stacionarno temperaturno stanje mjernog objekta i mjernog senzora od početka do kraja samog procesa mjerenja.

Direktnim fizičkim kontaktom ticala mjernog senzora sa površinom koju se digitalizira kontaktnim mjernim metodama, moguće je mjeriti oblik samo onih objekata čije površinsko stanje oblika i opterećenja neće biti promijenjeno uslijed direktnog kontakta površine koju se digitalizira ticalom mjernog senzora. Prešutno se pritom podrazumijeva da je objekt mjerenja koji je potrebno digitalizirati moguće bez promjene njegove geometrije i stanja opterećenja izvaditi iz postojeće konstrukcije i transportirati na mjesto mjerenja, te da će on po svojim gabaritima stati u mjerno područje uređaja za mjerenje.

Prilikom kontaktnih mjerenja, informacije o površinskim koordinatama biti će dostupne samo za one diskretne točke koje je u zadanom vremenskom okviru moguće ispravno i pouzdano odrediti. Iz toga slijedi da se svakom zasebnom mjerenju kontaktnim metodama treba pristupati planski, unaprijed planirajući putanju gibanja kontaktnog ticala, kako bi se iz tog optimalnog broja direktnih mjernih opažaja mogle sa traženom točnošću rekonstruirati željene geometrijske značajke [12]. Gustoća mjernih točaka pritom smije biti manja u područjima s manje izraženom promjenom geometrije, odn. veća na onim dijelovima kod kojih postoji značajna lokalna promjena oblika.

Optičke aktivne projekcijske metode su po svom karakteru beskontaktne, bez postojanja ikakvog direktnog kontakta mjernog senzora sa površinom mjernog objekta, te stoga

omogućuju mjerenja i onih mjernih objekata čiju bi geometriju zbog specifičnih svojstava površine [13] kontaktnim metodama inače bilo gotovo nemoguće u potpunosti odrediti. Potreba za prethodnim orijentacijskim poznavanjem geometrije mjernog objekta ovdje nije nužna, budući da aktivne projekcijske mjerne metode omogućuju mjerenja iz više od jedne pozicije oko mjernog objekta. Tako je s postupnim relativnim obilaženjem mjernog objekta senzorom moguće digitalizirati kompletno mjerno područje sa zadovoljavajuće ujednačenom gustoćom mjernih točaka. Međutim, prethodno poznavanje geometrije omogućava minimalizaciju broja mjerenja iz različitih pogleda na mjerni objekt, sa minimalizacijom potrebe preklapanja rezultata. To otvara mogućnost automatizacije metode uvođenjem robota koji mjere tipske ili modele slične tipskima, na osnovu prethodno formiranih baza znanja. Istraživanja u ovom smjeru su u začecima, kroz operatore za prepoznavanje oblika i orijentacije oblaka točaka u prostoru koji opisuju geometriju prostornih tijela.

Sa zadovoljavajućim poopćivanjem načina dobivanja prostornih koordinata mjerne točke, može se zaključiti da postoji fundamentalna sličnost aktivnih projekcijskih i pasivnih optičkih metoda, u smislu da obje metode koriste triangulaciju za izračun prostornih koordinata mjerne točke, dok je glavna razlika u načinu jednoznačnog prostornog kodiranja mjerne točke.

Za razliku od pasivnih metoda koje vrše analizu snimljenog materijala tek pošto je snimljena i posljednja fotografija mjernog objekta, aktivne projekcijske i kontaktne metode vrše izračun položaja objektnih koordinata u kvazi-realnom vremenu, odmah po snimanju potrebnih slika, odn. kontakta senzora s površinom (tzv. online analiza). No zbog potrebe snimanja većeg broja snimaka projiciranih struktura iz jedne relativne pozicije po mjerenju (npr. min 9 fotografija sa svakom od dvije kamere kod kombinirane metode vremenskog faznog pomaka i Gray-koda kod uređaja *Atos*), ove metode još nisu prikladne za dinamička mjerenja (projiciranje i snimanje kod ovog sustava traju cca. 30 sekundi neovisno o performansama korištenog računala).

2.2.1. Definicija mjerne točke

Zajednička svim aktivnim metodama je definicija mjerne točke u nekom relativnom odnosu na trenutni položaj i orijentaciju mjernog senzora u prostoru, budući da se kodiranje točaka na mjernom objektu vrši aktivno projekcijom ili kontaktnom prilikom mjerenja, relativno u odnosu na trenutni položaj mjernog senzora.

Kontaktne mjerne metode mjernu točku unutar mjernog volumena zadanog konstrukcijom kontaktnog mjernog senzora definiraju preko prostornog položaja vrha kontaktnog ticala u trenutku njegova dodira s površinom mjernog objekta. Digitalizacija svake zasebne mjerne točke stoga zahtijeva određeni fizički pomak osjetila mjernog uređaja iz prethodnog mjernog položaja u novi mjerni položaj. Stoga će prostorna rezolucija postignuta ovom metodom uvelike ovisiti o vremenu neophodnom da se vrh kontaktnog ticala pomakne iz prethodnog u novi položaj, o smjeru kontakta [9], ali i o predznanju sustava o geometriji mjernog objekta koja definira putanju ticala. To se predznanje prvenstveno odnosi na eventualno postojanje površinskih artefakata (ravne plohe, utori, gravure, tehnološke i dizajnerske izbočine, slučajna oštećenja, srhovi zaostali od lijevanja i sl.), za čiju je uspješnu automatsku digitalizaciju u optimalnom broju mjerenja potrebno orijentacijsko predznanje o obliku i svojstvima površine koja se digitalizira, kao i o samim mogućnostima prihvata mjernog objekta [14] za korišteni mjerni uređaj.

Zbog svoje diskretne karakteristike kontaktne metode stoga imaju izraženiju primjenu u području inspekcije točnosti izvedbe nekog strojno proizvedenog dijela, pri čemu postoje razvijeni sustavi za jednostavnu automatizaciju ponavljajućih radnji, nego u području digitalizacije kompletnog mjernog volumena proizvoljno oblikovanog novog mjernog objekta nepoznate geometrije, s ciljem kasnijeg računalnog modeliranja prostorne geometrije kompletnog mjernog objekta.

Konstrukcija kontaktnih uređaja koja zahtijeva njihovu veliku krutost i dobro temeljenje neosjetljivo na utjecaj okolišnih vibracija, zapravo onemogućava korištenje kontaktnih uređaja izvan prostora u kojima su instalirani. Istovremeno definira i ukupne gabarite mjernih objekata koji se pomoću njih uopće mogu izmjeriti.

Projekcijske mjerne metode položaj mjerne točke na površini mjernog objekta definiraju relativno u odnosu na mjerni senzor, preko projiciranja neke vrste strukturiranog svjetla na površinu mjernog objekta (iz koherentnog ili nekoherentnog izvora svjetla).Pritom izbjegavaju izravan dodir senzora sa mjernim objektom. Ovisno o primijenjenom izvoru i strukturi projiciranog svjetla, kao i o performansama i izvedbi akvizicijskog modula i pripadajuće programske podrške, ovisiti će i broj mjernih točaka koje je moguće izmjeriti u jednom mjerenju, što će biti objašnjeno za svaku od metoda u poglavlju 4. Najčešće korištene strukture projiciranog svjetla su kod koherentnih izvora: točka, jedna ili više linija [15], a kod nekoherentnih izvora svjetla različite vrste rastera koji služe ili za faznu analizu [16] ili su pak objektno orijentirani [17].

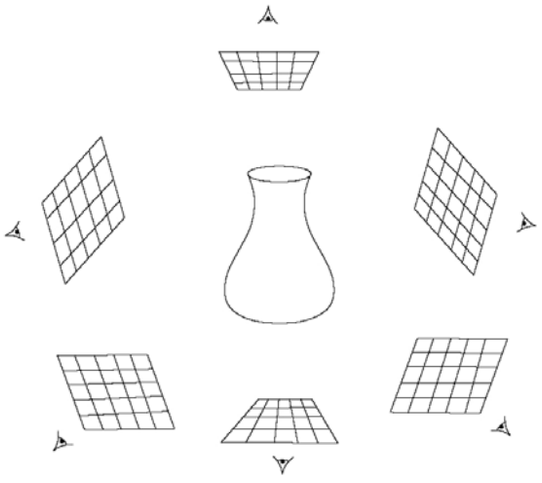
Pritom je optimalan broj mjernih točaka upravo onaj minimalan broj točaka dostatan za zadovoljavajuće opisivanje površinskih artefakata prilikom naknadne obrade mjernih točaka u CAD sustavima [18]. Ukoliko je površina digitalizirana sa nedovoljnom prostornom rezolucijom, prilikom obrade koja je nerijetko prostorno i vremenski dislocirana od samog mjerenja, mogući su pogrešni zaključci o geometriji digitaliziranog uzorka. Preveliki broj

mjernih točaka pak dovodi do povećanja trajanja mjerenja i analize, a katkad i nepotrebnog kompliciranja korištenog parametarskog modela površine (npr. za slučajeve kada su lokalne geometrijske karakteristike površine, kao što je hrapavost, nevažne naspram kompletne geometrije promatranih ploha).

2.2.2 Definicija mjernog volumena

Veličina i oblik mjernog volumena je kod kontaktnih mjernih senzora u direktnoj funkciji njihove mehaničke izvedbe i mogućnosti prihvata mjernog objekta, budući da će upravo o geometriji kontaktnih mjernih senzora te dopuštenim stupnjevima slobode mjerne glave ovisiti oni najveći gabariti koje smije imati mjerni objekt da bi se još mogao postaviti unutar dohvata mjerne glave kontaktnog mjernog senzora. Ovako stroga definiranost mjernog volumena zapravo zahtijeva i apsolutno mirovanje mjernog objekta tijekom mjerenja u odnosu na globalni koordinatni sustav mjernog uređaja. Stoga je gornja granica mjernog volumena definirana geometrijom okvira mjernog senzora, dok je donja u funkciji prihvata mjernog objekta, te obliku i dimenzijama raspoloživih mjernih ticala.

Slično pasivnim mjernim sustavima, i aktivni projekcijski sustavi definiraju mjerni volumen u užem smislu u direktnoj ovisnosti o trenutačnom relativnom vidnom polju korištenog mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt (pojednostavljeni prikaz je dan slikom 6.). Pritom se položaj globalnog koordinatnog sustava i mjerni volumen ne dovode u izravnu vezu sa geometrijom korištenog mjernog senzora, kao što je to slučaj kod kontaktnih senzora.



Slika 6. Ilustracija trenutnih vidnih polja

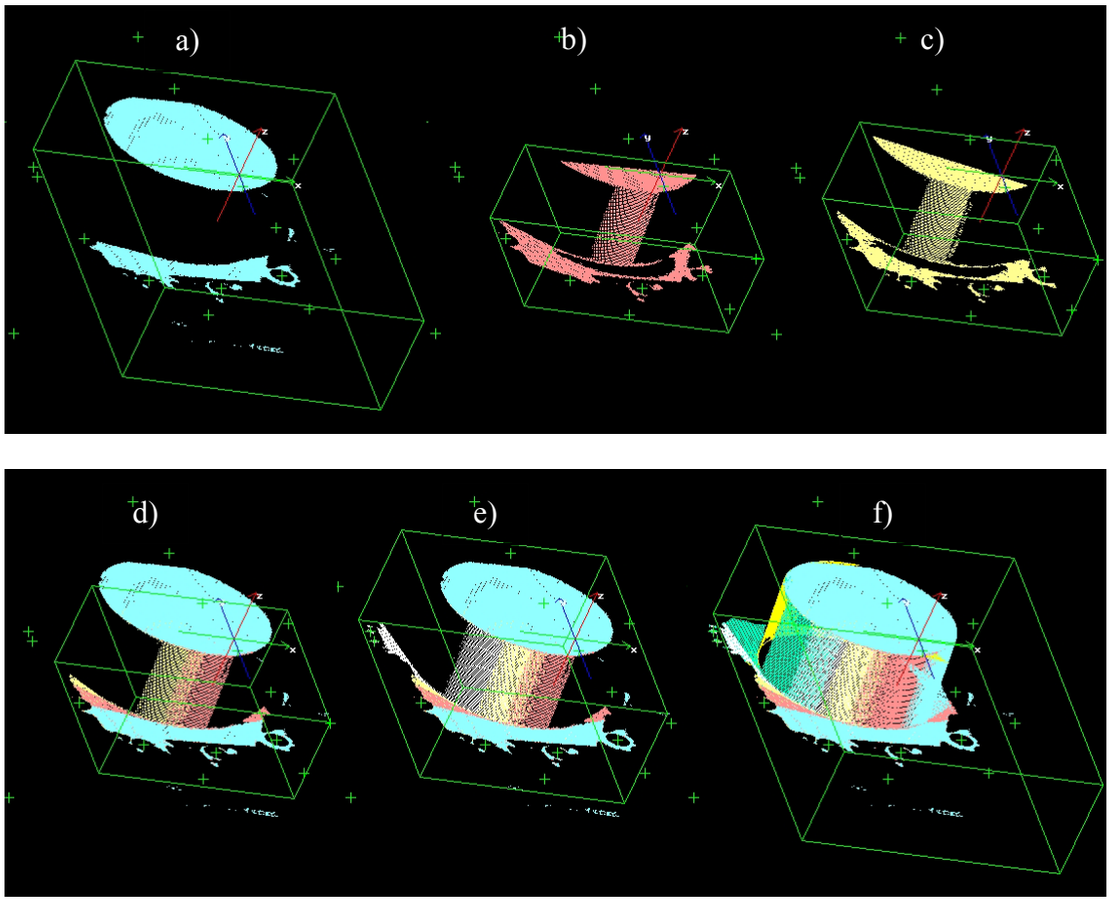
U ovom slučaju pojam globalnog koordinatnog sustava zapravo predstavlja onaj koordinatni sustav unutar kojega će pojedinačna mjerenja (pojedinačne projekcije iz različitih relativnih pozicija oko mjernog objekta, kojima se digitaliziraju parcijalni dijelovi mjernog objekta, prema slici 6.) spajati u ukupni mjerni volumen, unutar kojega će biti u potpunosti opisana ukupna geometrija digitaliziranog tijela.

Položaj i orijentacija globalnog koordinatnog sustava kod projekcijskih sustava obično se definira prema nekom od pojedinačnih mjerenja, najčešće prvom, a zatim se, ukoliko to programska podrška omogućava, ostala mjerenja iz vlastitih lokalnih koordinatnih sustava preko prikladnih transformacijskih artefakata transformiraju u globalni koordinatni sustav.

Pritom se za transformaciju koordinatnih sustava koriste dodatni pasivni osjeti preko fotogrametrijskih markera, podaci o kontroliranoj rotaciji mjernog objekta ili numerički postupci registracije digitaliziranih oblaka točaka.

U širem smislu, kod projekcijskih metoda ukupni mjerni volumen biti će onaj mjerni volumen koji je moguće digitalizirati prikladnim povezivanjem više uzastopnih mjerenja iz pojedinih vidnih polja (relativnih položaja mjernog senzora oko mjernog objekta). Njih je moguće ostvariti slijednim procesima mjerenja uslijed fizičkog relativnog pomicanja mjernog objekta, odnosno mjernog senzora.

Ilustracija gornje definicije koordinatnih sustava i mjernih volumena kod projekcijskih aktivnih mjernih sustava prikazana je slikom 7, na primjeru mjerenja oblika valjkastog mjernog objekta digitalizacijskim sustavom *Atos* provedenom u LEM-FSB. Mjerni objekt je tako odabran da ga je zbog njegovih geometrijskih karakteristika navedenim projekcijskim sustavom nemoguće digitalizirati na temelju samo jednog procesa mjerenja (odn. na temelju projekcije kodiranog svjetla iz samo jednog položaja njegove relativne orijentacije, prema slici 6.), iako on po svojim ukupnim gabaritima čitav stane u trenutno vidno područje senzora.



Slika 7. Uz definiciju mjernog volumena

Slike 7.a, 7.b i 7.c slijedno prikazuju tijek digitalizacije ovim senzorom preko prikaza parcijalnih dijelova ukupnog digitaliziranog oblaka točaka, a koji pripadaju površini valjčića

onako kako ih je digitalizirao mjerni senzor iz tri međusobno malo pomaknuta relativna položaja u prostoru oko mjernog objekta. Volumen opisan kvadrima je upravo onaj iskoristivi dio trenutnog vidnog područja mjernog senzora unutar kojeg se sa očekivanom mjernom nesigurnošću za zadani relativni položaj mjernog objekta i mjernog senzora nalaze objektne koordinate trenutno izmjerenih točaka. To znači da je definiran trenutni mjerni volumen u užem smislu. Potrebno je napomenuti da je trenutno vidno polje senzora zapravo veće od ovdje prikazanog, ali je ovdje namjerno umanjeno da bi se još za vrijeme procesa mjerenja izbacio višak nepotrebnih osjeta koji ne pripadaju mjernom objektu, već površini okretnog nosača, što skraćuje postupak kasnije obrade i umanjuje broj nepotrebnih osjeta, smanjujući time broj izmjerenih točaka.

Iz slika je također vidljivo da je položaj i orijentacija globalnog koordinatnog sustava (koji se nalazi na gornjoj površini valjka) definiran već prilikom početnog mjerenja, prema slici 7.a. Digitalizirani oblaci iz preostalih mjerenja već se zapravo nalaze u globalnom koordinatnom sustavu, budući da su za vrijeme mjerenja bili transformirani korištenjem fotogrametrijskih markera koji su na ovim slikama predstavljeni križićima. Navedeni markeri fiksirani su zajedno sa valjkom u ravnini okretnog nosača, što osigurava da se za vrijeme svih mjerenja ne mijenja niti međusoban relativni položaj markera, niti njihov položaj u odnosu na mjerni objekt. No, bilo je dopušteno relativno zakretanje kompletnog nosača s mjernim objektom u odnosu na mjerni senzor. Određivanje prostornog položaja markera provedeno je prikladnom spregom ovog projekcijskog aktivnog mjernog senzora sa varijantom pasivnog mjernog senzora Tritop.

Preklapanjem parcijalnih digitaliziranih oblaka točaka, koji se za kvalitetno opisivanje geometrije nužno moraju nalaziti u istom koordinatnom sustavu (ilustrirano slikama 7.d i 7.e) dobiven je oblak točaka na slici 7.f koji predstavlja kompletno digitalizirani mjerni volumen ovog mjernog objekta. Time je u širem smislu definiran mjerni volumen ovog projekcijskog aktivnog mjernog senzora.

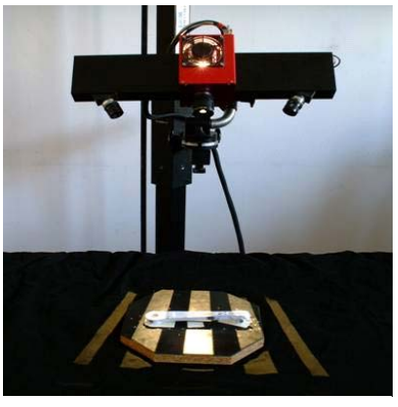
Iz opisanog mjerenja vidljivo je da veličina mjernog objekta, a time i ukupnog mjernog volumena kod aktivnih projekcijskih mjernih senzora, u principu nije definirana samom geometrijom mjernog senzora već njegovom mogućnošću spajanja relativnih slijednih mjerenja u zajednički koordinatni sustav. Tako ukupni mjerni volumen naizgled paradoksalno može biti i manji od trenutnog mjernog volumena, ali i daleko veći, jer nije u funkciji konstrukcije mjernog senzora, već u funkciji povezivanja trenutnih mjernih volumena. Pritom se ova generalizacija odnosi samo na one aktivne projekcijske sustave koji spajanje mjerenja iz više relativnih orijentacija senzora prema mjernom objektu vrše preko optičkih pasivnih mjernih metoda. Ukoliko se pak spajanje pojedinačnih mjerenja vrši preko kontrolirane relativne promjene položaja mjernog objekta u odnosu na mjerni senzor pomoću preciznih okretnih stolova ili nekih drugih mehaničkih naprava (npr. konvejer), tada će apsolutni mjerni volumen također biti u funkciji geometrije mjernog sustava. Ipak, tada će biti ograničen konstukcijskim izvedbama senzora i prihvatnih sustava, npr. širinom konvejera, promjerom okretnog stola i slično.

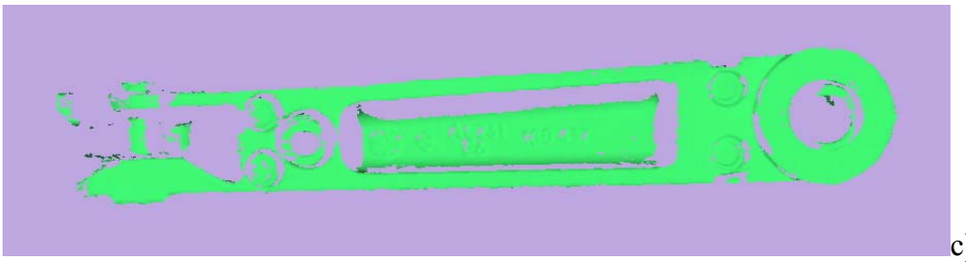
2.2.3. Brzina mjerenja

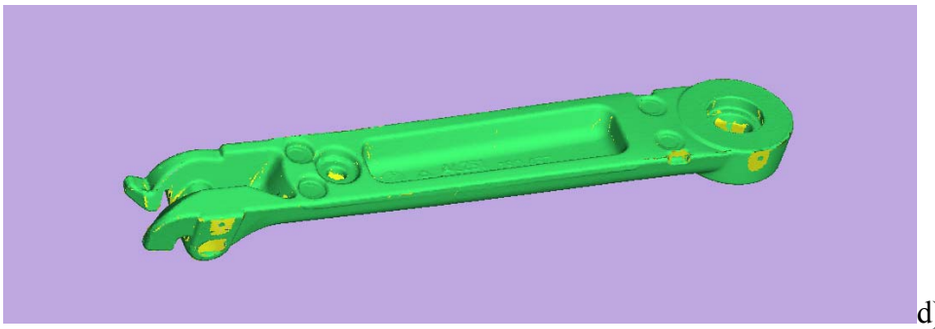
Fundamentalna razlika između kontaktnih i beskontaktnih aktivnih mjernih metoda je u brzini i količini mjernih točaka koje su u stanju digitalizirati u jednom procesu mjerenja. Stoga se i definicija jednog procesa mjerenja razlikuje utoliko, što dok se kod kontaktnih mjerenja po jednom kontaktu mjernog senzora sa površinom mjernog objekta izmjeri samo položaj jedne mjerne točke, dotle će broj izmjerenih položaja točaka prilikom korištenja optičkih projekcijskih mjernih senzora ovisiti o načinu definicije mjerne točke (detaljnije u poglavljima 3 i 4.), te fizičkoj rezoluciji korištenih mjernih kamera i varirati od jedne do nekoliko stotina tisuća mjernih točaka.

Na brzinu procesa mjerenja, a zbog nužnosti direktnog fizičkog kontakta mjernog senzora sa mjernim objektom, o potpunosti digitalizacije te zahtijevanom rasporedu i gustoći mjernih točaka kao i ukupnom vremenu pripreme, te postupku provođenja samog mjerenja prilikom primjene kontaktnih mjernih metoda, značajno će utjecati i iskustvo operatora, prethodno poznavanje geometrije te vrijeme potrebno za pripremu i kalibraciju mjernog senzora. Nasuprot tome, optički aktivne mjerne metode (kod kojih geometrijske karakteristike digitalizirane površine ne utječu u tolikoj mjeri na planiranje putanje mjernog senzora, poglavlje 5), mogu digitalizirati od nekoliko desetaka tisuća u jednom mjerenju, pa sve do nekoliko milijuna mjernih točaka, ako se koristi mogućnost povezivanja različitih pogleda na mjerni objekt, sve unutar vremena nerijetko kraćeg i od samo 1% ukupnog vremena potrebnog za digitalizaciju tog istog kompletnog mjernog volumena s nekom od klasičnih kontaktnih mjernih metoda.

Ilustracija brzine digitalizacije nekog strojnog dijela aktivnim projekcijskim sustavom *Atos* dana je slikom 8 koja pokazuje: a) trenutnu postavu mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt , b) detalj procesa mjerenja (vidno polje korištenog senzora pritom je fiksirano tako da se poklapa sa površinom projiciranih paralelnih linija) i c) konačni digitalizirani osjenčani oblak točaka iz jedne projekcije.


a)

b)

c)


d)

Slika 8. Uz definiciju brzine mjerenja

2.2.4. Svojstva površine

Pod svojstvima površine ovdje smatramo samo one optičke i mehaničke karakteristike promatrane površine, koje uslijed interakcija sa mjernim senzorom mogu utjecati na definiciju položaja objektne mjerne točke. Pritom će se ovdje zanemariti geometrijski utjecaji površinske konfiguracije mjernog objekta koji mogu onemogućiti pristup i/ili potpunu vidljivost svih dijelova površine mjernog objekta.

Iako pojednostavljeno možemo reći da mehanička i geometrijska svojstva mjerene površine nisu od presudne važnosti za uspješno provođenje mjerenja optičkim projekcijskim metodama, slično pasivnim metodama, optička svojstva površine moraju biti prilagodljiva trenutnim zahtjevima optičkih aktivnih projekcijskih mjernih metoda. Uobičajeno se korekcija optičkih svojstava provodi nanošenjem difuznog sloja boje, katkad i uz uvjet nepovratnog uništenja mjerenog modela. Zbog očuvanja točnosti mjerne metode nužno je da naneseni sloj kojim se tretira površina bude daleko manje debljine od deklarirane mjerne rezolucije korištene projekcijske metode.

Upravo mehanička svojstva površine su kritični faktor prilikom korištenja kontaktnih mjernih senzora za digitalizaciju neke površine. Posljedica svakog izravnog kontakta dvaju tijela istih temperatura je međusobno djelovanje sila koje su kod kontaktnih mjerenja redovito malog reda veličine, ali koje u slučaju mjerenja kontaktno osjetljivih materijala mogu uzrokovati lokalnu deformaciju površine objekta mjerenja, a da se to s primijenjenim mjernim senzorom uopće ne registrira (npr. modeli od meke gume, tapecirane presvlake sjedala automobila, tanke membrane, ispune silikonskim ili sličnim deformabilnim masama, glineni dizajnerski modeli, muzejski povijesno vrijedni artefakti, organsko tkivo i sl.). Time se zapravo izravnim djelovanjem kontaktnog ticala mjernog senzora izravno doprinosi grešci u izmjerenom rezultatu. Diskusija ovog efekta prikazana je u poglavlju 5. Sličan bi se efekt pogreške mjerenja javio kod pokušaja kontaktnih mjerenja geometrije onih tijela kod kojih postoji veliki temperaturni gradijent prema kontaktnom ticalu, tj. lokalnoj temperaturi okoliša. Unatoč velikoj točnosti za koju su kontaktni sustavi sposobni, jasno je iz navedenih primjera da direktni kontakt mjernog senzora sa mjernim objektom može biti ponekad i nepoželjan. Procjena prikladnosti mjerenja kontaktnom metodom za svaki pojedini mjerni problem pritom je ostavljena operaterovom iskustvu, a nerijetko i budžetu koji je mjeritelju na raspolaganju za nabavku prikladne mjerne opreme.

2.2.5. Mogućnost mjerenja oblika i deformacija

Aktivne projekcijske mjerne metode prvenstveno su razvijene s ciljem brzog beskontaktnog određivanja oblika i dimenzija geometrijskih tijela. Tome pogoduje projekcijski način kodiranja položaja mjerne točke. Kontaktne metode su zbog diskretnog određivanja položaja mjerne točke pritom više orijentirane na mjerenje odstupanja od poznate geometrije (npr. odstupanje od kružnosti), nego na digitalizaciju kompletnog volumena općenitih mjernih modela. Primjeni koja je usmjerena pretežno na mjerenje oblika pridonosi način definicije mjerne točke koja je kod aktivnih metoda definirana relativno u odnosu na trenutnu konfiguraciju mjernog senzora, u njegovom vlastitom proizvoljnom koordinatnom sustavu To je suprotno pasivnim metodama kod kojih je položaj mjerne točke fiksno vezan za točku mjernog objekta.

Za određivanje deformacija nekog tijela potrebno je jednoznačno poznavati vektor pomaka jedne te iste točke na površini i/ili unutar volumena promatranog tijela u referentnom neopterećenom i u nekom trenutnom opterećenom stanju deformacije. Primijenjeni relativni smisao definicije položaja mjerne točke onemogućava jednoznačno poznavanje pomaka zasebne točke. Stoga je nemoguće provesti direktno mjerenje deformacija koje bi bilo bazirano samo na temelju usporedbe oblaka prostornih položaja točaka digitaliziranog nekom od spomenutih aktivnih metoda na površini mjernog objekta u neopterećenom i opterećenom stanju. Ovaj problem nejednoznačnosti bilo bi moguće riješiti jedino omogućavanjem prostorne usporedbe dvaju različitih izmjerenih oblaka točaka (različitih po obliku, relativnom odnosu njihovih koordinatnih sustava, te različitom broju i rasporedu mjernih točaka na površini mjernog volumena zadanog tijela). Takova bi usporedba zahtijevala redukciju broja mjernih točaka, izradu CAD modela pojedinih oblaka, uvođenje karakterističnih kontrolnih točaka (ekvivalenta mreže konačnih elemenata) te daljnje pojednostavljenje modela. Uzevši u obzir ogromnu količinu mogućih varijanti oblika koje se u praksi pojavljuju, sustav koji bi to generički omogućavao bio bi iznimno kompleksan, što prelazi granice ovog istraživanja. Točnost takvog sustava ovisila bi u manjoj mjeri o točnosti mjerenja oblika pojedinog stanja deformacije, dok bi glavnina pogrešaka nastajala prilikom odabiranja pravih parova točaka za usporedbu referentnog nedeformiranog i deformiranog mjernog stanja. Mogućnost hibridne sprege pasivne metode objektnog rastera sa nekom od projekcijskih aktivnih metoda u ovom području tek treba istražiti. Pasivne mjerne metode prikladnije su za izravno mjerenje deformacija, budući da opisani efekt nemaju izražen opisani efekt, jer su mjerne točke već strogo definirane relativno s obzirom na mjerenu površinu, a ne na mjerni senzor. Stoga je raspodjelu deformacija na površini mjernog objekta moguće izravno odrediti deriviranjem izmjerenog polja pomaka.

2.2.6. Mogućnost mjerenja oblika i položaja tijela koja se gibaju u realnom vremenu

Mjerenje položaja i oblika tijela koje se općenito giba u prostoru zaseban je problem aktivnih mjernih metoda za koje većina dosadašnjih postojećih projekcijskih i kontaktnih sustava nije sposobna. Kod općenitog planarnog gibanja tijela s obzirom na promatrača, tijelo dinamički mijenja svoj položaj i oblik. Takav bi ga sustav trebao sa sigurnošću prepoznati u prostoru i segmentirati od okoline, a zatim odrediti njegovu geometriju i orijentaciju. Sa hardverske strane, takav sustav trebao bi omogućavati snimanje položaja tijela sa velikom

frekvencijom, kao i mogućnost projiciranja prepoznatljivih struktura na površinu mjernog objekta (u idealnom slučaju bez projiciranja i na njegovu okolinu), kao i kratko vrijeme analize snimljenih slika. S programske strane bilo bi potrebno definirati neke optičke ili geometrijske karakteristike preko kojih bi se vršilo najprije prepoznavanje, a zatim i određivanje položaja i oblika promatranog tijela u gibanju.

Kako sve projekcijske metode koriste neki oblik gibanja projicirane zrake po površini mjernog objekta, u nekim specijalnim slučajevima gibanja je moguće iskoristiti relativnost gibanja senzora naspram mjernog objekta. Ukoliko je unaprijed poznata brzina, geometrija i smjer gibanja mjernog objekta (npr. jednodimenzijski pomak modela na konvejerskoj transportnoj traci), dovoljno je da senzor miruje i projicira zraku uvijek u istom smjeru, dok objekt mjerenja vrši relativno gibanje. Ovakvi sustavi nerijetko se koriste za kontrolu geometrije tipskih industrijskih objekata pomoću linijskog laserskog skenera.

Ukoliko je pak nepoznata brzina gibanja a poznata geometrija i tijelo ima označene položaje kontrolnih točaka, tada je moguće preko kontrolnih točaka locirati položaj u prostoru. Iako ovo na prvi pogled ne izgleda kao problem aktivnih metoda, u poopćenom slučaju moguća je situacija da se mjerni senzor i objekt nalaze na velikim udaljenostima i proizvoljno relativno gibaju različitim brzinama, što zbog brzih varijabilnih promjena osvjetljenja otežava pasivnu lokaciju kontrolnih točaka. Tako npr. NASA koristi laserski projekcijski sustav za precizno spajanje transportnih modula u svemiru [19].

3. IZVEDBE MJERNIH SENZORA

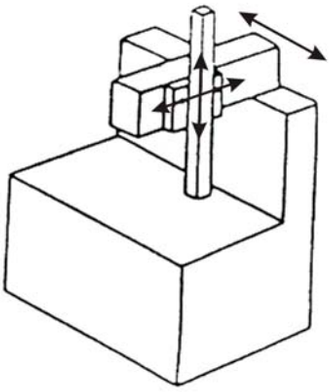
3.1. Izvedbe kontaktnih mjernih senzora

Inicijalni razvoj metoda za prostorno određivanje položaja mjernih točaka započeo je upravo sa razvojem kontaktnih trokoordinatnih mjernih sustava. Zato danas na tržištu postoji veliki broj proizvođača, pa tako i velik broj tržišno dostupnih tipova i modela trokoordinatnih mjernih uređaja (TMU). Detaljni prikaz svakog od njih zahtijevao bi iscrpno istraživanje tržišta.

Olakotna je okolnost prilikom njihove klasifikacije što tržišni zahtjevi i u ovoj grani mjeriteljske opreme igraju dominantnu ulogu glede vrsta i izvedbe kontaktnih mjernih senzora. Danas s obzirom na način definicije mjernog volumena razlikujemo slijedeće izvedbe mehaničkih struktura vodilica kontaktnih prostornih mjernih senzora (slika 9.), u vidu pet osnovnih izvedaba sa fiksnim mjernim stolom, koje prema [10] možemo klasificirati kao:

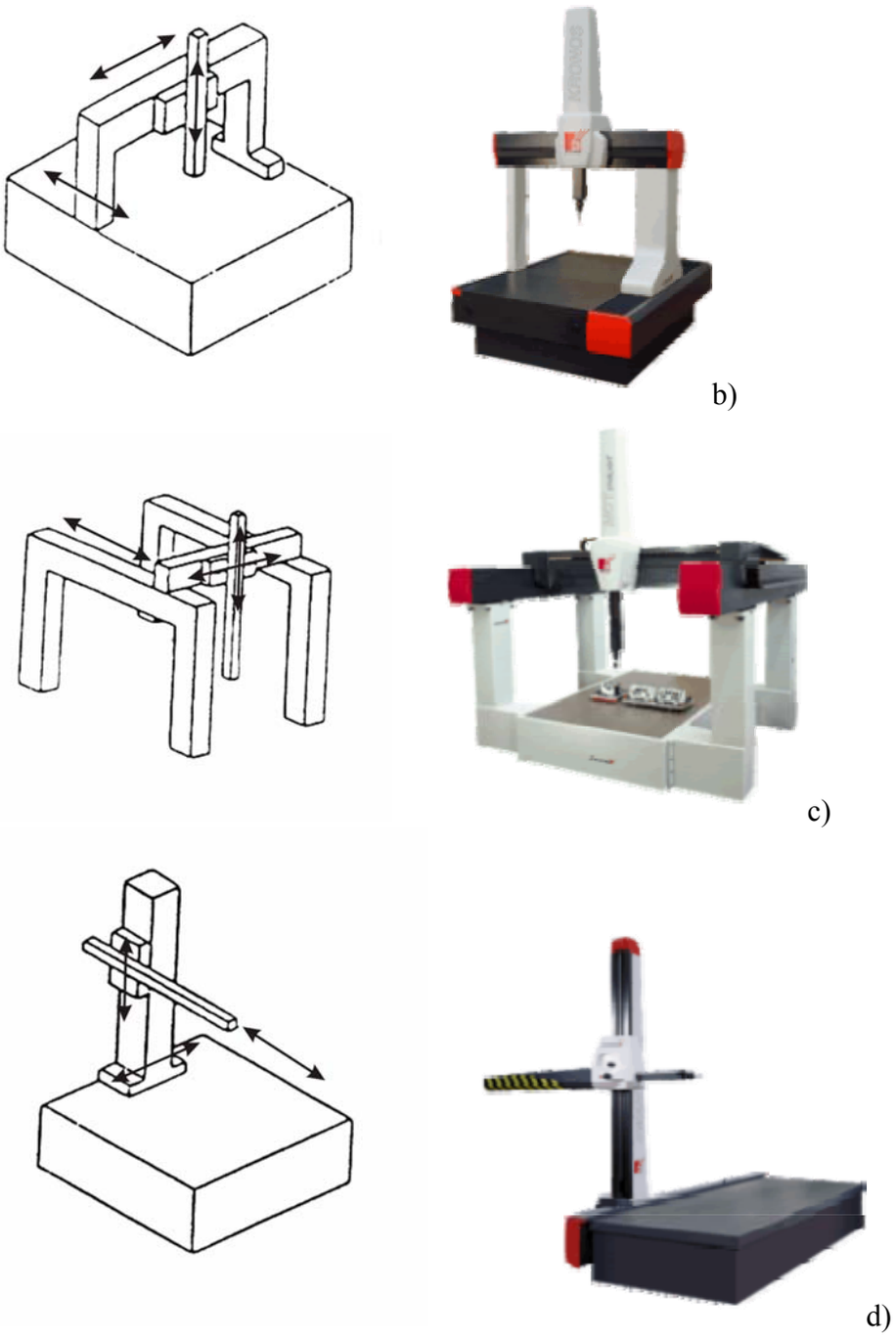
- stubna,
- portalna,
- konzolna,
- mostna te
- izvedba TMU sa bočnim stupom.

Prema istom izvoru, portalne izvedbe kontaktnih TMU su u najširoj mjeriteljskoj upotrebi, budući da za širok raspon gabarita mjernog volumena omogućavaju postizanje relativno visokih točnosti mjerenja. Mostne se izvedbe koriste prilikom mjerenja predmeta velikih masa i dimenzija, dok su konzolne i stubne izvedbe u principu namijenjene mjerenju predmeta malih dimenzija i visoke razine postizive točnosti.





a)



b)

c)

d)

Slika 9. Shematizirani prikaz i realne izvedbe nekih osnovnih tipova TMU,
a) konzolna, b) portalna, c) mostna, d) stupna izvedba TMU,
(izvor [10] i http://www.coord3.com)

Šira klasifikacija TMU obuhvaćena je američkim standardom ANSI/ASAME B89.1.12-1986.

3.2. Izvedbe projekcijskih aktivnih mjernih senzora

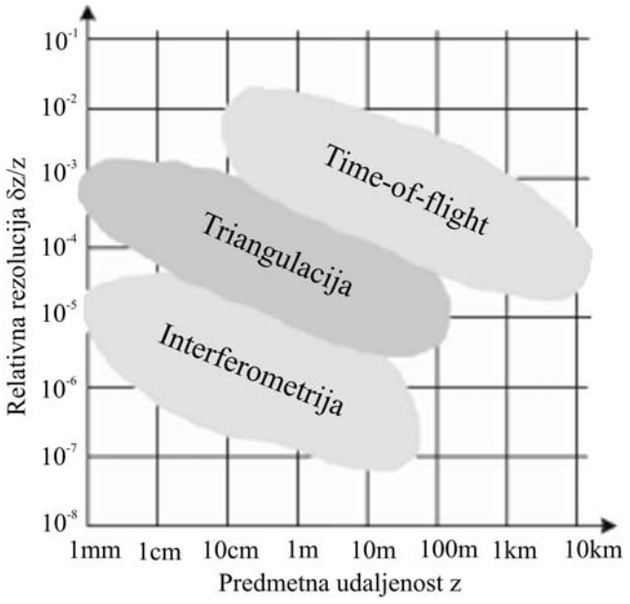
Slično kao i kod kontaktnih mjernih senzora, na tržištu se danas nalazi komercijalno dostupan veliki broj projekcijskih aktivnih mjernih senzora [20]. Sustavan opis svakog pojedinog sustava bio u okviru ovog projekta praktički neostvariv zadatak, kako zbog njihove fizičke nedostupnosti tako i zbog njihovog komercijalnog karaktera. Poseban je problem sistematizirati projekcijske senzore, budući da proizvođači uobičajeno daju pristup samo nekim tehničkim karakteristikama uređaja (prostorna rezolucija, očekivana točnost u ovisnosti o mjernom volumenu, gabariti mjernog volumena i sl.), iz kojih nisu vidljivi detalji matematičkog modela i ostalih konstrukcijskih principa i korištenih elemenata oko kojih je senzor konstruiran.

Stoga će ovdje biti prikazani samo relevantni tipovi projekcijskih aktivnih mjernih metoda na kojima su bazirani mjerni senzori koji su danas u široj uporabi, a koje prema vrsti projiciranog svjetla dijelimo na sustave koji koriste izvor:

- koherentnog i
- nekoherentnog svjetla.

Prema načinu definicije (kodiranja) položaja mjerne točke na površini mjernog objekta relativno u odnosu na mjerni senzor razlikujemo :

- triangulacijske,
- amplitudno i fazno modulirane TOF sustave te
- interferometrijske projekcijske sustave.



Slika 10. Područja primjene projekcijskih sustava

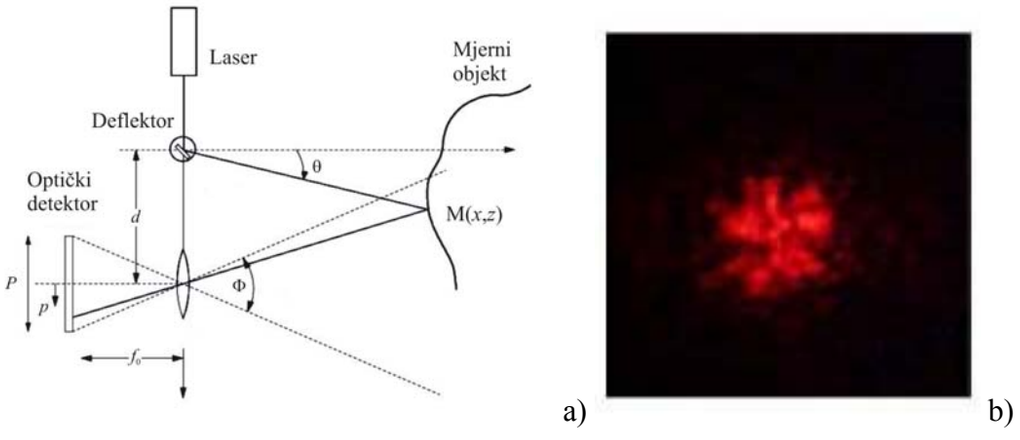
Prema sistematizaciji načina kodiranja mjerne točke s obzirom na relativnu rezoluciju i predmetnu udaljenost [21] (slika 10.), interferometrijski sustavi pokrivaju područje najvećih mjernih rezolucija i najmanjih predmetnih udaljenosti, TOF sustavi područje velikih predmetnih udaljenosti i niske razine mjerne rezolucije, dok triangulacijski sustavi pokrivaju široko područje predmetnih udaljenosti i srednje područje mjernih rezolucija.

3.2.1. "Single point" i "light stripe" laserski skeneri

Razvoj laserskih mjernih sustava započeo je sedamdesetih godina prošlog stoljeća s projiciranjem jedne jedinstvene mjerne točke na površinu mjernog objekta [22]. Zbog njihovog svojstva da na površini mjernog objekta projiciraju samo jednu točku, poznatiji su pod engleskim nazivom "*single point"* laserski skeneri, slika 11.a.

Zapravo se radi o efektu da se prilikom projekcije koherentnog laserskog snopa (koji je zapravo tanki svjetlosni cilindar u prostoru) na površini mjernog objekta vidi samo jedna projicirana točka (slika 11.b). Ukoliko bi se normala površine mjernog objekta poklapala sa vektorom projiciranog laserskog snopa (iako su ovi vektori međusobno suprotnih predznaka), projicirana točka imala bi u presjeku izraženu Gaussovu raspodjelu svjetloće [23]. Navedena raspodjela svjetloće je u funkciji izvora svjetla i osvijetljene površine, te je od presudnog značaja za točnost ovih sustava (pokazano u poglavlju 5). Svako odstupanje od kolinearnosti ovih dvaju vektora dovodi do deformacije projicirane točke, tj. do njenog odstupanja od željene Gaussove karakteristike. Pritom se najsvjetlije područje zrake nalazi u središtu projiciranog cilindričnog snopa, te po Gaussovoj raspodjeli slabi u smjeru povećanja radijusa cilindra zrake. Pritom dimenzije projicirane točke, njen oblik i raspodjela njene površinske svjetloće [3], kao i interakcija koherentnog svjetla sa površinom mjernog objekta [24] utječu na točnost pronalaženje položaja težišta projicirane mjerne točke na snimljenoj slici i time direktno utječu na pouzdanost mjernih rezultata.

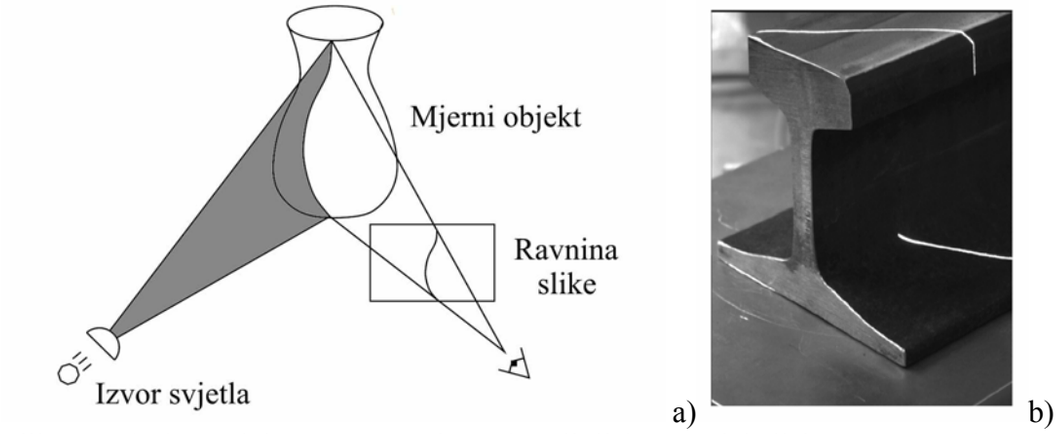
Prema načinu projiciranja zrake na objekt mjerenja, razlikujemo senzore kod kojih projicirani snop reflektiran od površine mjernog objekta upada u fotoosjetljivi senzor pod nekim kutom različitim od nule (slika 11.a), te senzore koji su ko-fokalne izvedbe (projicirana i reflektirana zraka prolaze istim optičkim putem [25]). Kod prvih se projicirani snop iz izvora svjetla pozicionira pomoću deflektorskih ogledala na površini mjernog objekta. Reflektirana zraka sa površine mjernog objekta registrira se na fotoosjetljivom optičkom senzoru poznate geometrije i orijentacije (u početku su korišteni LPED - Lateral Photo Effect detektori, a u novije vrijeme CCD odnosno CMOS detektori [26]). Poznavajući relativan položaj izvora svjetla i optičkog senzora i trenutni kut zakreta deflektorskog ogledala kojim se pozicionira projicirani svjetlosni snop, moguće je triangulacijom izračunati koordinate objektne mjerne točke relativno u odnosu na mjerni senzor.



Slika 11. Shematizirana postava s*ingle point* senzora a) sa fotografijom projicirane točke b)

Akvizicija kompletnog mjernog volumena zahtijevala bi kontrolirani pomak mjerne točke uzduž kompletne površine mjernog objekta, što se prilikom mjerenja oblika pomoću senzora koji projicira jednu poprečnu liniju postiže kontroliranim pomakom, pomoću zakreta deflektorskog ogledala i/ili kontroliranim planarnim pomakom mjernog objekta. Stoga samo jedna projicirana točka koja omogućuje samo jedan mjerni osjet, a zahtijeva barem dva stupnja slobode pomicanja projiciranja svjetlosne zrake, nije prihvatljiva za brzu digitalizaciju većih površina tehničkih mjernih objekata. Proširenje ove projekcijske metode dolazi u vidu projiciranja laserskog snopa koji prilikom interakcije sa površinom mjernog objekta stvara tanku liniju (eng. *light stripe*), slika 11.b. Pritom se radi o istoj tehnologiji izvora svjetla kao i kod točkastog skenera, s tim da kod ovih senzora prije interakcije sa površinom mjernog objekta laserska zraka prođe kroz cilindričnu leću u kojoj se razlaže u plohu svjetla koja se prilikom interakcije sa površinom mjernog objekta vidi kao linija. Analogna diskusija o Gaussovoj raspodjeli svjetloće te efektu kolinearnosti vektora smjera širenja projiciranog svjetla sa normalom na površinu vrijedi i u slučaju projicirane linije koherentnog svjetla.

Potreba za precizno izrađenim gibljivim dijelovima točkastih senzora potakla je razvoj laserskih mjernih senzora, koji umjesto samo jedne mjerne točke, preko sustava prizmi projiciraju jednu ili više linijskih zraka na površinu mjernog objekta [22,27,28]. Tim zahvatom konstrukcija laserskih skenera dodatno je pojednostavljena zbog potrebe za jednim stupnjem slobode gibanja manje nego u odnosu na senzore koji projiciraju samo jednu točku. Istovremeno je ovim zahvatom i smanjena mogućnost projiciranja na velike udaljenosti, te povećana osjetljivost na ambijentalno osvjetljenje (pod pretpostavkom da se koristi laserski izvor svjetla jednake snage kao u prethodnom primjeru). No, tu je vidno područje senzora bitno prošireno, kao i brzina akvizicije pojedinih mjernih točaka. Veličina i oblik vidnog polja te brzina digitalizacije pritom je u direktnoj ovisnosti o veličini vidnog polja korištene optike na kameri, te mogućnostima kutnog pozicioniranja deflektorskog ogledala.



Slika 12. a) shematizirana postava laserskog linijskog projekcijskog sustava ; b) sa fotografijom projicirane linije

Pomak zrake u općenitom slučaju može biti pravocrtan, ali se u specifične mjerne svrhe koriste i senzori kod kojih projicirana zraka ima neku drugu preddefiniranu putanju, kao što je zatvorena Lissajousova krivulja (Slika 13.), u svrhu lociranja položaja refleksijskog objektnog markera poznatog oblika [19].



Slika 13. Putanja laserske zrake po zatvorenoj Lissajousovoj krivulji

Budući da svi gibljivi optički elementi zahtijevaju veliku točnost izrade, montaže i kontroliranog pozicioniranja, time izravno poskupljuju i kompliciraju izvedbu i upravljanje mjernog senzora. Uobičajeno je da sustavi koji na površinu mjernog objekta projiciraju točku ili liniju koriste konstrukciju mjernog senzora kod koje je izvor svjetla pomičan (preko pomičnog ogledala), dok je detektor fiksan relativno u odnosu na mjerni objekt. Ovakvom konstrukcijom fiksnog optičkog detektora direktno se vidnim poljem korištene kamere ograničava vidno polje mjernog senzora, a time i područje iskoristivosti mjernog senzora.
Uvođenjem dodatnog stupnja slobode dotada nepomičnom detektoru koji se sada giba sinkronizirano [27] sa izvorom svjetla, razvijeni su sustavi kod kojih je sinkronim zakretom detektorskog sklopa povećano vidno polje mjernog senzora, a time omogućena i upotreba objektiva sa velikim žarišnim duljinama na sinkroniziranim mjernim detektorima, čime je direktno povećan raspon područja primjene (poglavlje 4.2).

Konstrukcije laserskih sustava koje se sastoje od jednog izvora svjetla i jednog optičkog detektora osjetljive su na zasjenjenja izvora svjetla, tako da su se osim gore opisanih varijanti projekcijskih laserskih sustava sa jednom kamerom i jednim svjetlosnim izvorom, razvile i varijante laserskih sustava sa dvije kamere i jednim izvorom svjetla, kao i sustavi sa više kamera i više izvora svjetla [22,28,29,30].

Tabelom 1 dan je sažeti prikaz osnovnih karakteristika nekih poznatijih komercijalnih laserskih sustava.

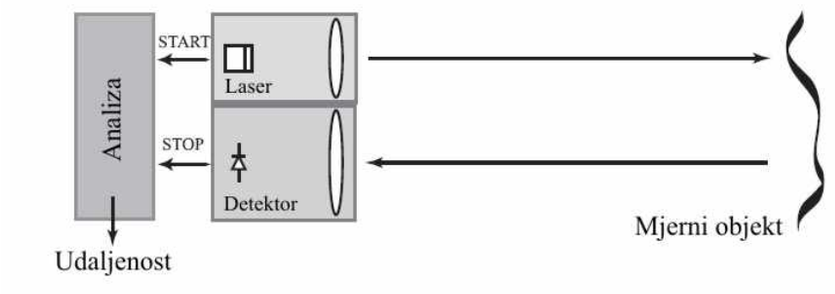
Proizvođač	3rdTech	Cyra Tech	Metric Vision	Optech	Riegl USA
Valna duljina lasera [nm]	670	532	1550	1540	904
Snaga lasera [mW]	5	1	4	10	1.2-85
Predmetna udaljenost [m]	0.3-12	1.5-50	0.3-55	1.5-1200	0.3-2500
Točnost [mm] kod X [m]	10 kod 12	6 kod 50	0.02	6 kod 100	76 kod 2400
Cijena u dolarima	$45,000	$125,000	$360,000	$150,000	$35-85,000

Tabela 1. Usporedni prikaz karakteristika nekih komercijalnih laserskih senzora

3.2.2. Time-of-flight (TOF) i Time-of-scan (TOS) laserski sustavi

Osim analize zrake reflektirane sa površine mjernog objekta preko geometrijske triangulacije prikazane u prijašnjem poglavlju, za mjerenje relativnog položaja objektne mjerne točke u odnosu na položaj mjernog senzora moguće je iskoristiti i efekt kašnjenja signala reflektiranog sa refleksne površine mjernog objekta [30] (TOF sustavi, slika 14.) ili pak mjeriti vrijeme potrebno projiciranoj zraci da prijeđe od neke poznate točke do neke nove točke (TOS sustavi, slika 10.) [31].

TOF sustavi koji određuju udaljenost objekta od mjernog senzora na temelju mjerenja kašnjenja odaslanog svjetlosnog impulsa oslanjaju se na činjenicu da je brzina svjetlosti u zraku konačna, te da iznosi cca $c=3x10^8$ m/s. Zbog principijelne sličnosti sa klasičnim radarima (radar je akronim od eng. *radio detection and ranging*), ovakvi sustavi poznati su pod komercijalnim nazivima "*Lidar*" (prema eng. *Light detection and ranging*) odnosno "*Ladar*" (prema eng. *Laser detection and ranging*).



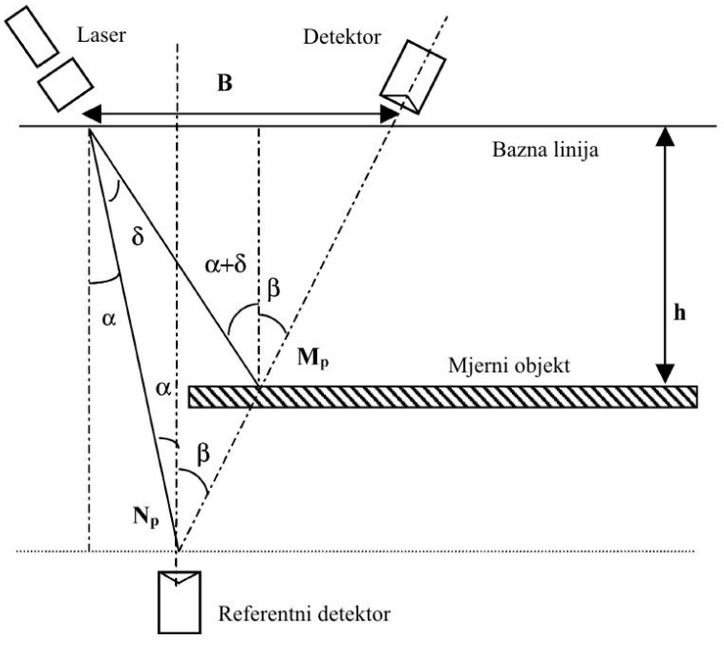
Slika 14. Princip TOF sustava

U klasičnom TOF mjerenju mjerni senzor emitira kratki impuls svjetla, te se na osnovu izmjerenog vremena potrošenog za odašiljanje i povratak signala određuje udaljenost od mjernog objekta. Pritom se kodiranje informacije izvodi korištenjem amplitudne (AM) ili frekvencijske (FM) modulacije. Amplitudno modulirani signali (moduliran je intenzitet svjetla) mjere udaljenost indirektno, detektirajući promjenu u fazi povratnog signala. Sustavi koji vrše frekvencijsko moduliranje oslanjaju se na prostorno-vremensku koherentnost projicirane laserske zrake koja im preko vremenske koherentnosti omogućuje poznavanje vremenskog intervala unutar kojeg se može sa velikom sigurnošću predvidjeti faza svjetlosnog vala u nekoj točki prostora. Udaljenost od mjernog objekta pritom se određuje prema jednostavnoj relaciji:

$$R = \frac{cT}{2} \tag{3.1}$$

Točnost i rezolucija mjerenja ovisiti će o sposobnosti mjerenja proteklog vremena. Primjerice, za poznatu brzinu svjetlosti od cca $c=3x10^8$ m/s, opisani mjerni sustav treba biti u mogućnosti izmjeriti vremenski period od 3.33 pikosekundi da bi se dobila rezolucija mjerenja od jednog milimetra. Većina komercijalnih sustava koji rade na ovom principu ostvaruje rezoluciju od 10 do 100 mm prema [30]. Ovim zahtjevom senzori bazirani na mjerenju proteklog vremena drastično poskupljuju u odnosu na uobičajene triangulacijske senzore. Zbog navedenih karakteristika uobičajeno je da se sa senzorima baziranim na TOF principima mjere ili iznimno male (<10mm) ili iznimno velike (>10m) udaljenosti od mjernog objekta.

Kombiniranjem principa triangulacije sa principom mjerenja vremena za određivanje položaja objektne mjerne točke M_p koriste se TOS sustavi (slika 15.). Pritom se periodički mjeri vrijeme potrebno zraci svjetla da se sa neke poznate točke N_p u referentnom detektoru pomakne u točku M_p pri čemu se otkloni za kut δ koji je upravo u funkciji vremena pomaka zrake.



Slika 15. Princip TOS sustava

Udaljenost h između bazne linije i mjerne točke M_p određuje se triangulacijom prema slici 10 u obliku:

$$h = \frac{B}{tg[\alpha + \delta(t)] + tg(\beta)} \tag{3.2}$$

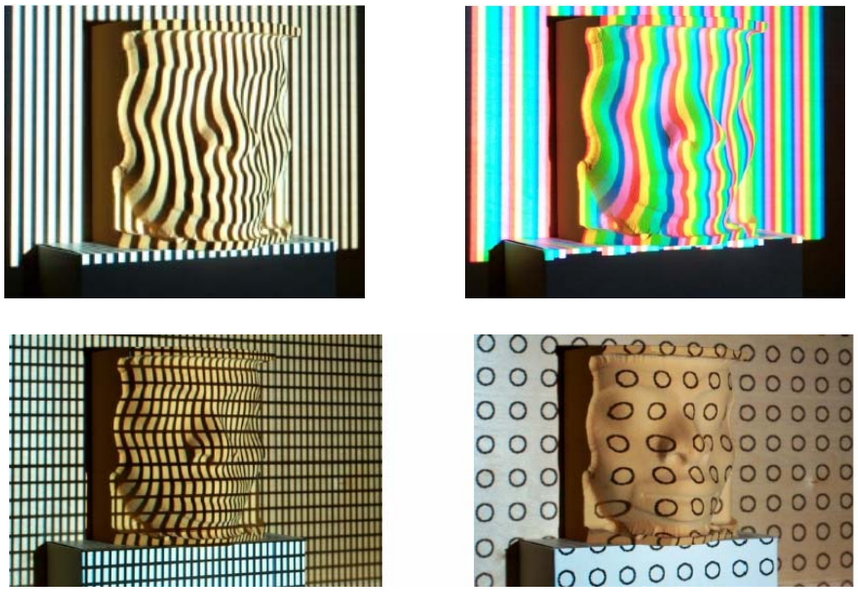
3.2.3. Projiciranje strukturiranog svjetla

Iako se i laserski projicirani snop po svojim optičkim karakteristikama zbog strogo definirane geometrije projicirane točke, tj. linije može okarakterizirati kao neka vrsta strukturiranog svjetla, povijesno je terminološki uobičajeno da se pod pojmom strukturiranog svjetla podrazumijevaju samo oni mjerni sustavi koji kao izvor svjetla koriste neku vrstu nekoherentnih svjetlosnih izvora za projiciranje neke prethodno definirane svjetlosne strukture na površinu mjernog objekta (Slika 16.). Sustavi sa nekoherentnim izvorom svjetla zapravo su principijelno i konstrukcijski slični ekvivalentnim laserskim triangulacijskim projekcijskim sustavima, te se uobičajeno sastoje od jednog projektora i minimalno jedne kamere za akviziciju slike, kao što je to shematski prikazano slikom 17.

S obzirom na način realizacije kodiranja slikovnog osjeta mjerne točke, razlikujemo izvedbe projekcijskih senzora sa projekcijom:

- monokromatskog svjetla (halogeni izvori)
- rastera u boji (LCD projektori).

Pritom se kod postojećih sustava (tabela 2.) na površinu mjernog objekta projiciraju raznovrsni uzorci rastera, prema slici 16., koji su tako odabrani da se sa nekim minimalnim brojem projekcija omogući jednoznačna definicija položaja velikog broja mjernih točaka na površini mjernog objekta relativno u odnosu na mjerni senzor.

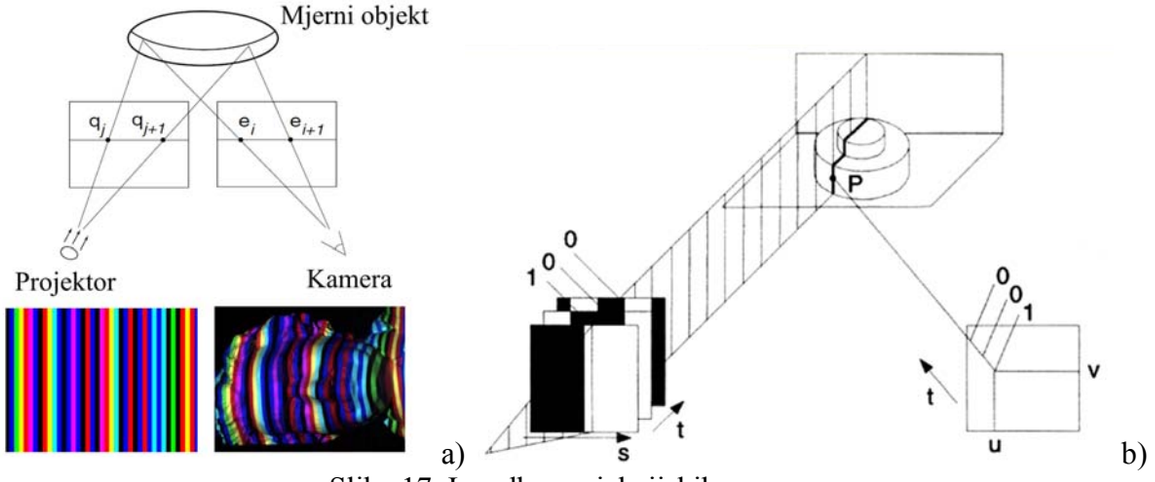


Slika 16. Neke od varijanti projiciranih strukturiranih svjetlosnih uzoraka

Mogućnost istovremenog projiciranja više od jedne jednobojne slikovne strukture (Slika 16.) koje nekoherentni izvori omogućavaju, pri obradi slike zahtijeva korištenje takvih slikovnih operatora koji mogu analizirati kompletnu promatranu scenu, tj. mogu u svrhu dobivanja mjerne informacije u potpunosti iskoristiti kompletno vidno polje kamere. Objektno orijentirani operatori koji određuju položaj težišnice projiciranog snopa linija (prostorno kodiranje mjerne točke) primjenjivi su i kod ovih sustava [32], ali se zbog njihove diskretne

objektne orijentiranosti glavnina informacija prenosi samo preko intenziteta svjetloće u pojedinim diskretnim točkama, koji se zbog statičkog projiciranja ne mijenja u vremenu. Time se efektivno ne iskorištava kompletno vidno područje senzora, već se mjerna informacija dobije samo u točkama koje pripadaju težištima projiciranih linija (ili nekih drugih oblika, prema slici 16.). Teoretski bi se moglo postići da se broj projiciranih tamnih i svijetlih linija na nekoj udaljenosti točno poklapa s brojem piksela u kameri, ali bi takav sustav mogao mjeriti samo ravne površine, idealno okomite na mjerni senzor što se kosi s idealom općenitosti po pitanju primjene ovih mjernih sustava. Kada bi i bio izveden u praksi, rezolucija pronalaženja položaja linija na slici bila bi jedan cijeli piksel, dok je kod operatora koji određuju položaj težišta ta rezolucija reda veličine 0.1 piksel ili bolja.

S mogućnošću istovremenog projiciranja više jednobojnih jednakih paralelnih linija, ili neke druge strukture, javlja se problem jednoznačnog indeksiranja mjerne točke, tj. određivanje položaja projicirane tamne i svijetle linije. Ovo je naročito vidljivo kod objekata čija površina sadržava geometrijske diskontinuitete, dok je kod projiciranja na plohe bez diskontinuiteta proces brojanja indeksa mjernih točaka praktički trivijalan, dovoljno ih je brojati redom u smjeru okomitom na projicirane linije. Uobičajeno je da realne površine mjernih objekata nemaju idealnu Lambertsku [9] raspodjelu svjetloće, niti jednoličnost teksture. Time i razlučivanje položaja projicirane linije na površini mjernog objekta izravno otežano. Proširenjem principa projekcije paralelnih linija sa istovremenim projiciranjem snopa paralelnih obojanih linija (Slika 17.a) [15] omogućeno je jednoznačno indeksiranje projiciranih linija, a time i mjerenje oblika već i na osnovu samo jedne projekcije rasterskog snopa. Međutim, još uvijek se analiza slike mora vršiti prikladnim objektno orijentiranim operatorima koji analiziraju lokalni intenzitet svjetloće na snimljenoj slici, uzimajući pritom u obzir i okolišne piksele [11], čime se dovodi do progresivnog prirasta pogreške lociranja te mjerna informacija nije prenesena sa svakim snimljenim pikselom.



Slika 17. Izvedbe projekcijskih senzora

Uvođenjem projekcijskih sustava koji omogućuju višekratno projiciranje rastera promjenjive svjetlosne karakteristike (slika 17.) na površinu mjernog objekta (kombinacija prostorno-vremenskog kodiranja položaja mjerne točke), moguće je promatrati kontroliranu promjenu intenziteta svjetloće svakog piksela snimljene slike zasebno tijekom vremena, odn. analizu dovesti u vremensko područje. Tako će i na područjima površine na kojima postoji izraženiji refleks moći biti ostvareno kodiranje mjerne informacije, ili će ono u potpunosti izostati (što je principijelno povoljnije nego koristiti pogrešno određeni položaj mjerne točke, a koji nije moguće postojećim metodama eliminacije pogreške unutar korištenog sustava otkriti).

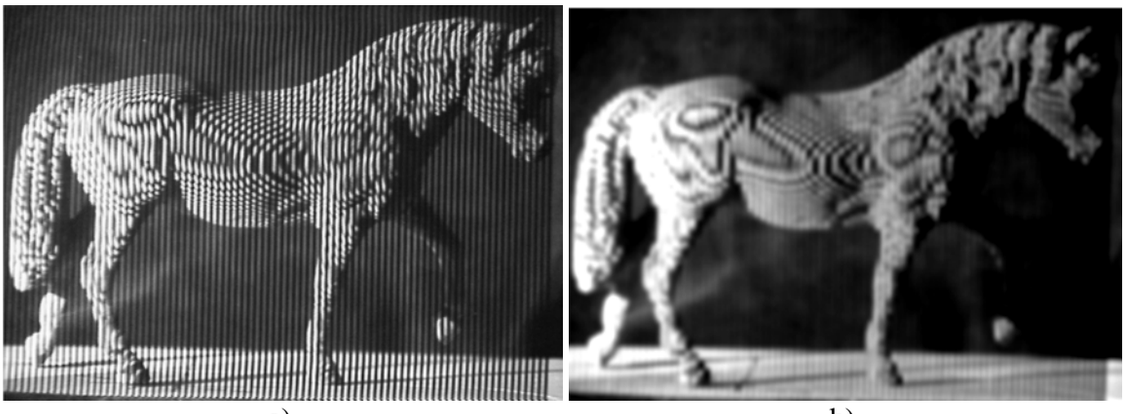
Fazne metode [11] upravo iskorištavaju ovaj efekt prostorno-vremenskog kodiranja, pri čemu se ciljano tijekom nekog kratkog vremenskog perioda kontrolirano mijenja intenzitet svjetloće neke točke na objektu. Time svaki piksel u kameri zapravo postaje zasebnom mjernom točkom, čiji se intenzitet u vremenu mijenja (odn. kodira) po unaprijed zadanom matematičkom zakonu. Ovisnost o vremenu se zapravo odnosi na poznavanje karakteristike trenutno projiciranog svjetlosnog rastera na površinu mjernog objekta (detaljnije u poglavlju 4.1). Trenutno su u široj uporabi metoda vremenskog faznog pomaka koja se za dobivanje jednoznačne fazne raspodjele kombinira sa metodom Gray-koda i monokromatskim projiciranim uzorkom, te heterodinamički postupci kod kojih se preko variranja gustoće pruga postiže kodiranje položaja mjerne točke na mjernom objektu, tj. na snimljenim fotografijama [11].

Proizvođač	Senzor	Točnost [mm]	Mjerni volumen	Brzina
GOM	Atos II	0.005-0.02	Od 35x28x20mm do 1200x960x960mm	1,300,000 točaka u 7 sekundi
Breuckmann GmbH	OptoTOP-HE100	0.015	80x60x50mm	1,300,000 točaka/sekundi
Breuckmann GmbH	OptoTOP-HE600	0.050	480x380x300mm	1,300,000 točaka/sekundi
Genex	EI 3D Digitizer	0.025-0.25	Od 59x48x32mm do 250x200x200mm	442,368 u <1 sekundi
Steinbichler Optotechnik	Comet C50	0.02	45x35mm	6666 točaka/sekundi
Steinbichler Optotechnik	Comet C400	0.07	420x340mm	6666 točaka/sekundi

Tabela 2. Usporedni prikaz mjernih karakteristika nekih komercijalnih senzora

3.2.4. Interferometrijski sustavi

Sustavi temeljeni na interferencijskom efektu iskorištavaju interferencijski Moiré efekt (Slika 18.), kod kojeg se prilikom projiciranja prostorno amplitudno moduliranog svjetlosnog signala zbog mrežaste matrične strukture CCD senzora ili kao interferencija projicirane i postojeće linijske strukture na površini dolazi do demodulacije signala. Tako se prividno stvaraju interferencijske linije. Karakteristika koja omogućava mjerenje oblika i pomaka dobivenim interferencijskim linijama je proporcionalnost veze modulirane faze sa udaljenošću od mjernog senzora (u vezu sa fazom interferencijskih linija doveden je iznos relativnog pomaka osnovne i indeksne strukture).



a) b)

Slika 18. Primjer interferometrijskog mjerenja oblika Moire efektom
a) originalni efekt b) filtrirani efekt

Distorzija tako dobivene interferencijske strukture definira topološka svojstva površine u smislu iso-linija, što je jasno vidljivo na slici 18 (efekt definicije topologije preko zatvorenih iso-linija je najizraženiji na stražnjem boku). Ove su metode prikladne za određivanje oblika i pomaka planarnih objekata sa malo diskontinuiteta i slabo izraženom promjenom oblika u smjeru normale na senzor budući da kod izraženih kosina gustoća interferencijskih linija postaje prevelika za njihovo međusobno ispravno razlučivanje.

Sustavi koji rade na ovom principu obično pokrivaju vrlo uska vidna područja na vrlo malim predmetnim udaljenostima, budući da je metoda vrlo osjetljiva na intenzitet okolnog osvjetljenja i refleksijska svojstva površine. Efekt preosvjetljenosti i gubitka dubinske oštrine najviše je izražen na stražnjim nogama i repu modela konja dok se prednja lijeva noga potpuno stopila sa okolišem.

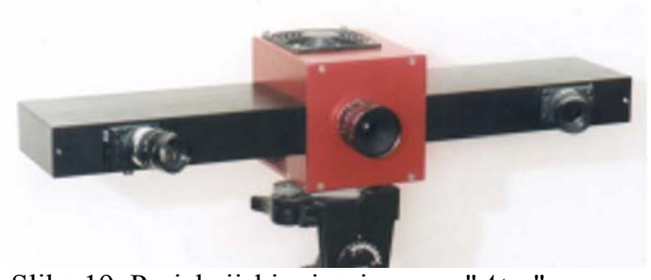
Ova se metoda ovdje navodi radi potpunosti prikaza postojećih metoda za određivanje oblika te u tom smislu ovdje neće biti detaljnije analizirana.

4. TEORIJSKE OSNOVE METODA

Metode koje su obuhvaćene ovim istraživanjem i pripadajući mjerni senzori za određivanje prostornog oblika i dimenzija mjernih objekata temelje se na fundamentalno različitim teoretskim principima i specifičnim matematičkim formulacijama proračunskih modela. Poznavanje osnovnih teoretskih elemenata i relevantnih matematičkih principa pojedinih metoda omogućiti će temeljno razumijevanje načina definiranja mjerne točke za svaki od relevantnih tipova mjernih senzora koji se trenutno nalaze u aktivnoj funkciji u Hrvatskoj. Pritom će se opisati teoretski principi i konstrukcijski elementi relevantnih, trenutno u Hrvatskoj dostupnih mjernih senzora i to redom: projekcijski senzor *Atos*, laserski senzor Cyberware Mini-model Shop 3030/HIREZ/MM, te kontaktni trokoordinatni mjerni uređaj Ferranti Merlin 750.

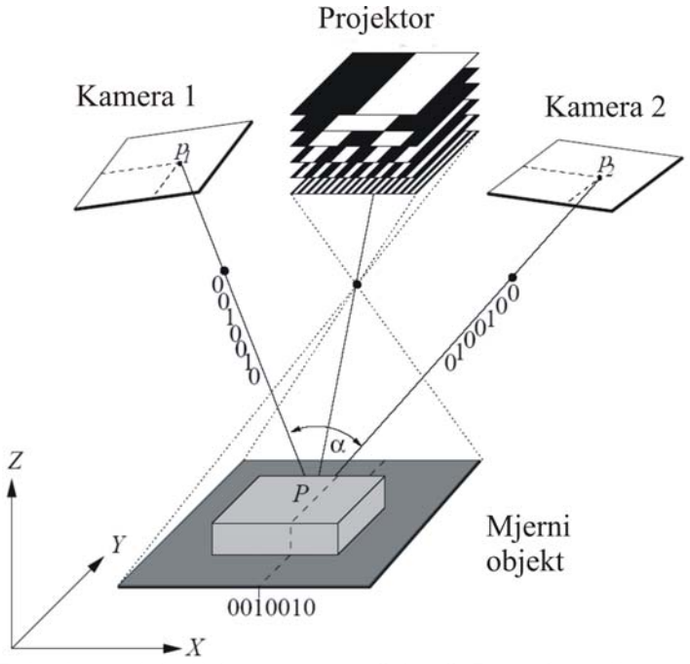
4.1. Metoda projekcijskog kodiranog nekoherentnog svjetla

Projekcijski senzor *Atos* (slika 19.), dostupan u LEM-FSB, čiji će se principijelni teoretski model ovdje prikazati, sastoji se od konvergentne konfiguracije kamera te centralno postavljenog projektora kodiranog svjetla. Iz komercijalnih razloga kompletan osnovni matematički model ovog mjernog senzora vjerojatno nikada neće biti u potpunosti publiciran. Stoga će ovaj prikaz teoretskog modela biti temeljen na radu dr. M. Gomerčića, koji je aktivno sudjelovao prilikom konstrukcije navedenog senzora [11].



Slika 19. Projekcijski mjerni senzor "*Atos*"

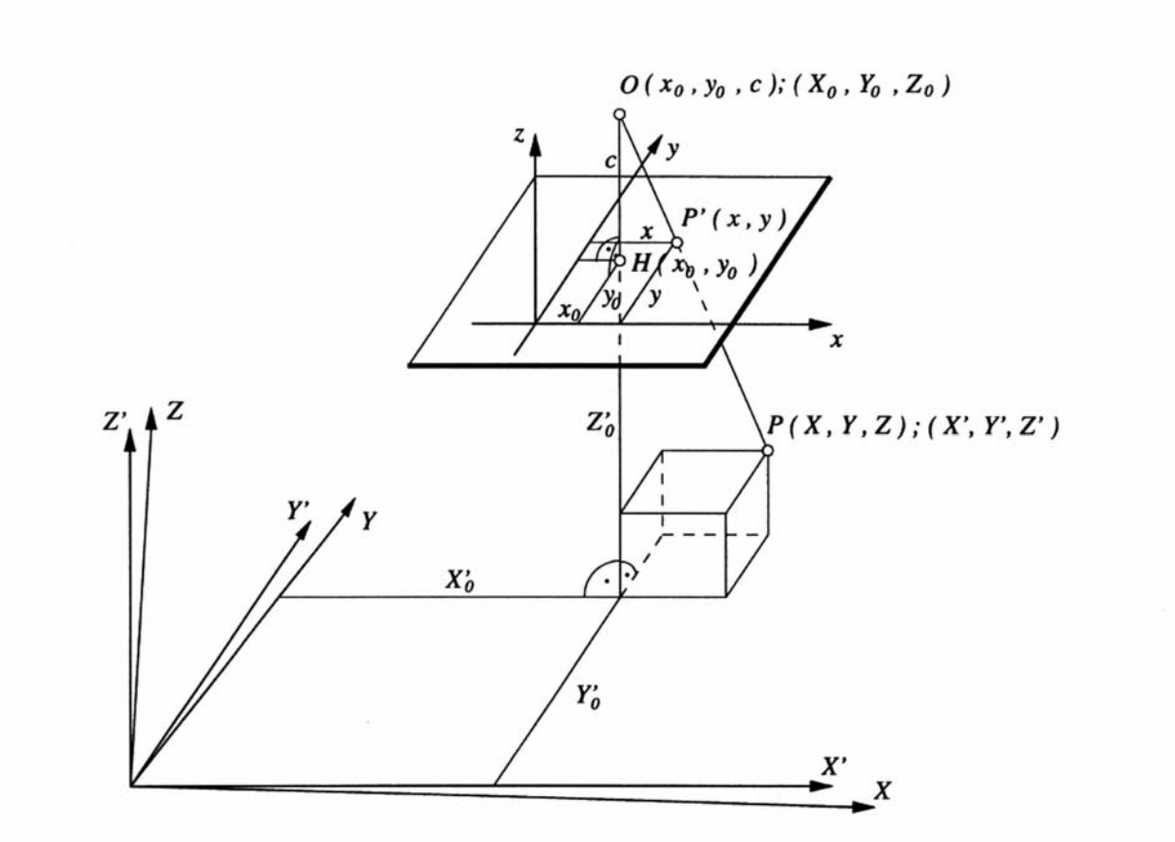
Spomenuti je senzor zasnovan na kombinaciji triangulacije i projiciranja rasterskog uzorka linija korištenjem nekoherentnog izvora svjetla. Prema slici 20. u pojednostavnjenom smislu, metoda funkcionira na način da centralno postavljeni projektor slijedno projicira unaprijed određenu rastersku strukturu na površinu mjernog objekta, koja će omogućiti jednoznačnu prostornu rekonstrukciju površine na temelju analize snimaka snimljenih s lijevom i desnom kamerom. Određivanje objektnih koordinata pritom će se provoditi postupkom triangulacije, pri čemu jedan vrh trokuta čini objektna mjerna točka, a ostala dva vrha položaji slikovnih osjeta objektne mjerne točke.



Slika 20. Princip projekcijskog senzora "*Atos*", Izvor http://www.gom.com

Poznavanje zakonitosti optičkog preslikavanja prostornog 3D objekta u dvodimenzionalno područje snimljene slike omogućiti će definiciju transformacije koordinatnih sustava objektnog koordinatnog sustava XYZ (slika 20.) u slikovni koordinatni sustav svake od korištenih kamera. Budući da svaka od kamera omogućuje po dva osjeta u slikovnom koordinatnom sustavu pojedine kamere, a objektna mjerna točka je definirana sa tri prostorne koordinate ovaj predefinirani model senzora ne zahtijeva poznavanje relativnog položaja projektora u odnosu na položaje kamera.

U fotogrametriji su definirana dva glavna koordinatna sustava (slika 21): 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 (odn. 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 21 nalazi između projekcijskog središta i modela umjesto iza projekcijskog središta (kao što je to slučaj u stvarnosti kod realnih kamera). Zbog pretpostavke da je površina 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 21. Uz definiciju koordinatnih sustava

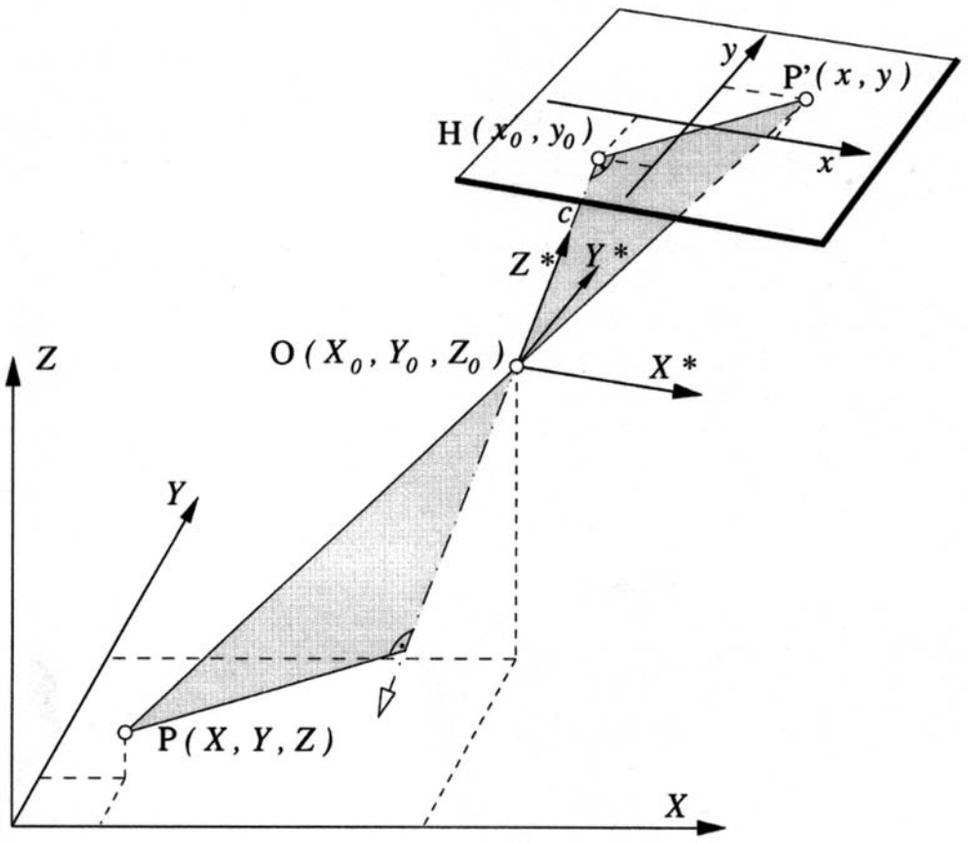
Zavisnost slikovnih i objektnih koordinata za proizvoljnu orijentaciju jedne kamere izvodi se prema slici 21. dovođenjem globalnog koordinatnog sustava (X,Y,Z) rotacijom u prostoru u položaj (X',Y',Z') paralelan sa slikovnim koordinatnim sustavom kamere (x,y,z). Transformacija je definirana preko:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

gdje je R matrica transformacije, čiji su faktori i pripadajući smisao kutova zakreta prikazani u [11] str. 10.

Translacijom ovog pomoćnog koordinatnog sustava u projekcijsko središte objektiva (slika 22) i korištenjem negativne projekcije jednadžbe 4.1 prema slici 22 proizlazi veza u obliku:

$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$



Slika 22. 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:

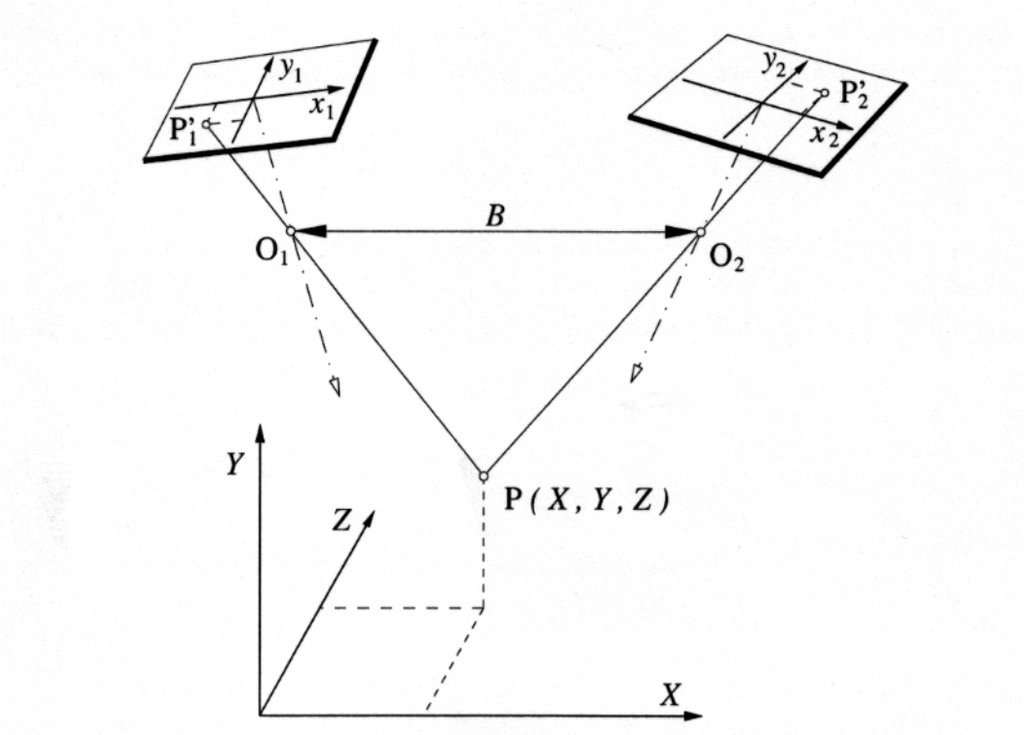
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \frac{c}{Z_P^*} \begin{bmatrix} X_P^* \\ Y_P^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

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'. Pregled modeliranja korekcija distorzija koje u sliku unašaju leće objektiva prikazani su u [11]

Iz provedene diskusije slijedi da je za kompletnu definiciju modela veze između objektnih i slikovnih koordinata kod korištenja samo jedne kamere potrebno poznavati devet parametara:

- 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.

Međutim, kod sustava koji se kao i ovaj sastoje od po dvije kamere konvergentne relativne orijentacije u prostoru (slika 23.), da bi se mogao provesti postupak određivanja koordinata objektne točke, za svaku je od kamera potrebno definirati položaj i orijentaciju slikovnog koordinatnog sustava u odnosu na globalni koordinatni sustav mjernog objekta. Time je za svaku kameru potrebano odrediti i po šest parametara vanjske orijentacije.



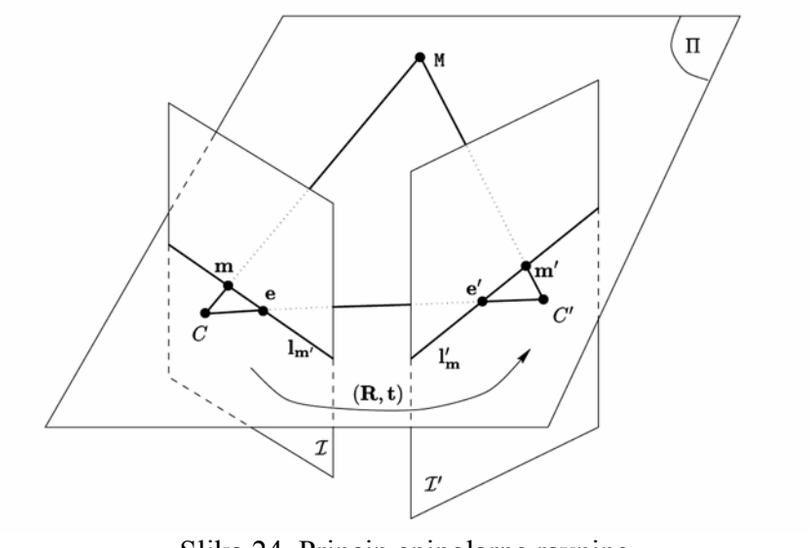
Slika 23. Triangulacija položaja točke P primjenom dvije kamere

Ovi se parametri određuju postupkom kalibracije kojeg je potrebno koncipirati tako da se preko objekta poznate geometrije odrede 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 jednoznačno poznate slikovne koordinate centralnom projekcijom preslikane objektne mjerne točke u svakoj od korištenih kamera, moguće je principom triangulacije odrediti prostorne koordinate objektne točke *P*. To je shematizirano prikazano slikom 23. Uz zanemarenje nesavršenosti optičkih komponenata, pravac koji prolazi kroz slikovnu koordinatu točke P_1' i projekcijsko središta pripadajuće kamere O_1, sa 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 [11], budući da je broj jednadžbi svake od točaka za jedan veći od broja nepoznatih objektnih koordinata, ovaj je model preodređen. Njegovo se rješenje traži minimalizacijom odstupanja varijabli, tj. kao rezultat odabire se 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*). Detaljan opis pristupu triangulacije položaja objektne mjerne točke s primjenom metode izjednačavanja zrakovnog snopa dan je u [11].

Opisanim triangulacijskim modelom, uz definirane 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 23) kao točku P_1', odnosno kao točku P_2' u desnoj kameri. U literaturi je to poznato kao problem jednoznačnosti (eng. *correspondence problem*). Predefiniranost opisanog modela može se djelomično iskoristiti i za pronalaženje slikovne koordinate neke mjerne točke korištenjem principa epipolarne plohe. Prema slici 24 i [32] neka se položaj objektne točke M preslikan u lijevoj kameri I nalazi u točki m. Točke C i C' pritom predstavljaju poznata projekcijska središta lijeve, odn. desne kamere (poznati su vanjski parametri orijentacije kamera R i t). Položaj slikovnog osjeta objektne točke m' u desnoj kameri neka je pritom nepoznat, što znači da nije zadovoljen uvjet jednoznačnosti. Spojimo li pravcima točku M i C, te točke C i C', dobivena su dva pravca koja leže u istoj ravnini (pravac CC', koji prolazi točkama e odn. e' pritom je zajednički svim vidljivim objektnim točkama M). Ravnina Π, koju smo ovako definirali u literaturi, poznata je kao epipolarna ravnina. Projekcija epipolarne ravnine u lijevu kameru pritom definira epipolarnu liniju Im'. S obzirom na to da smo na početku pretpostavili da u desnoj kameri ne znamo gdje se nalazi preslikana točka m', ako projiciramo epipolarnu ravninu u desnu kameru dobivamo drugu epipolarnu liniju na kojoj će po ovoj definiciji morati ležati tražena slikovna točka m'. Ovaj će uvijet biti zadovoljen ako se točka M nalazi u vidnom polju desne kamere, odn. ako nije zasjenjena unutar vidnog polja. Tako je zapravo korištenjem informacija o poznatom relativnom položaju lijeve i desne kamere problem pronalaženja stereopara točke m u desnoj kameri zapravo sveden sa ravninskog problema (ravnina slike je dvodimenzionalna) na jednodimenzijski problem traženja točke m' na epipolarnoj liniji druge kamere.



Slika 24. Princip epipolarne ravnine

Opisani postupak principa epipolarne linije pretpostavljao je poznavanje položaja točke M u prostoru, ali kako tu informaciju zapravo ne poznajemo, u svrhu jednoznačnog definiranja položaja neke objektne točke proširiti ćemo gornji postupak uvođenjem metode aktivne definicije mjerne točke na površini mjernog objekta. Ideja je da se projiciranjem nekog svjetlosnog uzorka na površinu mjernog objekta jednoznačno definira položaj objektne mjerne točke kao slikovni osjet u lijevoj odnosno desnoj kameri. Neki od načina i vrsta projekcijskih rastera koji su prikazani u literaturi ukratko su prikazani u poglavlju 3.2.3.

Projekcijski senzor *Atos*, dostupan u LEM-FSB, za rješavanje problema jednoznačnosti slikovne definicije položaja objektne mjerne točke koristi se centralno postavljenim projektorom sa izvorom nekoherentnog svjetla (slike 19 i 20). Na površinu mjernog objekta projicira se tako strukturirani svjetlosni uzorak (end. *structured light*), kojim se omogućuje približno sinusoidalna promjena svjetloće neke točke na mjernom objektu u ovisnosti o vremenu. Projicirani uzorak sastoji se od snopa paralelnih linija, koji svojim kontroliranim pomakom, po teoriji metode vremenskog faznog pomaka [11], pridružuje svakom pikselu pripadajuću fazu koja ovisi o položaju piksela u odnosu na ostale pruge. Princip metode vremenskog faznog pomaka biti će ovdje prikazan pojednostavljeno na modelu linijske kamere.

Neka je iznos svjetloće u nekom pikselu definiran sljedećom relacijom:

$$I(x,y,t) = s(x,y,t) + a(x,y,t)\cos\left[\delta(x,y,t) + \varphi(x,y,t)\right] \tag{4.4}$$

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 statičkih ispitivanja, 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 sa 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 [11]:

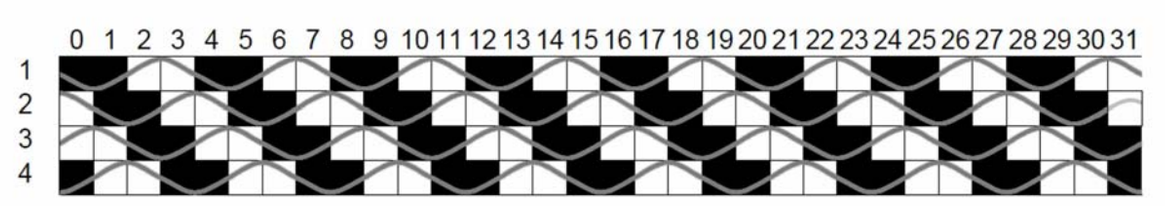
$$\delta(x,y) = \arctan \frac{\sum_{i=1}^{n} I_i(x,y)\sin\varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} I_i(x,y)\cos\varphi_i} \tag{4.5}$$

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

$$\delta(x,y) = \arctan \frac{-I_2 + I_3}{I_1 - I_2} \tag{4.6}$$

Slikom 25 [34] shematizirano je prikazan princip metode vremenskog faznog pomaka za jedan horizontalni red piksela u slici (ukupno 32 piksela). Svaki kvadratić u retku prikazuje jedan piksel u snimljenoj slici, a svaki stupac promjenu projiciranog sinusoidalnog intenziteta svjetloće tog istog piksela u slici, ali u nekom od slijednih vremenskih trenutaka (definiranim zapravo iznosom faze φ). Na ovom mjestu je potrebno napomenuti da verzija sustava *Atos*, dostupna u LEM-FSB, projicira linije koje na snimljenoj slici daju približno stepenasti svjetlosni uzorak (na slici 25. prikazan svijetlim i tamnim pikselima), dok novije varijante ovog senzora prema dostupnim saznanjima koriste modificirano projekcijsko stakalce koje im omogućava projekciju približno pravilnog sinusoidalnog uzorka. Napominjem, vremenska raspodjela svjetloće za jedan piksel u četiri uzastopno snimljene slike za narinuti fazni pomak od π /2 kod oba načina projiciranja biti će približno sinusoidalna, i ovu vremensku sinusoidalnost ne treba miješati sa prostornom sinusoidalnom raspodjelom svjetloće projiciranog rastera uzduž pojedinog redka u slici.

Promotrimo li redak piksela označen brojem 1 na slici 25, vidimo da se raspodjela svjetloće projiciranog rastera na snimljenoj slici duž redka mijenja po nekom sinusoidalnom zakonu. Pritom su srednja vrijednost, amplituda i faza iste za sve slike (znači, u retcima 1 do 4), ali je projicirana sinusoidalna raspodjela svjetloće pomaknuta u smjeru retka za iznos trenutno nametnute referentne faze φ.

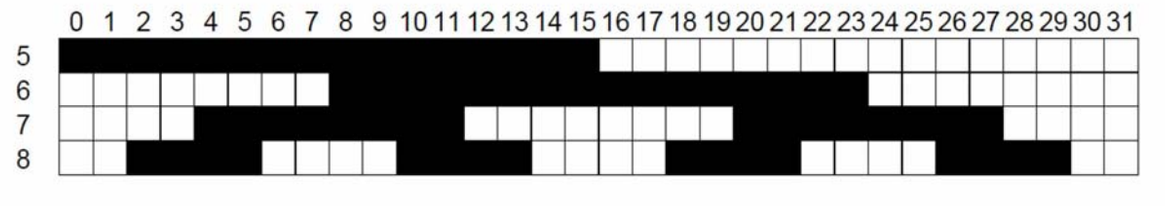


Slika 25. Princip metode vremenskog faznog pomaka

Uvrštavanjem pojedine svjetloće, npr. ako za stupac 4 (peti piksel po redu) uzimamo intenzitete snimljene svjetloće tog istog piksela u slijednim snimkama (vremenski fazni pomak) iz redaka 1 do 4, uvrštavanjem u jednadžbu 4.6 dobiti ćemo iznos faze za trenutno promatrani piksel.

Poznato je da funkcija *arctan* daje iznose od $-\pi$ do π, pa će se zbog ponavljajućeg uzorka (projicirani uzorak prema slici 25. ima konstantnu fazu) uzduž retka, a na osnovu jednadžbe 4.6, ponavljati rezultati u navedenom rasponu tvoreći tzv. pilastu sliku parcijalnih faza, (slika 27). Ovaj efekt onemogućiti će jednoznačnu identifikaciju neke od faza u obje od snimljenih slika, budući da se ista vrijednost parcijalne faze lako može ponoviti nekoliko puta uzduž promatranog redka piksela.

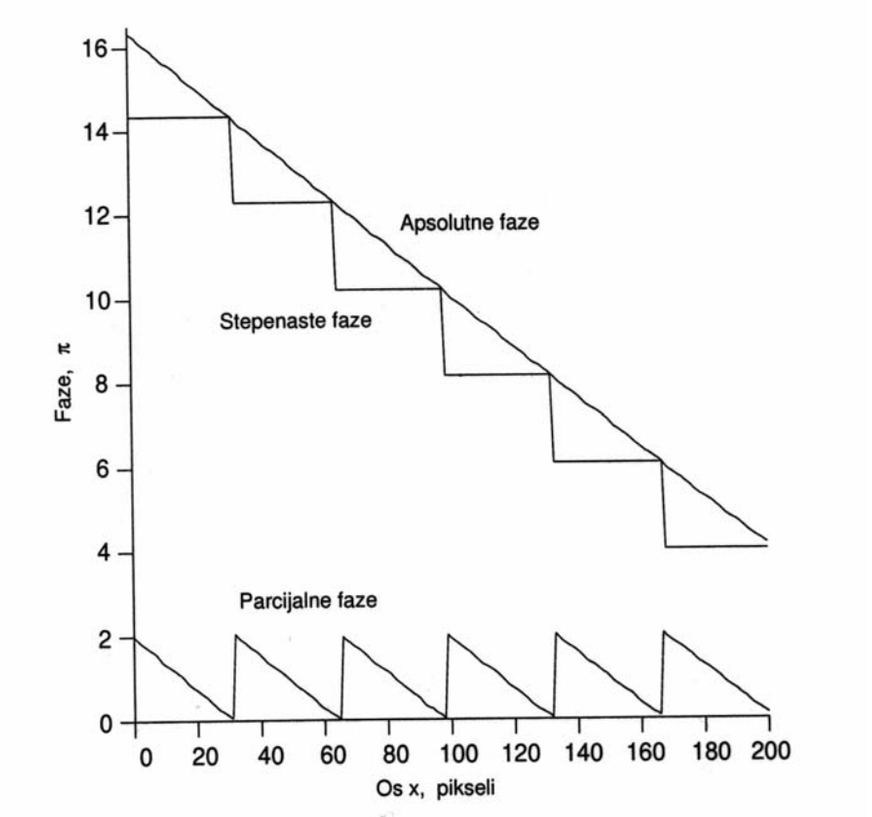
Za rješavanje ovog dodatnog problema jednoznačnosti, odnosno za jednoznačno određivanje apsolutnih faza u promatranom redku piksela, promatrani sustav koristi projekciju binarnih uzoraka pri čemu se projicirani snop svjetla kodira metodom Gray koda (slika 26). Ispravnim odabirom ovog dodatnog projekcijskog uzorka [11] postiže se da svako područje unutar kojega su parcijalne faze bile jednoznačno definirane bude kodirano određenom kombinacijom svijetlih i tamnih područja (gdje je sa 1 označen svijetli binarni kod, a sa 0 tamni kod). Time je svakom od područja između sinusoidalnih pruga pridružen konstantan iznos faze jednak višekratniku 2π, tvoreći tzv. stepenastu sliku (slika 27.). Primjena Gray koda stoga ne doprinosi ukupnom povećanju mjerne točnosti sustava koja je zapravo ovisna o broju piksela u kameri, kvaliteti digitalizacije slike i kvaliteti projiciranog rasterskog uzorka.



Slika 26: Princip metode Gray koda

Problem rekonstrukcije apsolutnih faza (slika 27.) sada je zapravo sveden 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

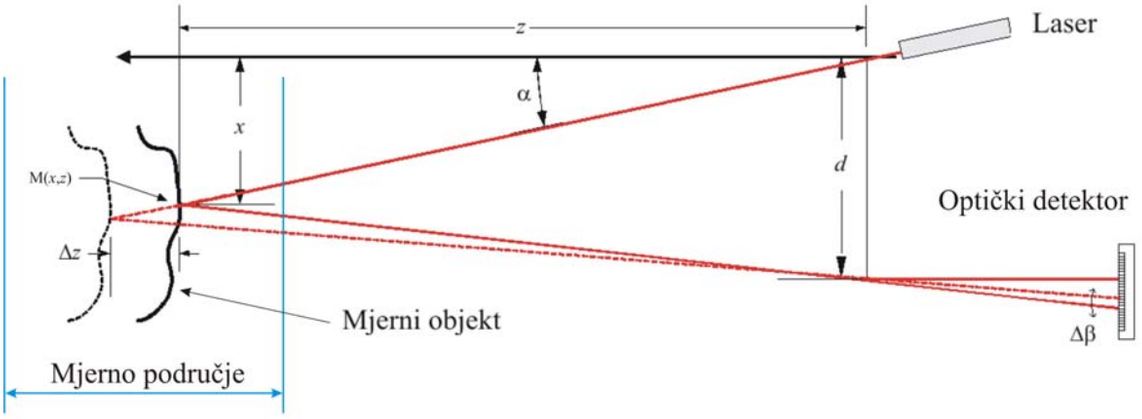
da je faza koja je pridružena pojedinom pikselu rekonstruirana neovisno o njegovom susjednom pikselu, smanjujući time utjecaj pogreške određivanja susjedih područja.



Slika 27. Parcijalne, stepenaste i apsolutne faze izračunate kombinacijom metode vremenskog faznog pomaka i metode Gray koda

4.2. Princip triangulacije projekcijom laserskog koherentnog svjetla

Osnovni princip ostvarivanja mjernog osjeta prilikom korištenja triangulacijskog laserskog sustava, te osnovni pojmovi koji su uvriježeni u teoriji laserskih triangulacijskih sustava biti će objašnjeni na primjeru projiciranja uskog točkastog laserskog koherentnog snopa [32].



Slika 28. Princip triangulacije

Prema slici 28, neka se ovaj idealizirani sustav sastoji od izvora svjetla, optičkog detektora i mjernog objekta. Optički detektor će radi pojednostavnjenja modela biti modeliran kao kamera sa idealnom lećom, kod koje se ne javlja utjecaj distorzije snimljene slike uslijed nesavršenosti optičkih elemenata objektiva.

Postava optičke osi detektora i izvora svjetla je konvergentna, te se relativni položaj izvora svjetla i optičkog detektora neće tijekom ovog simuliranog mjerenja mijenjati. Izvor svjetla i optički detektor leže u istoj ravnini i njihova su optička projekcijska središta razmaknuta na fiksnoj udaljenosti *d,* kojom je definirana osnovna geometrija ovog senzora (eng. *baseline*), tj. definirana je prva stranica trokuta.

U početnom trenutku mjerni objekt se nalazi na nepoznatoj predmetnoj udaljenosti *z* od osnovne linije senzora. Ova predmetna udaljenost mjernog objekta od mjernog senzora (eng. *Stand Off Distance*) uobičajeno se odabire tako da se optimalna fokusiranost projicirane zrake (mjerna točka na toj udaljenosti od mjernog senzora ima takav promjer u kojem je sadržano 90% projicirane svjetlosti) i optimalno vidno polje optičkog detektora poklapa sa područjem kojeg želimo digitalizirati na površini mjernog objekta. Drugi važan pojam, pojam mjernog područja senzora (eng. *Measurement Range*) je definiran kao ono područje udaljeno od bazne linije senzora za duljinu *z* (na predmetnoj udaljenosti od mjernog senzora), unutar kojega će senzor unutar očekivane mjerne nesigurnosti moći određivati položaj objektne mjerne točke. Primijećeno je da se pojmovi predmetna udaljenost i mjerno područje senzora u literaturi nerijetko zapravo pogrešno odnose samo na fizičku udaljenost senzora od mjernog objekta *z,* što je posljedica neujednačenosti i nestandardiziranosti terminologije na ovom području.

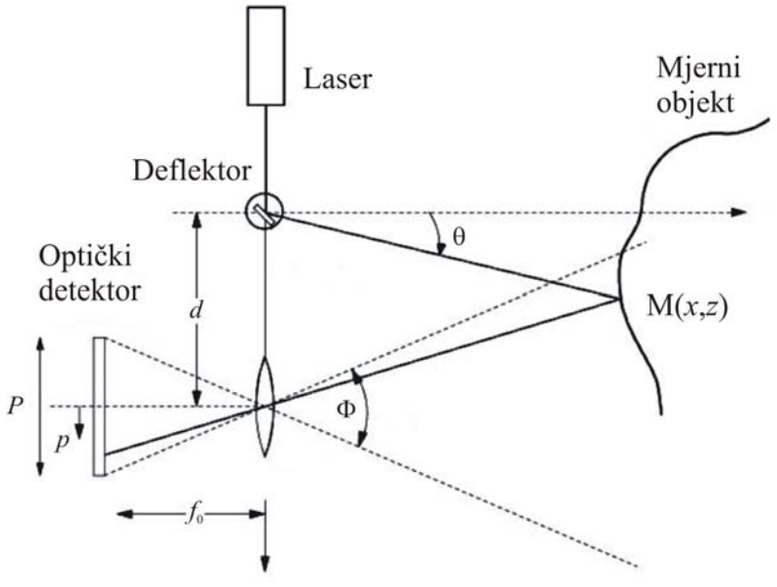
Po izlasku iz izvora, projicirana zraka koherentnog svjetla putuje po pravcu i udara u površinu mjernog objekta, gdje tvori svjetlosnu točku koja svojim položajem definira položaj

mjerne točke na površini mjernog objekta. Uz pretpostavku infinitezimalno uske projicirane zrake i podrazumijevanja ravninskog modela ovog senzora, koordinate projicirane točke biti će prema slici 28 u točki M(x,z). Optički detektor registrira pojavu točke na površini mjernog objekta na fotoosjetljivoj površini svoga optičkog senzora, te se preslikavanje položaja točke na mjernom objektu sa objekta na optičko osjetilo zbog idealiziranog modela leća vrši linearno po pravcu koji spaja projiciranu svjetlosnu točku na mjernom objektu sa projekcijskim središtem objektiva. Ukoliko dođe do relativnog pomaka mjernog objekta u odnosu na mjerni senzor za iznos Δz u smjeru prirasta koordinate z, reflektirana točka na mjernom objektu tvoriti će sa projekcijskim središtem leće pravac koji u odnosu na prethodni položaj objektne točke tvori kut $\Delta\beta$.

Navedena postava pokazuje da, ukoliko nije poznata geometrija optičkog senzora, nije moguće odrediti prostorni položaj mjerne točke zbog nepoznatog slikovnog položaja mjerne točke. Kada bi položaj slikovne točke bio poznat, tada bi bilo moguće izvršiti fiktivno projiciranje zrake kroz točke koje definiraju slikovnu koordinatu na optičkom detektoru i projekcijsko središte objektiva. U idealnom slučaju, ta bi se zraka presjekla sa projiciranom zrakom svjetla u točki određenoj koordinatama M(x,z) na površini mjernog objekta.

Stoga ćemo gornji pojednostavljeni model projekcijskog mjernog senzora proširiti uvođenjem optičkog osjetila poznate dužine P, koji se nalazi na udaljenosti f_0 od projekcijskog središta leće.

Prethodno opisani senzor omogućavao bi mjerenje položaja samo jedne točke na mjernom objektu. Uklanjanje ovog limita moguće je ili uvođenjem relativnog pomaka mjernog objekta ili kontroliranim pomakom projicirane laserske zrake. U slijedećem primjeru dopustiti ćemo zakret θ projicirane zrake. Kao što je vidljivo sa slike 29, svjetlo se iz laserskog izvora projicira na mjerni objekt prolaskom preko deflektorskog ogledala, kojim je moguće kontrolirano mijenjati njegovu putanju zakretom za kut θ. Sada je osnovna duljina d definirana kao spojnica projekcijskog središta i točke na ogledalu u kojoj se vrši otklon svjetla.



Slika 29. Postava osnovnog laserskog projekcijskog sustava

Prema [32] i slici 29, koordinate položaja objektne točke (x,z) na površini mjernog objekta u odnosu na osnovnu liniju mjernog senzora mogu se izraziti na temelju jednostavnih trigonometrijskih relacija u obliku:

$$z = \frac{df_0}{p + f_0 \tan(\theta)} \tag{4.7}$$

$$x = z \tan(\theta)\,, \tag{4.8}$$

gdje je p položaj točke na površini optičkog senzora, kut θ deflektorski kut projicirane zrake, a f_0 efektivna udaljenost između fotoosjetljive površine optičkog detektora i projekcijskog središta korištene leće. Vidno polje mjernog senzora pritom će ovisiti o žarišnoj duljini korištene optike te dimenzijama optičkog detektora:

$$\Phi = 2\tan^{-1}\left(\frac{P}{2f_0}\right) \quad , \tag{4.9}$$

gdje je P širina fotoosjetljive površine optičkog detektora.

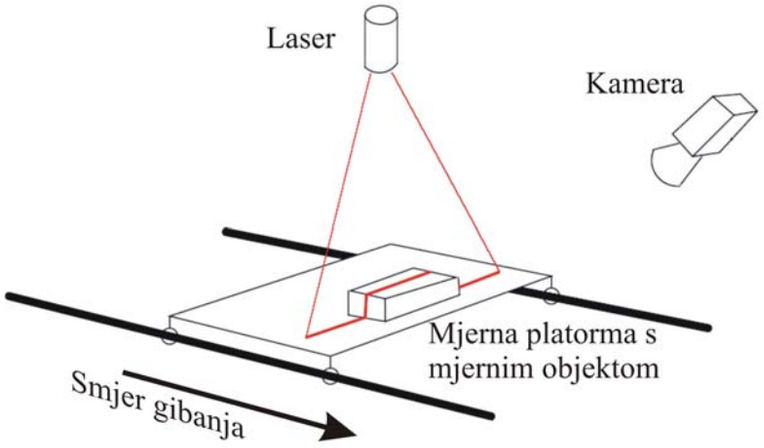
Preko zakona o propagaciji pogreške u [32] za prikazani je senzor aproksimirana standardna devijacija pogreške pri određivanju koordinate z kao funkcija od p;

$$\sigma_z \approx \frac{z^2}{f_0 d}\sigma_p \quad , \tag{4.10}$$

gdje je σ_p standardna devijacija pogreške u određivanju p, te je dakle standardna devijacija određivanja σ_z u ovom primjeru zapravo ekvivalent mjernoj nesigurnosti. Iz gornje jednadžbe proizlazi da je mjerna nesigurnost obrnuto proporcionalna razmaku izvora svjetla i projekcijskog centra objektiva, a da proporcionalno ovisi o kvadratu udaljenosti mjernog objekta od mjernog senzora. Iz jednadžbe 4.10 slijedi da, ukoliko bi se točnost senzora željela povećati uz očuvanje zadanog vidnog polja, bilo bi potrebno povećati duljinu baze d, te parametre optičkog senzora P i f_0 ili smanjiti predmetnu udaljenost z. Uvođenjem dodatne slobode gibanja u vidu sinhronizacije rotacije optičkog senzora sa deflektorskim ogledalom, postiže se povećanje točnosti užim vidnim poljem i većim dimenzijama senzora P, uz istovremeno skraćenje duljine osnovne linije senzora. Povećanjem dimenzija optičkog senzora (umjesto produljenja bazne linije d, što bi povećalo gabarite mjernog senzora), ostvaruje se kvalitetnija digitalizacija položaja projicirane točke. Zbog sinhroniziranog praćenja njenog položaja na mjernom objektu u vidnom polju nalazi se samo mjerna točka, koja stoga zauzima daleko veću površinu nego kod fiksne izvedbe kod koje je slikovni osjet za zadano vidno polje uvijek lokaliziran i u funkciji kuta θ.

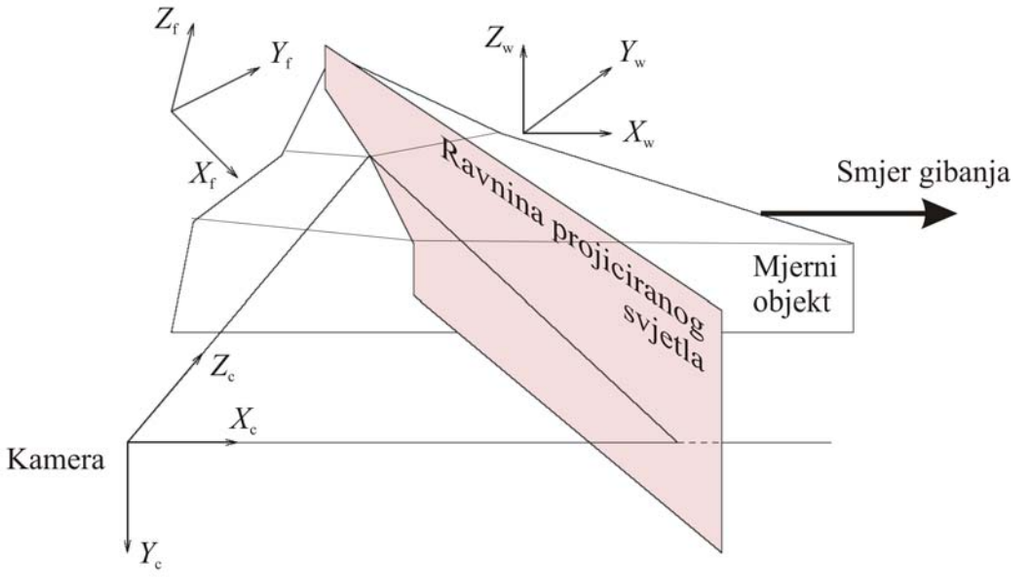
U prethodnom primjeru pretpostavljeno je poznavanje geometrijskih parametara razmaka optičkih elemenata (vanjski parametri orijentacije), te parametara korištene kamere i pripadajućih optičkih elemenata (unutrašnji parametri orijentacije), što u realnoj praksi nikada zapravo nije slučaj. Navedeni se nepoznati parametri uobičajeno određuju prethodno samim mjerenjem postupkom kalibracije mjernog sustava korištenjem kalibracijskih objekata poznate geometrije. Prema [32] radi se o kalibracijskom procesu kod kojeg se prvo određuju unutrašnji parametri kalibracije kamere, a potom vanjski parametri orijentacije kamere i

projektora projiciranjem laserskog snopa na kalibracijski objekt, te interpoliranjem ravnine metodom najmanjih kvadrata kroz tako dobivene mjerne točke. Ovakav postupak zapravo uzrokuje podjelu procesa kalibracije na dva dijela: prvo kalibraciju kamere, a potom i kalibraciju cijelog sustava, što prema [32] može rezultirati neoptimalnim određivanjem potrebnih kalibracijskih parametara. Takav koncept nerijetko zahtijeva i da kalibrirani sustav omogućuje snimanje slike mjernog objekta radi utvrđivanja raspodjele svjetloće. Mnogi realni laserski triangulacijski sistemi koriste intenzivno optičko filtriranje prilikom snimanja projicirane laserske zrake, tako da do optičkog senzora zapravo dolazi samo intenzitet svjetlosti iz refleksije projiciranog laserskog snopa bez informacije o intenzitetu svjetlosti površine na koju je zraka projicirana. U daljnjem tekstu biti će prikazana nelinearna metoda modeliranja matematičkog modela kamere koja sadržava i parametre radijalne distorzije korištenog objektiva [35,36].



Slika 30. Shematski prikaz postave mjernog senzora

Slikom 30. prikazan je postav odabranog mjernog sustava, koji se sastoji od laserskog izvora svjetla koji služi kao izvor svjetlosne plohe, te kamere unutar čijeg se vidnog polja dešava mjerni efekt. Relativni pomak mjernog objekta u odnosu na statičku konfiguraciju mjernog senzora vrši se kontroliranim translatornim pomakom mjerne platforme. Optički sustav je tako postavljen da se projicirana linija na površini mjernog objekta vidi kao vertikalna linija na snimljenoj slici. Gibanje mjernog objekta vrši se paralelno sa osnovnom linije senzora, kao što je to definirano u prethodnom primjeru.



Slika 31. Definicija koordinatnih sustava

Da bi se unutrašnji i vanjski parametri orijentacije kamere mogli dovesti u vezu sa položajem projicirane linije na snimljenoj slici, te objektnim koordinatama na površini mjernog objekta, definicija trenutnih položaja i orijentacije koordinatnih sustava koji će biti korišteni prilikom izvoda ovog modela prikazana je slikom 31. Indeksom *w* označen je prostorni koordinatni sustav koji se kreće zajedno sa mjernim objektom, indeks *f* odnosi se na prostorni koordinatni sustav fiksiran u odnosu na mjerni senzor ,dok je indeksom *c* označen koordinatni sustav u odnosu na kameru.
Neka su sa $\mathbf{x}_w$ definirane koordinate objektne točke na površini objekta koji mjerimo, relativno u odnosu na koordinatni sustav koji se giba zajedno sa mjernim objektom, a sa $\mathbf{x}_f$ relativno u odnosu na koordinatni sustav mjernog sustava među kojima postoji veza u obliku

$$\mathbf{x}_w = \mathbf{x}_f + t\Delta\mathbf{m} \quad , \tag{4.11}$$

gdje je *t* broj trenutne pozicije (slike) koji odgovara vremenskom pomaku za iznos pomaka mjerne platforme Δ u smjeru vektora ***m***. Veza između koordinatnih sustava mjernog senzora i kamere opisana je rotacijom **R** i translacijom **t** u obliku:

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{R}\mathbf{x}_f + \mathbf{t} \quad . \tag{4.12}$$

Model kamere sadrži nelinearnu komponentu kojom se modelira radijalna distorzija.

Transformacija iz prostornog koordinatnog sustava kamere u nedistordirani koordinatni sustav slike dana je izrazima

$$x_u = \frac{x_c}{z_c} \ , \ y_u = \frac{y_c}{z_c} \quad . \tag{4.13}$$

Veza između distorzirane i nedistorzirane ravnine slike prikazana je izrazom

$$\mathbf{x}_u = (1 + K_1(x_d^2 + y_d^2))\mathbf{x}_d \quad , \tag{4.14}$$

gdje je K_1 koeficijent radijalne distorzije. Slikovne koordinate su dane u obliku

$$x_i = \begin{bmatrix} s_x & k \\ 0 & s_y \end{bmatrix} x_d + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad . \tag{4.15}$$

Svjetlosna fronta projicirana iz laserskog izvora svjetla tvori plohu svjetla. Položaj ravnine zadan je normalom i vektorom pomaka iz ishodišta koordinatnog sustava u obliku

$$\mathbf{n}_f^T \mathbf{x}_f + d_f = 0 \quad . \tag{4.16}$$

Projekcija plohe svjetla stvara uređene parove točaka na površini, koje možemo opisati sa ($\mathbf{x}_i$,t), a služe za izračun položaja $\mathbf{x}_w$. Raspišemo li jednadžbu (4.15) u obliku

$$\mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_x} & \frac{-k}{s_x s_y} \\ 0 & \frac{1}{s_y} \end{bmatrix} (\mathbf{x}_i - \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix}) \quad , \tag{4.17}$$

tada možemo iz jednadžbe (4.14) izračunati $\mathbf{x}_u$, pa se $\mathbf{x}_c$ može izraziti ovisno o nepoznatom z_c kao

$$x_c = z_c \begin{bmatrix} x_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad . \tag{4.18}$$

Supstitucijom u (4.12) $$x_f = z_c \mathbf{A} - \mathbf{B} \quad , \tag{4.19}$$

gdje su $$\mathbf{A} = \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} \mathbf{x}_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \mathbf{B} = \mathbf{R}^T t \ . \tag{4.20}$$

Daljnjom supstitucijom u (4.16) proizlazi $$z_c = \frac{\mathbf{n}_f^T \mathbf{B} - d_f}{\mathbf{n}_f^T \mathbf{A}} \ . \tag{4.21}$$

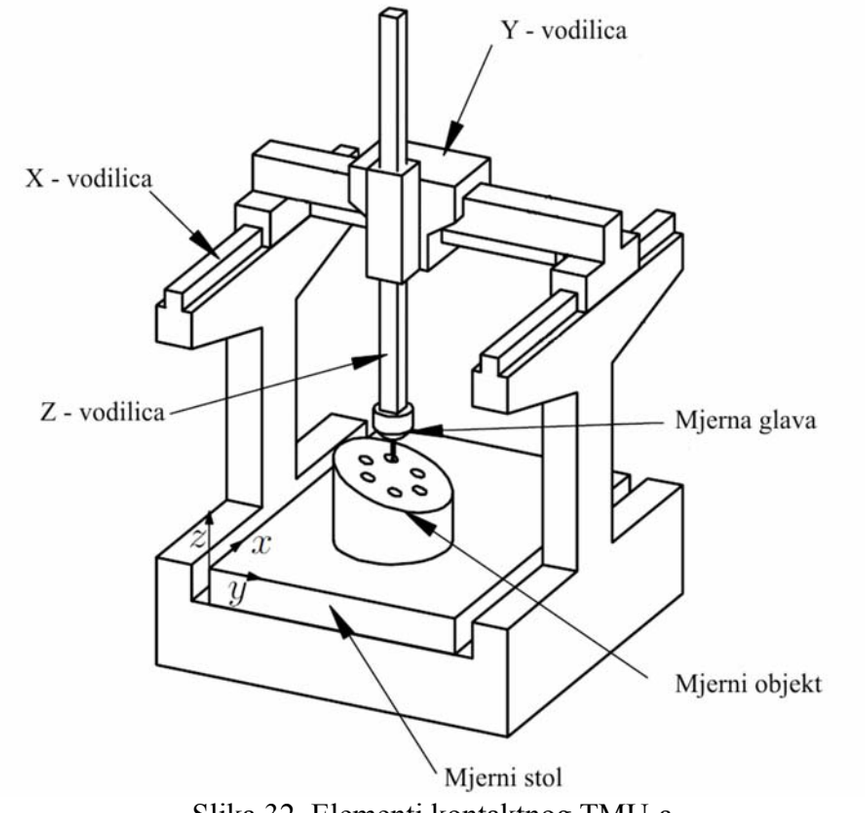
Nakon što je na opisani način izračunato $\mathbf{x}_f$, prostorne koordinate objektne točke $\mathbf{x}_w$ mogu se direktno izračunati iz jednadžbe (4.11).

4.3. Princip djelovanja kontaktnih TMU

Zanimljivo je na ovom mjestu primijetiti da se unatoč dugoj tradiciji razvoja kontaktnih TMU, koji neprekidno traje još od početka šezdesetih godina prošlog stoljeća, tijekom vremena zadržao početni koncept mjernog principa koji je u širem smislu neovisan o konstrukcijskoj izvedbi pojedinog mjernog senzora.

Temeljni je mjerni princip kod svih današnjih varijanti konstrukcijskih izvedaba kontaktnih TMU (slika 32.) u osnovi isti [10,37] i zapravo imitira slobodan dodir površine mjernog objekta ljudskom rukom. Kako se koordinate pojedine mjerne točke određuju direktnim kontaktom glave mjernog senzora koja nosi ticalo (pandan prsta) sa površinom mjernog objekta, prikladna konstrukcija mjernog uređaja (pandan ljudske ruke) osigurava dovoljan broj stupnjeva slobode gibanja mjerne glave, te odgovarajuću krutost konstrukcije mjernog uređaja. Tako bi se postigla očekivana točnost vođenja mjerne glave, a time i točnost mjerenja neovisno o položaju predmeta mjerenja unutar mjernog volumena mjernog uređaja i u svim stupnjevima slobode za koje je dopušteno gibanje mjerne glave.

Iz navedenog izravno proizlazi da se kontaktni TMU zapravo može poopćeno promatrati kao materijalizirani kruti prostorni koordinatni sustav, u odnosu na kojeg se preko položaja kontaktne mjerne glave i pripadajućeg ticala relativno u prostoru definira prostorni položaj mjerne točke sa površine mjernog objekta.



Slika 32. Elementi kontaktnog TMU-a

Konstrukcijske izvedbe gibljivih elemenata vodilica okvira (slika 6.) ovog materijaliziranog koordinatnog sustava, zajedno sa izvedbom mjernog stola za prihvat predmeta mjerenja,

definiraju ukupan iskoristivi mjerni volumen i njegovu krutost, a time i postignutu razlučivost u ovisnosti o prostornom položaju ticala unutar mjernog volumena [37]. Iznosi relativnog pomaka mjernog ticala u odnosu na okvir TMU-a, a uzduž izvedbom dozvoljenih stupnjeva slobode gibanja, određuju se pomoću digitalnih optičko-električnih mjernih sustava visoke razlučivosti i točnosti. Jednoznačna definicija položaja mjerne točke ostvaruje se prilikom izravnog dodira glave kontaktnog ticala sa površinom mjernog objekta, gdje uslijed međudjelovanja dvaju tijela u dodiru dolazi do trenutačnog otklona ticala i do očitavanja prostornog položaja dodirne točke u odnosu na trenutni referentni koordinatni sustav TMU-a. Slijednim doticanjem površine mjernog objekta u onim točkama koje svojim prostornim rasporedom omogućuju ispravno određivanje osnovne geometrije mjernog objekta, digitalizira se oblak točaka koje se naknadnom računalnom analizom interpretiraju s ciljem izračunavanja oblika, dimenzija i položaja pojedinih površinskih artefakata mjernog objekta.

Koordinatni sustav mjernog uređaja pritom se definira relativno u odnosu na sam mjerni uređaj, a ne na mjerni objekt. Stoga je potrebno na prikladan način dovesti u vezu relativan položaj mjernog objekta čije je dimenzije potrebno izmjeriti u koordinatnom sustavu vezanom uz sam predmet mjerenja (koordinatni sustav tehničkog crteža), sa koordinatnim sustavom TMU. Do trenutka uvođenja računala za izvršavanje zadaća upravljanja procesom mjerenja, radilo se o iscrpljujućem postupku dovođenja pripadajućih koordinatnih osi u međusobno paralelan položaj (eliminacija rotacije koordinatnog sustava mjernog objekta). Uvođenjem računala ovaj je korak postao nepotreban, budući da je sada sve transformacije moguće naknadno numerički provesti prilikom analize digitaliziranih podataka.

Kao što je to tijekom razvoja mehaničkih elemenata bio slučaj sa njihovim osnovnim mehaničkim konceptima, tako se ni sam mjerni ciklus TMU nije mnogo promijenio, te se prema [37] sastoji od:

- postupka kalibracije dinamičkog promjera mjernog ticala primjenom kalibracijske kugle i njegovog relativnog položaja u odnosu na referentnu točku mjerne glave, što omogućuje automatsku kompenzaciju prilikom određivanja položaja kontaktne točke za različite oblike i položaje vrška ticala tijekom samog mjerenja,
- određivanja položaja predmeta mjerenja (dovođenja u vezu njegovog lokalnog koordinatnog sustava sa globalnim koordinatnim sustavom TMU),
- doticanja površine mjernog objekta radi akvizicije položaja mjernih točaka,
- izračunavanja i prikaza rezultata mjerenja u lokalnom koordinatnom sustavu predmeta mjerenja.

Generalni opis principa djelovanja TMU-a praktički završava sa do sada navedenim, a radi razumijevanja funkcionalnosti pojedinih elemenata koji tvore sustav kontaktne TMU, u nastavku će se dati kratki prikaz elemenata mehaničke strukture TMU-a, elemenata i principa funkcioniranja mjernog sustava, opisati konstrukcije i principi djelovanja mjernih glava, te definirati utjecaj upravljačke jedinice i programske podrške na djelovanje TMU.

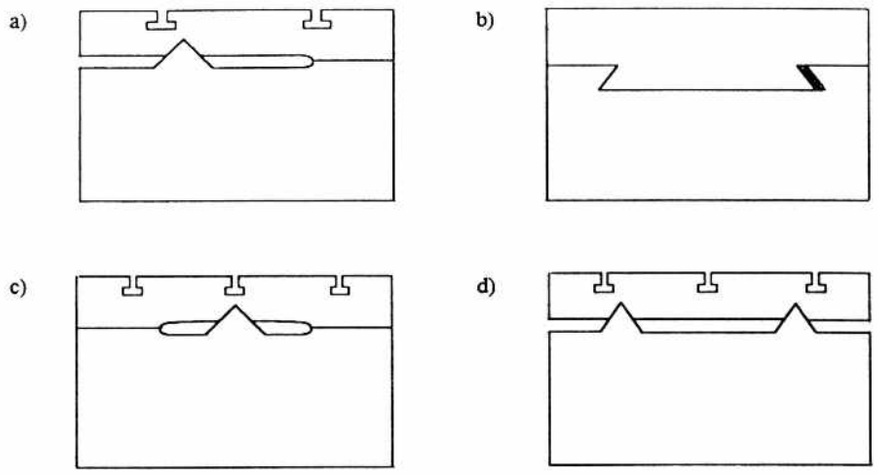
4.3.1. Mehanička struktura

Već je prije spomenuto da se konstrukcija kontaktnih TMU-a može pojednostavljeno promatrati kao materijalizirani koordinatni mjerni sustav koji se sastoji od pomičnih elemenata koji omogućuju pristup mjerne glave površini mjernog objekta. Shematski princip

stupnjeva slobode gibanja je za konzolne, portalne, mostne i stupne izvedbe TMU-a prikazan slikom 9.

Kako bi se ostvarila očekivana mjerna nesigurnost, mehanička struktura TMU-a treba ispunjavati zahtjev za precizno, točno i ponovljivo vođenje, te mjerenje trenutnog položaja translacijskih i rotacijskih dijelova relativno u odnosu na njihov pojedinačni prethodni referentni položaj. Navedeno zahtijeva proizvodnju sastavnih elemenata TMU-a sa visokom točnosti izrade i sastavljanja, dimenzionalnu postojanost pokretnih dijelova i dijelova u dodiru, krutost konstrukcije, povoljna dinamička svojstva, temperaturnu stabilnost i sl.

Prema [37], kod sustava TMU manjih dimenzija i visoke točnosti primjenjuju se klasični načini vođenja, čiji su presjeci vodilica ilustrirani slikom 33.



Slika 33. Izvedbe vodilica kod TMU: a) kombinacija ravne i v-vodilice, b) lastin rep, c)središnja v-vodilica, d) dvostruka v-vodilica

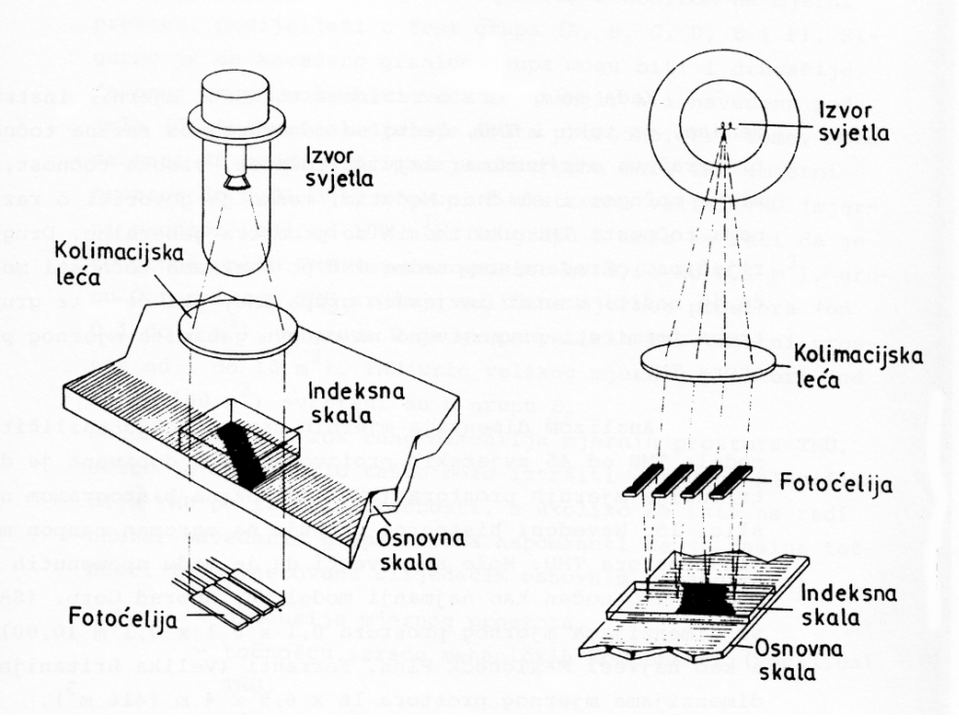
Osim gore navedenih izvedbi vodilica, danas su u široj upotrebi i vodilice sa zračnim ležajevima koje za pomak mosta koristi i u ovom radu korišteni TMU Ferranti Merlin 750.

4.3.2. Mjerni sustav

Pretpostavimo li da je za pozicioniranje vrška kontaktnog ticala neke izvedbe TMU-a dovoljno omogućiti tri stupnja slobode gibanja (npr. tri translacijska gibanja elemenata konstrukcije u pravcima osnovnih koordinatnih osi prema slici 32), tada će za određivanje komponenata svake od translacija biti potrebna tri zasebna mjerna uređaja. Iz navedenog bi se moglo pogrešno zaključiti da će ukupna prostorna rezolucija i mjerna nesigurnost ovog zamišljenog kontaktnog TMU-a izravno ovisiti o razini točnosti i rezoluciji mjernih uređaja ugrađenih u njegovu konstrukciju. Da bi se mogla dati ukupna procjena točnosti mjernog sustava kontaktnog TMU-a, potrebno je provesti analizu utjecaja unutrašnjih i vanjskih parametara u različitim pogonskim uvjetima (diskutirano u poglavlju 5).

Kod kontaktnih TMU-a, u svrhu mjerenja translacijskog pomaka elemenata TMU-a, u širokoj su upotrebi optički interferencijski mjerni uređaji koji informaciju o trenutnoj

relativnoj promjeni položaja skale i optičkog senzora kodiraju preko pomaka interferencijskih linija (Moire efekt). Principijelno se prema slici 34. [10] ovi uređaji sastoje od izvora svjetla i fotoćelije, između kojih se postavljaju dvije prozirne skale sa gustom strukturom paralelnih linija, okomite na smjer gibanja. Jedna se skala izravno pričvršćuje na pomični, a druga na nepomični referentni element mehaničke strukture. Prilikom međusobnog relativnog pomaka dolazi do pojave interferencijskih pruga čija je faza proporcionalna relativnom pomaku optičkih mjernih skala. Posljedica je da mjerenja provedena opisanim mjernim uređajima ne pružaju informaciju o apsolutnom položaju, već o relativnom pomaku u odnosu na prethodni položaj, što je dovoljno za određivanje položaja mjerne točke, ukoliko je prethodno bio nedvosmisleno definiran položaj koordinatnog sustava mjernog uređaja i kalibrirano ticalo. Osim transmisijskih izvedbi ovih mjernih sustava, u primjeni se nalaze i refleksijske varijante, pri čemu je razlika u tome da je osnovna mjerna skala izvedena od refleksnog, a indeksna od transparentnog materijala (slika 34.a). Sukladno tome, promijenjen je položaj fotoćelije (slika 34.b.).



a) b)

Slika 34: Shema a) transmisijskog i b) refleksijskog mjernog sustava

4.3.3. Mjerna glava

Mjerne glave kao nosači kontaktnih ticala, te izravni osjetnici mjerne informacije, prema [37] predstavljaju cjelovite podsustave u okvirima sustava TMU, s kojima završava mjerni lanac TMU-a i preko kojeg se uspostavlja kontakt s površinom koja se mjeri.

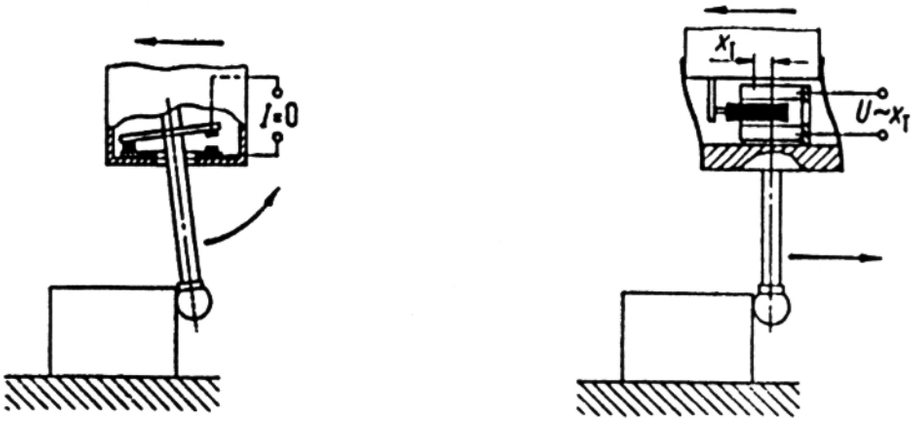
Tako danas u širokoj mjernoj upotrebi nalazimo kontaktne i beskontaktne mjerne glave, od kojih kontaktne obično funkcioniraju na principu okidača (tzv. trigger glave) i analogne (proporcionalne) mjerne glave koje mjere otklon ticala za vrijeme kontakta, slika 35.

- Kod "trigger" izvedbi mjernih glava, signal u trenutku ostvarenog kontakta vrha ticala s površinom mjernog objekta ostvaruje se preko otklona unutrašnjih kontakta na koje je oslonjen korijen ticala,
- a kod analognih glava informacija o trenutku uspostave kontakta sa površinom mjernog objekta ostvaruje se induktivnim davačima ili optičkim sustavima sličnim prethodno opisanim mjernim sustavima TMU.

Osnovni problem prilikom provođenja kontaktnog mjerenja je određivanje trenutka dodira ticala sa površinom mjernog objekta, kao i trenutka očitanja položaja mjerne točke. Kako je vrijeme ostvarivanja kontakta zapravo iznimno kratko, već i pri relativno malim brzinama pomaka mjerne glave na mjestu dodira javiti će se velike kontaktne sile [38] koje mogu prouzrokovati lokalno odskakanje vrha ticala od površine mjernog objekta. Stoga je važno da mjerne glave konstrukcijski omogućuju ostvarivanje mjernog osjeta upravo u trenutku dodira, prije nego što dođe do odvajanja vrha ticala i površine mjernog objekta.
Problem definicije trenutka kontakta koji se pritom javlja, tj. razlučivanja pravih kontakata sa mjernom površinom od efekata nastalih uslijed vibracija i dinamičke promjene smjera i brzine gibanja, rješava se praćenjem iznosa sile ostvarenog kontakta, kao i mjerenjem vremena trajanja samog kontakta.

Kako su mehanički sustavi za vođenje redovito mase nekoliko stotina puta veće od mase samog ticala, potrebno je i izvjesno vrijeme za njihovo zaustavljanje. Kako prilikom kontakta ne bi došlo do deformacije mjernog objekta, oštećenja ticala ili samog TMU-a, potrebno je dopustiti izvjesnu deformaciju samog tijela ticala.

Nakon što je sustav ispravno prepoznao trenutak dodira i nakon što je izvršeno mjerenje, potrebno je pomaknuti mjernu glavu u novu poziciju. To pretpostavlja da će se otklon mjernog ticala koji se desio za vrijeme kontakta poništiti i da će se ticalo vratiti u relativan položaj u odnosu na mjernu glavu kao što je bio prije dodira. Ova sposobnost određuje vrijeme potrebno za smirivanje ticala, kako bi se mogao ostvariti slijedeći kontakt i omogućiti mjerenje primjerice cilindričnih oblika.



Slika 35. Princip djelovanja "trigger" i analogne mjerne glave

Osim opisane funkcionalne podjele prema načinu detektiranja kontakta ticala sa površinom, danas postoje i izvedbe kontaktnih glava koje omogućuju kontroliranu rotaciju glave i ticala preko električnih servomotora, kako bi se omogućila što povoljnija prilagodba relativnog

položaja i smjera ticanja vrha ticala geometriji mjernog objekta i ostvario kontakt iz smjera povoljnog za očuvanje očekivane mjerne nesigurnosti korištenog TMU-a.
Opisani problemi koje je potrebno prikladnom konstrukcijom kontaktnog ticala uzeti u obzir uspješno su izbjegnuti korištenjem beskontaktnih mjernih glava. Radi se zapravo o hibridnoj sprezi mjernih okvira kontaktnih TMU-a i beskontaktnih aktivnih mjernih senzora koji zamjenjuju kontaktne mjerne glave, te za digitalizaciju koordinate mjerne točke na površini mjernog objekta koriste optičke principe triangulacije, refleksije, defokusiranja i sl. [37].

4.3.4. Upravljačka jedinica i programska podrška

Sustav za upravljanje u širem smislu predstavlja programski sustav koji objedinjuje funkcionalnost svih elemenata konstrukcije TMU-a, te time zapravo omogućava kontrolirani pomak strukturnih elemenata, mjerne glave, mjernih uređaja za kontrolu položaja elemenata TMU, vrši razmjenu podataka i sl. U užem smislu, pod sustavom za upravljanje misli se na kontrolirano prostorno pomicanje mjerne glave [37] i to na: upravljanje točka-točka, pomak ticala po kontinuiranoj putanji ili vektorski pomak pri automatskom ponavljanju mjerenja. Potrebna programska podrška [37] sastoji se od osnovnog softvera (kalibracija sustava, transformacija koordinatnih sustava, određivanje položaja orijentacije i dimenzija osnovnih geometrijskih formi i softvera za analizu odstupanja), softvera za programiranje (on-line i off-line programiranje, CAD programiranje), postmjernog softvera za interpretaciju rezultata mjerenja, kao i softvera za provedbu specifičnih mjernih zadataka.

4.3.5. Pogonski sustav

Pogonski sustavi služe za kontrolirano pomicanje elemenata mehaničke strukture duž vodilica, rotaciju mjerne ploče (ukoliko postoji), te promjenu položaja mjerne glave ili njihove zamjene tijekom procesa mjerenja. Najčešće su za translatorni pomak elemenata vodilica u uporabi pneumatski pogoni, dok se električni servo motori koriste za promjenu otklona kontaktnog ticala. Postoje i izvedbe TMU-a koje dopuštaju da mjeritelj vrši pozicioniranje mjerne glave manualnim pomakom.

5. TEMELJI USPOREDBE MJERNIH SUSTAVA

Uspješna provedba svakog mjernog zadatka ovisiti će o velikom broju utjecajnih parametara [39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50], koje uslijed nepoznavanja svih teoretskih aspekta mjerne metode, kao ni svih izvora pogrešaka za trenutnu mjernu zadaću uz prethodno odabrani mjerni senzor nije moguće jednoznačno definirati prilikom planiranja mjerne zadaće, kao niti samim postupkom mjerenja uzeti u obzir. Stoga bi naivno bilo očekivati da već postoji ili da će u dogledno vrijeme postojati neka mjerna metoda koja će u općenitom slučaju predstavljati idealnu metodu za prostorno digitaliziranje općenitih trodimenzionalnih mjernih objekata. Isticanje neke od ovdje promatranih metoda u tom smislu nije niti cilj u ovom radu, već će se u krugu očekivanih realnih mjernih problema pokazati relativne mogućnosti odabranih mjernih metoda, i ukazati na njihove stvarne mogućnosti, limite i ograničenja. Na temelju stečenih spoznaja projicirati će se daljnji smjer razvoja.

Sa dovoljnom poopćenošću može se reći da danas, za većinu mjernih problema, mjerna točnost postiziva sa postojećim mjernim senzorima zadovoljava mjerne potrebe s obzirom na uvjet kvalitete određivanja položaja pojedine mjerne točke [21]. Imajući to u vidu, treba napomenuti da se zapravo 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. U istom smislu, 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, sa ostvarenom zahtijevanom točnošću određivanja mjerne točke, kao i postignutog relativnog prostornog rasporeda i gustoće izmjerenog oblaka točaka po kompletnom mjernom volumenu.

Sustavi koji se analiziraju u ovom radu bazirani su na tehnologijama od kojih neke imaju principijelno slične korijene kao npr. projekcijske metode preko izvora svjetla i triangulacije, tj. preko načina definiranja mjerne točke kod aktivnih kontaktnih i bezkontaktnih metoda, ali se značajno razlikuju u svojim konačnim izvedbama. Upravo stoga, svaka će mjerna metoda neumitno 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.).

Kroz analizu vanjskih i unutrašnjih utjecajnih faktora koji utječu na točnost i pouzdanost pojedine mjerne metode postaviti će se temelji relativne ocjene svake od analiziranih metoda na trenutno u Hrvatskoj dostupnim komercijalnim mjernim senzorima, s težištem na slijedećim karakteristikama: razini očekivane i postignute točnosti, području i uvjetima primjene pojedinog mjernog sustava, dimenzijama mjernog volumena, prostornoj rezoluciji, mogućnosti akvizicije kompletnog mjernog volumena, prostornoj i međusobno relativnoj raspodjeli mjernih točaka s obzirom na potrebe naknadne analize rezultata mjerenja, potrebi

predznanja o geometrijskim karakteristikama mjernog objekta, (vezano za planiranje mjerenog postupka), te ostvarenom stupnju automatiziranosti, ergonomičnosti i ekonomičnosti metode. Sukladno navedenome, osim idealiziranih matematičkih modela navedenih metoda, u analizi usporedbe 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* podrazumijevati će 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.

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

5.1. 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 sa odabranim mjernim uređajem ostvariti. Točnost pronalaženja pojedine mjerne točke ovisiti 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 dvaju ili više istovrsnih mjernih senzora baziranih na istim tehnološkim principima [10], problem usporedbe senzora 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. Tako je moguće već i na osnovi iscrpne teoretske i eksperimentalne analize uzroka pogrešaka kod jednog od odabranih komercijalnih mjernih sustava napraviti paralelnu relativnu ocjenu drugog, izvedbeno i principijelno sličnog mjernog sustava. Problem komparativne analize mjernih sustava za digitalizaciju prostornih koordinata mjernih točaka javlja se prilikom potrebe međusobne usporedbe raznorodnih mjernih sustava primijenjenih na istu mjernu zadaću, u slučaju da se za definiciju mjerne točke koriste metode koje nisu temeljene na zajedničkim principima definiranja mjerne točke. Ovdje se radi o aktivnim mjernim metodama temeljenim na direktnom fizičkom kontaktu, tj. beskontaktnim aktivnim mjernim metodama koje mjernu točku na mjernom objektu definiraju posredno, preko projiciranja neke vrste svjetlosnog rastera.

Uvjet postizive točnosti kod mjernih sustava temeljenih na principijelno raznorodnim tehnologijama na prvi pogled predstavlja idealan parametar za usporedbu, jer je konačni

rezultat mjerenja pomoću svake od ovdje promatranih metoda zapravo oblak točaka u prostoru koji u tim mjernim točkama predstavlja diskretiziranu prostornu površinu mjernog objekta. Međutim, sam prostorni karakter promatranih 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 postizive 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.

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

5.1.2. 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 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 [10]. Prema istom izvoru uobičajeni način procjenjivanja veličine utjecaja karakteristika predmeta mjerenja kod kontaktnih TMU-a, 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 sa visokom ponovljivošću, a da istovremeno netočnost uvjetovana nekim od karakteristika ostane neregistrirana. Time 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 ostaje nedefinirana.

Budući da se prilikom ovog istraživanja pokazalo da navedena interakcija mjernog objekta sa mjernim senzorom u području kontaktnih i projekcijskih mjernih senzora u vanjskom smislu nije odgovarajuće pokrivena literaturom, u ovom poglavlju dati će se prikaz i kratka diskusija svih onih utjecajnih faktora koje je s obzirom na interakciju mjernog objekta i mjernog senzora potrebno prilikom odabira mjerne metode, planiranja te provođenja samog procesa mjerenja uzeti u obzir, a koje se mogu 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 senzora.

- **Geometrijske karakteristike mjernog objekta**

Pod terminom *geometrijske karakteristike* ovdje će se podrazumijevati svi oni utjecaji predmeta mjerenja na planiranje, kao i sam postupak mjerenja, koji su 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. Kao što je već u poglavlju 2.2.2 prikazano, ograničenje ukupnog mjernog volumena kod kontaktnih TMU-a je u izravnoj vezi sa primijenjenim konstrukcijskim rješenjem TMU-a, dok projekcijske aktivne mjerne metode definiraju mjerni volumen u užem smislu kao funkciju korištenog mjernog senzora, a u širem smislu preko mogućnosti povezivanja zasebnih mjerenja u jedno.Za ukupni se mjerni volumen kod projekcijskih postupaka 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. Ukoliko bi uslijed konstrukcijskih rješenja prilikom transporta došlo do promijene 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), s obzirom na geometrijske karakteristike mjernog objekta, prednost će dakako imati ona metoda koja omogućuje transport mjernog senzora na lokaciju mjerenja, te mjerenje bez demontaže. Kontaktni mjerni senzori su zbog svojih gabarita i konstrukcije koja zahtjeva iznimno kruto temeljenje i visoku točnost sklapanja sastavnih dijelova, kao i velikog broja unutrašnjih faktora koji utječu na mjernu nesigurnost, izrazito neprikladni za transport samog mjernog sustava, dok su istovremeno projekcijski sustavi zbog svoje kompaktnosti u principu prikladni za transport na lokaciju mjerenja.

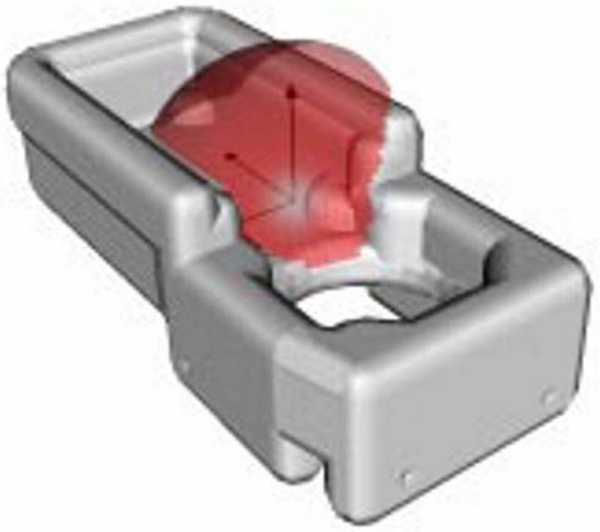
Pretpostavimo nadalje situaciju u kojoj je za zadane gabarite mjernog objekta odabran odgovarajući mjerni senzor te zadovoljavajuće riješen problem transporta. Sljedeći problem je rješavanje načina prihvata mjernog objekta [14] kako bi se tijekom mjerenja omogućila jednoznačna relativna orijentacija predmeta mjerenja i mjernog sustava, tj. jednoznačno definirala veza između koordinatnog sustava mjernog objekta i koordinatnog sustava mjernog senzora. Izvedbe mjernih senzora s obzirom na dimenzije, kao i masu mjernog objekta, trebaju omogućiti što jednostavnije pozicioniranje mjernog objekta unutar iskoristivog mjernog volumena odabranog mjernog senzora (vezano uz problem transporta), na način da se eventualne deformacije uslijed koncentracije ili neravnomjerne raspodjele mase mjernog objekta preko adekvatnih konstrukcijskih rješenja prenesu na okoliš. Već spomenute kontaktne TMU-e koriste fiksne ili pomične mjerne klupe relativno na koje se izvodi prihvat mjernog objekta, koje pritom čine cjelovitu mjernu strukturu sa ostatkom konstrukcije. Ukoliko se registracija trenutnih koordinatnih sustava kod projekcijskih mjernih sustava vrši upotrebom pasivnih markacija, prihvat mjernog objekta neće biti izravno vezan uz geometriju mjernog senzora. Posljedica toga je neovisnost utjecaja mase i dimenzija mjernog objekta na konstrukciju mjernog senzora. Međutim, ukoliko se veza između kooordinatnih sustava mjernog sustava i objekta ostvaruje kontroliranim translatornim ili rotacijskim pomakom mjernog objekta relativno u odnosu na mjerni senzor, o ukupnim gabaritima i masi mjernog objekta ovisiti će mogućnost prihvata i manipulacije mjernim objektom (potrebno je primijetiti da se prilikom translacijskog i rotacijskog gibanja javljaju dinamičke pojave [51] ubrzavanja i zaustavljanja masa, kao i rotacijska gibanja sa pojavom normalnih i tangencijalnih komponenata ubrzanja).

Slijedi potreba odabira pogonskih parametara odabrane metode, tako da se s obzirom na njegove ukupne gabarite i površinske artefakte promatranog mjernog objekta odrede optimalni pogonski parametri odabranog mjernog sustava. Kod kontaktnih TMU-a radi se o odabiru položaja globalnog koordinatnog sustava, kao i mjerne glave i kontaktnih ticala, koji će svojom geometrijom uz zadovoljenje unutrašnjih parametara omogućiti digitalizaciju odabranog mjernog objekta. Projekcijski sustavi u tom smislu, s obzirom na gabarite mjernog objekta zahtijevaju definiranje geometrije optičkih elemenata, njihovog međusobnog razmaka i orijentacije. O navedenim parametrima ovisiti će vrijeme potrebno za digitalizaciju željenih objektnih karakteristika, te samim time i raspored i prostorna rezolucija točaka u digitaliziranom oblaku.

Utjecaj površinske geometrije u izravnoj je vezi sa 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 na način da se u smislu definicije zamjenske geometrije optimira putanja alata i smjer kontakta kod kontaktnih TMU-a. S obzirom na način definicije mjerne točke definiraju se položaji relativnih orijentacija projekcijskih senzora. Planiranjem 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
Mjerna glava kontaktnih TMU-a ima izvjesnu geometriju za koju je potrebno osigurati takvu pristupnu putanju da prilikom postavljanja u mjerni položaj ne dođe do sudara onih dijelova

glave ili ticala s mjernim objektom koji nisu predviđeni za ostvarivanje kontakta (npr. vrat ili baza ticala). To se u literaturi rješava principom pristupnog konusa (eng. *accessibility cone*) [52,53,54], kojim se uz uvođenje izvjesnih pojednostavljenja (diskretizaciju ticala i mjerne glave) definiraju svi oni vektori iz kojih je za promatranu točku na mjernom objektu moguć pristup ticalom poznate geometrije, slika 36. Pritom je kod planiranja napadne putanje potrebno uzeti u obzir utjecaj smjera ticanja u odnosu na ostvarenu silu kontakta, te dinamičke efekte gibanja, smisao uzastopnih dodira, kao i težnju za minimizacijom ukupne putanje ticala nužne za digitalizaciju zadanog problema. Nedostatak ovog načina je planiranje putanje što za numeričku analizu položaja i orijentacije pristupnog konusa zahtijeva prethodno postojanje prostornog CAD modela promatranog mjernog objekta, te stoga nije prikladan prilikom digitalizacije predmeta dotad nepoznate geometrije.



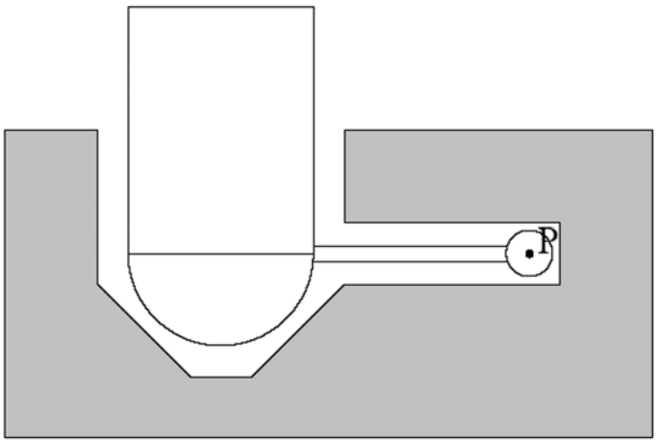
Slika 36. Princip pristupnog konusa

Kod projekcijskih senzora, zbog njihovog beskontaktnog karaktera, te značajno većeg trenutnog mjernog volumena od kontaktnih TMU-a, problem optimizacije pristupa je zapravo 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 potrebano 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 načina definicije mjerne točke.

Dostupnost

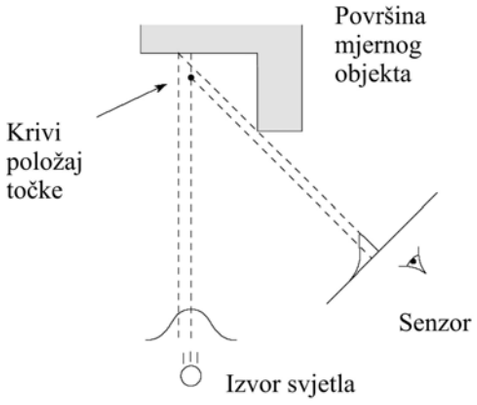
Dostupna [52] je svaka ona točka na mjernom objektu kojoj je sa zadanom geometrijom glave i ticala kontaktnog TMU-a, tj. optičkom postavom projekcijskog senzora u nekom trenutku moguće prići. Slikom 37. ilustriran je utor čija bi se geometrija mogla izmjeriti kada

bi glava sa mjernim ticalom mogla ući u ilustrirani položaj, te je sa ovom postavom mjernog senzora prikazani utor nedostupan.



Slika 37. Utor koji se može izmjeriti, ali mu je dostupnost nedostatna

Kod analize dostupnosti nekog površinskog geometrijskog artefakta potrebno je obratiti pažnju na odabranu geometriju glave sa kontaktnim ticalom (promjer i duljina ticala) kod TMU-a, tj. broj i međusobnu orijentaciju optičkih elemenata kod projekcijskog senzora. Tako je npr. prilikom odabira duljine ticala zapravo limitirana ukupna mjerljiva dubina provrta. Postojanje zasjenjenih [3] (eng. *occluded*) dijelova površine nekim od površinskih artefakata, slika 38. (ili zbog elemenata prihvatnog sklopa), ograničiti će vidno područje projekcijskog senzora, a time i izravno smanjiti dostupnost površine mjernog objekta.



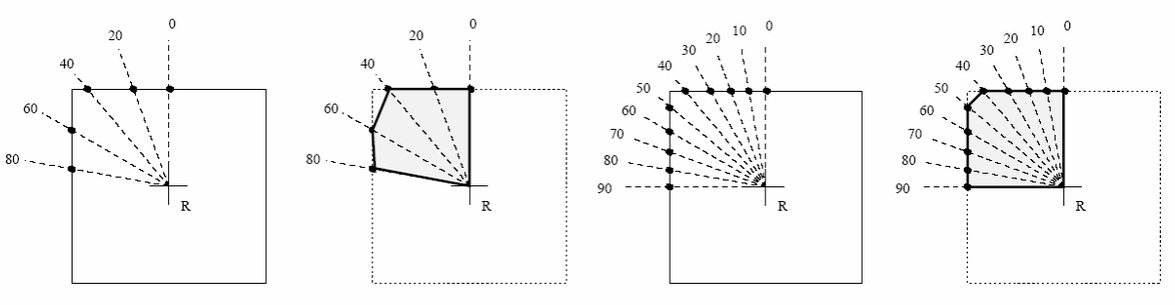
Slika 38. Zasjenjenost senzora površinskim artefaktom

Utjecaj na prostornu rezoluciju

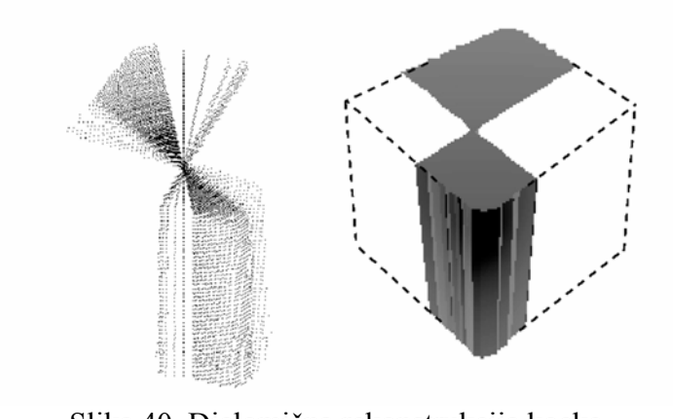
Relativan broj i raspodjela mjernih točaka kod provođenja mjerenja s kontaktnim TMU-om definirana je prilikom postupka diskretiziranja geometrije primjenom principa zamjenske geometrije, čime je broj potrebnih diskretnih osjeta sveden na najmanju moguću mjeru.

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 [55], čija se relativna orijentacija prema mjernom senzoru kontrolirano mijenja pomoću rotacijskog postolja (slikom 39. prikazan je tlocrt kocke sa 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, ovisiti će i međusobni razmak mjernih osjeta, slika 39. Tako bi se kod prevelikog koraka zakreta izgubila definicija oštrih bridova kocke, dok bi ostatak oplošja ipak bio zadovoljavajuće opisan, slika 40. U suprotnom slučaju, korištenjem malog kuta zakreta bridovi kocke biti će vjernije digitalizirani uz istovremeno povećanje broja osjeta i na onim površinama koje su zadovoljavajuće opisane i u prethodnom slučaju. Prethodno poznavanje geometrije omogućilo bi optimiziranje procesa mjerenja sa variranjem gustoće mjernih točaka na onim karakteristikama koje su za mjeritelja interesantne.



Slika 39. Uz utjecaj površinske geometrije



Slika 40. Djelomična rekonstrukcija kocke

Utjecaj lokalnih svojstava površine. Pod lokalnim svojstvima površine podrazumijevaju se one karakteristike koje su nastale kao posljedica obrade (npr. hrapavost) 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**

Utjecaj materijalnih karakteristika mjernog objekta na mjernu nesigurnost dolazi do izražaja prilikom korištenja kontaktnih TMU-a, gdje za vrijeme definiranja mjerne točke dolazi do lokalnog kontakta površine mjernog objekta sa najčešće kuglastim vrhom ticala. Uslijed izravnog trenutačnog lokalnog kontakta javlja se sila otpora na vrh ticala, prema kojoj mjerni uređaji smješteni u mjernoj glavi detektiraju trenutak, kao i iznos i smjer sile doticanja. Određivanje pravog trenutka ostvarivanja dodira ovisiti će o unaprijed definiranom dopuštenom iznosu dodirne sile (sile okidanja mjerne glave) za zadani tip mjerne glave i o poznavanju efekata koji se prilikom dodira javljaju.

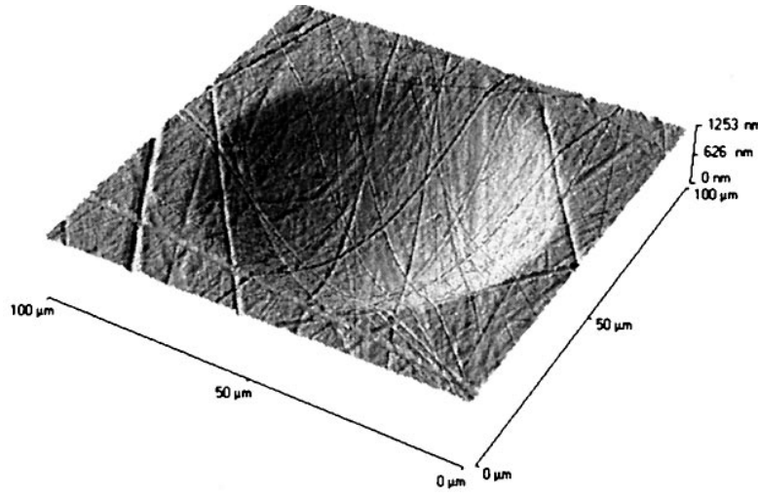
Prema [37], prilikom sudara glave ticala sa površinom mjernog objekta javiti će se sila udara (odn. otpora), te efekt odskakivanja glave nakon ostvarivanja kontakta. Kako se radi o iznimno kratkom trenutku dodira (reda veličine nekoliko μs), relativno malim brzinama pomaka mjerne glave (od 0.5 do 50 [mm/s]), ali i relativno malim promjerima ticala (1 do 4mm prema tabeli 3), dodirna površina biti će zapravo lokalizirana u jednoj točci, što će prouzrokovati velike dodirne pritiske. Posljedica je ta, da će kod realnih materijala, prilikom opisanog kratkotrajnog kontakta sferne glave kontaktnog ticala sa osnovnim materijalom sile pritiska doći do lokalne deformacije glave i osnovnog materijala. Postojanje lokalne deformacije zapravo dozvoljava dodatni pomak glave ticala u smjeru gibanja koje je prethodilo kontaktu sa osnovnim materijalom, doprinoseći time sveukupnoj mjernoj nesigurnosti kontaktnog mjerenja.

Promjer ticala [mm]	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
F (Aluminij) [N]	0.03	0.06	0.11	0.24	0.42
F (Čelik) [N]	0.15	0.35	0.62	1.39	2.46

Tabela 3. Ovisnost kontaktne sile o promjeru ticala

Uz pretpostavku statičkog smisla opterećenja, tabela 3 pokazuje najveće dopustive kontaktne sile za neke aluminijske (σ_T=280 [N/mm$^{2]}$) i čelične legure (σ_T=885 [N/mm$^{2]}$), u ovisnosti o promjerima glava ticala, a da još ne dolazi do lokalnog plastičnog tečenja materijala mjernog objekta. Vidljivo je da se kod realnih konstrukcijskih materijala koji su u širokoj primjeni u svakodnevnoj praksi radi o zapravo iznimno malim dopuštenim silama, uzevši u obzir mase gibljivih elemenata kojima se kontakt zapravo ostvaruje.

Na primjeru kontakta ticala promjera 1mm, koji se prije kontakta sa površinom navedene čelične legurom gibao brzinom od 3[mm/s], slikom 41. zorno je prikazan efekt lokalne deformacije površine mjernog objekta za vrijeme kontakta. Izračunato je da je inicijalna sila prilikom kontakta iznosila 14 [N], iako je sila detekcije sudara korištene trigger glave bila namještena na samo 0.2 [N].



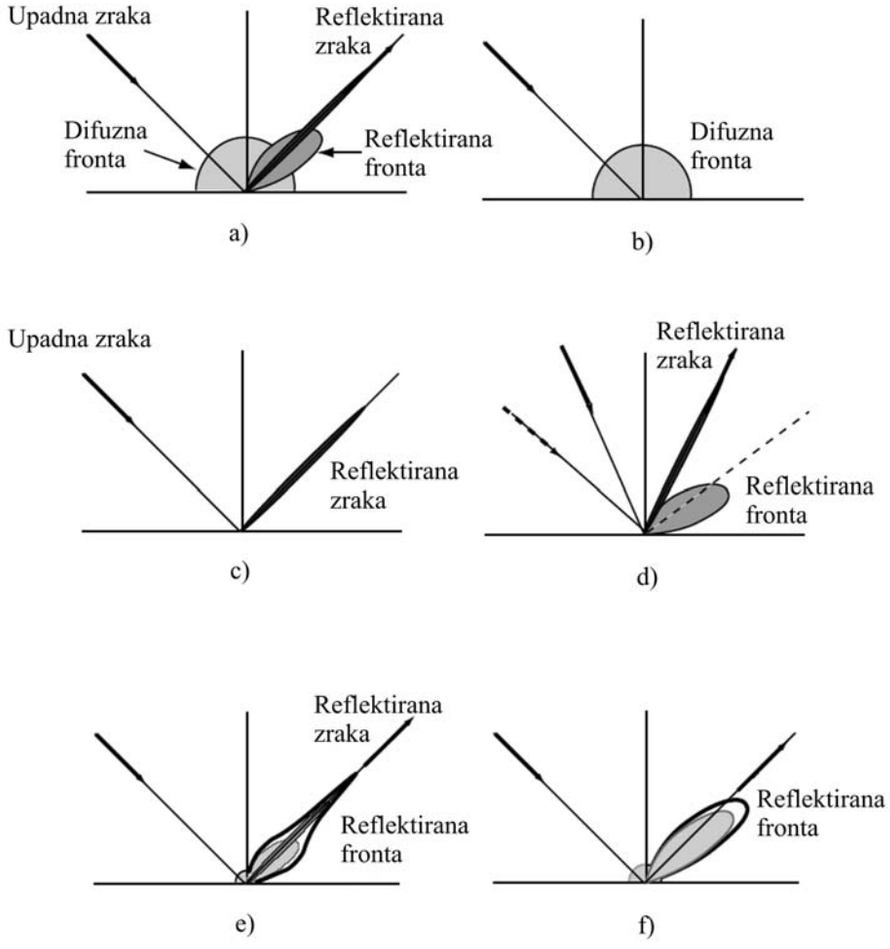
Slika 41. Kalota otiska glave ticala na površini čeličnog uzorka

Poznato je da postoji i ekvivalentni efekt utjecaja materijala mjernog objekta na definiciju mjerne točke kod projekcijskih sustava [56,57], prilikom interakcije površina nekih djelomično transparentnih materijala sa projiciranom zrakom. Projiciramo li lasersku zraku na mramornu površinu (slika 42.), 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.


Slika 42. 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.



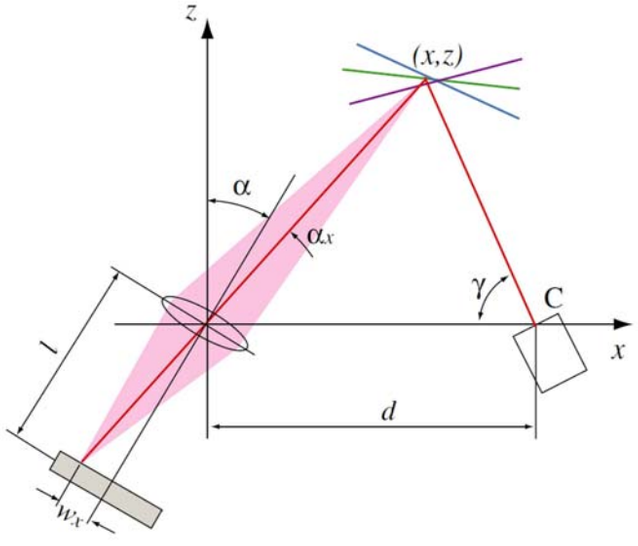
Slika 43. Uz definiciju komponenata površinskih refleksija

Intenzitet osvjetljenja koje će senzor zabilježiti je zapravo suma intenziteta osnovnih refleksijskih komponenata [58]: difuzne fronte, reflektirane fronte i reflektirane zrake, prema slici 43.a. Difuzna fronta nastaje kao posljedica raspršivanja dijela upadne zrake, koje je nastalo 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, osim u slučajevima izrazite hrapavosti površine kada 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 43.b, refleksna I i II, prikazane slikom 43.c i d, te hibridna I i II, prikazana slikama 43.e i f. Kod Lambertskih je površina dominantna difuzna fronta (npr. površina gipsa pokazuje ovakva svojstva). Upravo suprotnih svojstava, refleksna površina tipa I (slika 43.c) reflektira upadnu zraku u

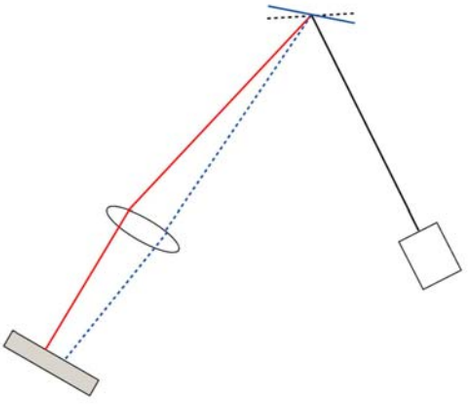
potpunosti, što se dešava prilikom osvjetljavanja zrcalnih i uglačanih metalnih površina. Sjajne površine plastičnih predmeta predstavljaju refleksni tip II, gdje se kod malih napadnih kutova javlja pretežno reflektirana fronta, a kod velikih reflektirana zraka. Hibridni tipovi predstavljaju kombinaciju svih triju refleksijskih komponenata, te će ovisno o utjecaju pojedine komponente raspodjela svjetloće odgovarati slikama 43.e ili f.

Uobičajeno je da projekcijski senzori pretpostavljaju da se projicirana zraka sa površine mjernog objekta reflektirala difuzno kao kod Lambertskog tipa površine. Tada bi, zbog približno podjednake refleksije u svim smjerovima prilikom digitalizacije, težište reflektirane svjetlosne fronte (pod pretpostavkom Gaussove karakteristike upadne zrake i korištene optike) prolazilo kroz centar objektiva, kao što je prikazano slikom 44. Položaj objektne koordinate mogao bi se odrediti izravno triangulacijom.

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 45.

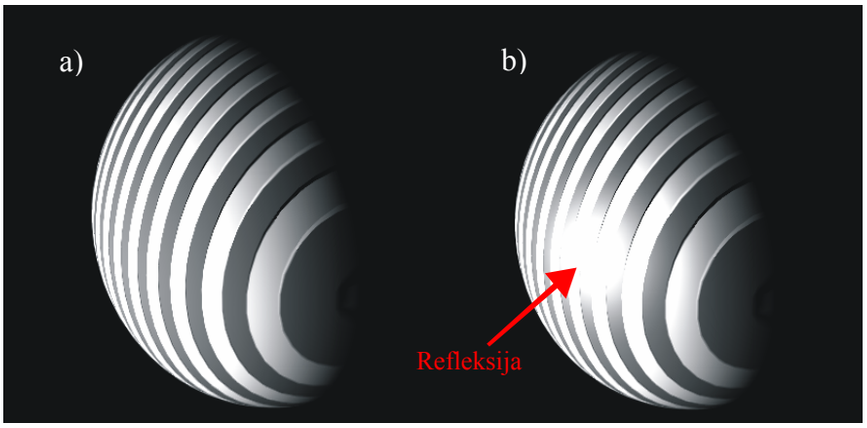


Slika 44. Refleksija svjetla sa Lambertske površine



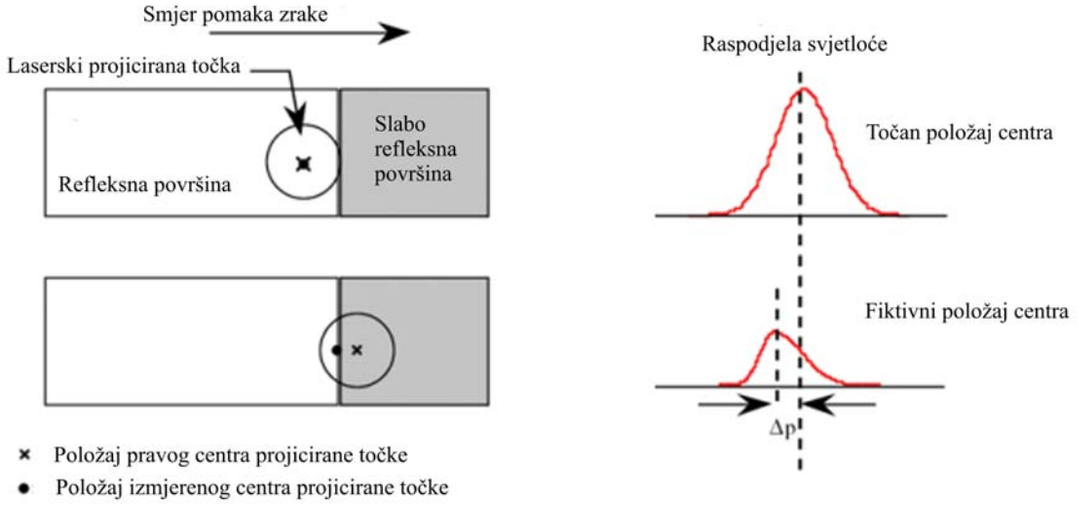
Slika 45. Refleksija svjetla sa refleksne površine

Opisani efekt utjecaja optičkih svojstava površine na definiciju mjerne točke zorno je prikazan slikom 46, na primjeru osvjetljavanja kugle snopom paralelnih linija [39]. Kugla predstavlja geometrijsko tijelo koje već samom svojom geometrijom uzrokuje pojavu refleksije, jer uvijek za konvergentnu konfiguraciju kamera postoji takova točka na površini za koju će refleksijska komponenta svjetla prevladavati difuznu. Ukoliko bi kugla imala idealnu Lambertsku površinu kao na slici 46, kamera bi snimila pravilni raster projiciranih linija, bez gubitka informacija. Efekt gubitka definicije projiciranog rastera uslijed pojave refleksije prikazan je slikom 46.b.



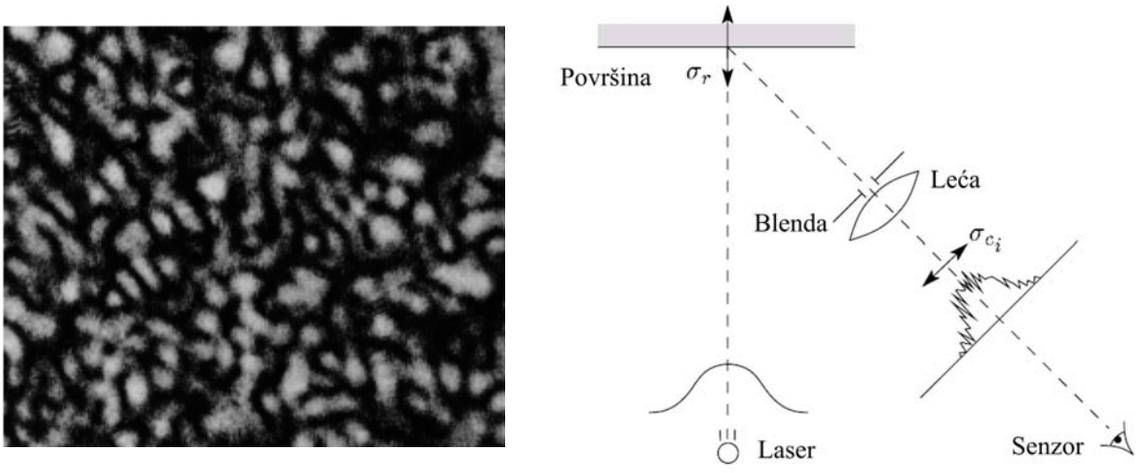
Slika 46. Simulacija odziva Lambertske a) i refleksijske površine b)

Prethodna diskusija odnosila se na površinu mjernog objekta, koja po cijeloj korisnoj površini ima jednolika optička svojstva. Kod površina kod kojih postoji oštra granica između područja visoke i niske razine refleksije [59], kao na slici 47, zbog različitih intenziteta pojedinih refleksijskih komponenata projicirana zraka će prilikom prelaska refleksijske granice ispoljiti efekt prividnog pomaka težišta projicirane zrake u odnosu na snimljeni odziv reflektirane zrake. Pritom se položaj pravog centroida projicirane točke (označen sa x na slici 47) prividno ne poklapa sa izmjerenim položajem svjetlosnog težišta projicirane točke (označen sa •). Površina više razine refleksije reflektirati će veću količinu svjetla, iako se na nju projicirao samo mali dio upadne zrake. To izaziva pomak raspodjele svjetloće ulijevo, prema slici 47.



Slika 47. Prividni pomak položaja centra projicirane točke

Osim prikazanih efekata, projicira li se uski snop koherentnog svjetla na površinu realnih objekata, pojaviti će se karakterističan efekt zrnatosti [3,40,60] (eng. *speckle*), slika 48.a, reflektiranog signala. Zrnatost nastaje uslijed interakcije grube lokalne površinske hrapavosti, u odnosu na valnu duljinu projiciranog koherentnog svjetla, stvarajući pritom nasumične interferencijske strukture. Prema [61] razlikujemo objektivnu i subjektivnu zrnatost. Objektivna je ona zrnatost koja nastaje prilikom interakcije koherentne zrake svjetla na samoj površini mjernog objekta, dok je subjektivna nastala formiranjem slike zbog nesavršenosti optičkih komponenata kamere na fotoosjetljivom senzoru, slika 48.b.



a) b)

Slika 48. Formiranje zrnatosti

5.1.3. 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 sa okolišem predstavljati najizraženiji trajni vanjski utjecaj, te da će se efekti ostalih vanjskih utjecaja opisanih ovim poglavljem dodatno kompliciratи prilikom interakcije sa 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 te njihovih interakcija. Pritom se pod utjecajima okoliša najčešće podrazumijevaju oni direktni utjecaji kao što je promjene temperature, vlažnosti, vibracija, kao i osvjetljenja, a koji mogu istovremeno djelovati i na elemente mjernog senzora i na sam mjerni objekt. Klasična je pritom pogreška zanemarivanje analize utjecaja pojedinih elemenata i na samog mjeritelja, te njegov osjećaj ugode.

- **Utjecaj temperature**

Prema [10], utjecaj temperature i njenog gradijenta čini značajan udio vanjskih utjecaja na rezultat mjerenja i mjernu nesigurnost prilikom korištenja kontaktnih TMU-a, a djelovati će kako na mjerni senzor, tako i na predmet mjerenja, kao i na mjeriteljev osjećaj ugode. Najčešći toplinski poremećaji s obzirom na korišteni mjerni uređaj pritom se javljaju kao posljedica odstupanja temperature okoliša od temperature umjeravanja TMU-a, neujednačenog horizontalnog i vertikalnog temperaturnog gradijenta, ovisnosti o dnevnom temperaturnom ciklusu, te ostalih nepredvidivih naglih temperaturnih promjena. Ovaj se utjecaj očituje kao nejednolika deformacija sastavnih dijelova TMU-a, a detaljna analiza efekata vanjskog temperaturnog utjecaja dana je u [10,37] na usporednim mjerenjima deformacija etalona, uz kontrolirano praćenje temperature elemenata kontaktnog TMU-a za različita narinuta temperaturna stanja okoliša. Uobičajeno je da se kontaktni TMU-i instaliraju u uvjetima kontrolirane mikroklime, te je za očekivati da će iznos pogreške mjerenja u izvjesnim granicama ujednačeno varirati tijekom njenog životnog vijeka.
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 temperaturni 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, zapravo 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, tj. 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). CCD kamere koje se ovdje 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.

- **Utjecaj vibracija**

Drugi po značaju utjecaj, kada se radi o kontaktnim TMU-ima, je prema [10] utjecaj vibracija koje se svojim prisustvom u okolišu mjernog uređaja mogu poklopiti sa rezonantnim područjem pojedinih elemenata uređaja. Time mogu izazvati relativne pomake glave kontaktnog ticala i površine mjernog objekta izravno utječući na ponovljivost i točnost mjerenja. Ovaj se utjecaj može određenim tehničkim rješenjima temeljenja antivibracijskim oslonacima jednostavnije eliminirati od prethodno spomenutih temperaturnih utjecaja. Time se sustav mjernog objekta zajedno sa mjernim senzorom izolira od utjecaja vibracija iz okoliša.
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 slično 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 je prije spomenuti *Atos*, definiraju položaj mjerne točke slijednim projiciranjem svjetlosnog uzorka, što traje izvjesno vrijeme. Ukoliko je došlo do relativnog pomaka senzora u odnosu na projiciranu površinu uslijed pogrešnog smisla osvjetljenja uzrokovanog ovim pomakom, pojaviti 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 (*Atos*), 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**

Prema [10], ovisno o izvedbi i materijalima od kojih je izrađen kontaktni TMU, utjecaj vlage u okolnom zraku ispoljava se u vidu korozijskog djelovanja na predmet mjerenja i elemente TMU-a (npr. bubrenje elemenata TMU-a koji su izrađeni od granita zbog njegove higroskopnosti). Korozijsko djelovanje pritom negativno djeluje na očuvanje dimenzionalne stabilnosti, kako predmeta mjerenja, tako i elemenata TMU-a, te bi u smislu zaštite ovih komponenti od djelovanja vlage ona trebala biti kontrolirano održavana na niskom nivou. Ovo se kosi sa zahtjevom za osiguranje ugodne radne atmosfere mjeritelju jer bi uz nominalnu temperaturu od 20°C vlažnost trebala biti relativno visoka. Uobičajeno je prema istom izvoru održavati kompromisnu vlažnost od 45% ± 10%.
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 pak 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**

Naizgled zanemariv utjecaj osvjetljenja kod kontaktnih TMU-a ispoljava se u vidu nejednolikog zagrijavanja njihovih konstrukcijskih elemenata (npr. uslijed cjelodnevnog obasjavanja suncem kroz krovne ili zidne prozore), te se tijekom dana mijenja po intenzitetu i smjeru. Stoga se ovi uređaji redovito instaliraju u prostoriji zaštićenoj od vanjskih izvora osvjetljenja. Projekcijski senzori osjetljiviji su na ovaj vanjski utjecaj jer se prilikom varijacije intenziteta svjetla iz okoliša radi o izravnoj smetnji pravilnoj definiciji mjerne točke. Pritom se u nekoj mjeri mogu korigiranjem intenziteta projiciranog svjetla kompenzirati ovi utjecaji (npr. kod jednolikog vanjskog osvjetljenja visokog intenziteta), ali promjenjivost intenziteta osvjetljenja okoliša tijekom procesa mjerenja uzrokovala bi povremeni gubitak definicije rastera na površini mjernog objekta uslijed preosvijetljenosti, a time i greške u definiciji mjerne točke. Osim na kvalitetu definicije projiciranog rastera, utjecaj varijacije intenziteta, zajedno sa nepovoljnim upadnim kutem, djeluje i na sposobnost korištenih kamera za ispravnu digitalizaciju promatrane scene. Dodatno, 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, pa prilikom digitalizacije slike dolazi do pojave neželjenih artefakata u snimljenoj slici. Laserski projekcijski sustavi manje su osjetljivi na ovaj utjecaj od sustava koji se koriste nekoherentnim izvorima svjetla zbog svoje izrazite monokromatičnosti. 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 okolišnje svjetloće uzrokovane dnevnim sunčevim mijenama, odgovara polumračna prostorija. Mjeritelj koji radi sa 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.

- **Utjecaj prašine i drugih izvora nečistoće**

Kontaktne površine pomičnih dijelova TMU-a izrađene su iznimno precizno, te zahtjevaju precizno vođenje. Pojava prašine i drugih izvora nečistoće se zbog njihovog abrazivnog djelovanja ne može tolerirati u bliskom okolišu mjernog senzora. Ista se primjedba odnosi i na vrh ticala mjerne glave kojem se pretpostavlja konstantnost dinamičkog promjera tijekom provođenja procesa mjerenja. Projekcijski senzori imaju manje gibljivih dijelova, ali postojanje prašine u okolišu u izvjesnoj mjeri utječe na prolazak projiciranog svjetla kroz zračnu barijeru do površine mjernog senzora, te njeno sjedanje na optičke površine objektiva utječe na kvalitetu snimljene slike ili projicirane zrake. Kako ovi senzori omogućuju izmjenu objektiva ovisno o zahtijevanom mjernom volumenu, prilikom demontaže objektiva sa tijela kamere nerijetko je šupljina kamere, pa i sama površina fotoosjetljivog čipa izravno ugrožena utjecaju prašine, koja svojim prisustvom smeta pravilnoj digitalizaciji promatranog efekta. Nju se sa površine čipa ne smije mehanički uklanjati. Mjeritelj je pritom izravno pod utjecajem kontaminirane atmosfere, te su moguće pojave alergijskih reakcija, a time i utjecaja na ugodnost radnog mjesta.

5.1.4. 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 mogla željena geometrija mjernog objekta u potpunosti rekonstruirati. Postojanje odgovarajuće, ili barem približno odgovarajuće dokumentacije prikladne za primjenu sa 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 da li se radi o kontroli kvalitete izrade postojećeg (npr. dimenzijska kontrola lijevanih strojnih dijelova i sl.) ili o mjerenju unikatnog modela (npr. modeliranje geometrije automobilske šasije). Svrhu je stvaranje potpuno nove dokumentacije ili 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 na korištenoj mjernoj opremi 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 zahtijevanih lokalnih karakteristika. Kompleksnost ovog postupka ovisiti će dodatno i o broju mjernih točaka (te njihovom rasporedu u promatranom mjernom volumenu), koje se sa 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 čim 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 [62], 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 [10]. Oprečnost ovih zahtijeva biti će moguće zadovoljiti samo uz uvjet da su unaprijed poznate mogućnosti i ograničenja vezana uz tehnologiju na kojoj se za prikupljanje mjernih točaka bazira korišteni mjerni sustav, tj. da su poznati utjecaji unutrašnjih i vanjskih faktora, te orijentaciono poznata geometrija mjernog objekta.

Kontaktne metode

Uzevši u obzir diskretnu karakteristiku kontaktnih mjerenih uređaja, koji po jednom kontaktu mjernog senzora sa površinom mjernog objekta mogu digitalizirati samo po jednu mjernu točku, teško je uskladiti ekonomske zahtjeve za što manjim brojem mjerenja i zahtjeve točnosti za što većim brojem mjernih osjeta [10]. Stoga se procedura mjerenja oblika mjernog objekta kod kontaktnih mjernih metoda planira tako da se stvarna geometrija zamjenjuje sa tzv. zamjenskom geometrijom. Zamjenska geometrija se sastoji od opisivanja geometrije mjernog objekta pomoću idealnih geometrijskih formi (točka, pravac, kružnica, ravnina, kugla i sl.) koje je mjerenjem moguće jednoznačno definirati već sa konačnim, relativno malim brojem mjernih točaka. Broj točaka kojima će se jednoznačno definirati neka karakteristika pritom nije unaprijed zadan, već ga je moguće prikladnim algoritmima pretpostaviti, ali se mjerenje mora provesti uz uvjet da broj točaka kojima je opisana neka karakteristika ne smije biti manji od minimalno potrebnog broja za njenu jednoznačnu definiciju (npr. pravac je jednoznačno definiran preko dvije točke, ravnina preko tri i sl.) [10]. Zbog objektne orijentiranosti ovaj postupak definicije zamjenske geometrije zahtijeva zasebno pozicioniranje svake od mjernih točaka koje bez orijentacionog poznavanja mjerene

geometrije nije moguće za općeniti slučaj geometrije automatizirati, osim za ponavljajuće radnje pri kontrolnim mjerenjima geometrijski jednakih proizvoda.

Zbog kontaktnog smisla metode, automatizacija prostorne putanje gibanja vrha digitalizacijskog ticala moguća je samo za one geometrijske oblike koji nemaju izražene nagle promjene geometrije (nagle skokovite promjene geometrije, provrti, utori i sl.). Prostorna gustoća i relativna raspodjela digitaliziranih točaka biti će direktno proporcionalni sa ukupnim vremenom potrebnim za digitalizaciju kompletnog mjernog volumena. Međutim, za opisivanje ravnih površina potrebno je izmjeriti manji broj mjernih točaka nego za opisivanje bilo koje zakrivljene plohe, tako da se bez unaprijed okvirnog poznavanja geometrije gustoća mjernih točaka neće poklapati sa kompletnošću digitalizacije mjernog volumena. Lako se može desiti da pri mjerenju novog modela upravo one površine na kojima je za ispravnu definiciju potrebno izmjeriti najveći broj mjernih točaka budu digitalizirane sa najmanjom gustoćom mjernih točaka.

Zbog potrebe temeljenja mjernog objekta u okviru mjernog uređaja, u većini slučajeva postojati će površine čiju geometriju nije moguće izmjeriti u istom koordinatnom sustavu sa ostatkom geometrije (znači, odjednom, u jednom mjerenju, bez promjene načina prihvata mjernog objekta), budući da je ta površina ili zaklonjena uređajem za prihvat mjernog objekta ili se radi o donjim nalegnim površinama preko kojih su definirane bazne referente ravnine. Navedene površine mogu biti ravne ili proizvoljne geometrije sa volumnim artefaktima, čiji je položaj također potrebno odrediti. Pritom je važno prilikom planiranja mjerenja definirati one referentne objektne karakteristike koje će se moći izmjeriti za oba (ili više) položaja mjernog objekta, kako bi se izmjerene točke jednoznačno mogle objediniti u isti koordinatni sustav i omogućiti modeliranje kompletne geometrije zadanog mjernog objekta.

Dosadašnja razmatranja pretpostavljala su da se mjerni objekt sastoji od materijala čiji se volumen, tj. površina koju se mjeri neće deformirati uslijed djelovanja sila prihvata i kontakta sa mjernim ticalom, te da je mjerni objekt temperiran na temperaturu mjernog uređaja.

Projekcijske metode

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 tomu 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 slijedeće 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 osnovi zahtjeva postavljenih mjernim zadatkom i geometrijom mjernog objekta,
- planiranje prihvata mjernog objekta, te
- 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, odn. 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, te 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 relativno pozicioniranje senzora nemaju mehanički kontrolirano, zahtijevaju uvođenje optičkih karakteristika preko kojih će biti izvršeno određivanje relativne orijentacije u koju je senzor manualno ili preko robotskog manipulatora doveden. Položaj, broj, dimenzije i oblik navedenih optičkih karakteristika potrebno je kod planiranja mjerenja takovim sustavima optimalno planirati po površini i u neposrednom okolišu mjernog objekta, kako bi se omogućila digitalizacija kompletnog mjernog volumena uz optimalan broj mjerenja i minimalni gubitak informacija o površinskim artefaktima mjernog objekta, uslijed nanošenja markera na samu mjernu površinu.

5.1.5. Rukovanje mjernom opremom

Uspješnost provođenja nekog mjernog procesa, te samim time i provedba naknadne analize podataka dobivenih nekim mjernim postupkom ovisiti 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 sa 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 sa konstruktorom odn. 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 savladavanje temeljnih principa korištenja. Nije rijetkost da upravo proizvođač pruža specijalizacijske tečajeve i organizira tzv. *users meetinge* (sastanke svojih korisnika sa prezentacijama novih tehnologija i komparativnim mjerenjima, npr. GOM User Meeting) za isporučenu mjernu opremu. Time je kroz pravilnu edukaciju mjeritelja, konstantnim držanjem koraka sa 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.

5.1.6. 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 [10]. Radi se o jedinom dijelu mjernog uređaja koji je moguće bez velikih troškova vremena i novca, te potrebe za fizičkom zamjenom određenih konstrukcijskih elemenata nadograditi i modificirati. 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 međusobnu uzročno-posljedičnu vezu između sustava za akviziciju, obradu te 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 elementarne međusobno nezavisne zadaće (kalibracija, planiranje mjerenja, upravljanje mjerenjem, obrada rezultata), smisao utjecaja pojedinih dijelova korištene programske podrške na mjernu nesigurnost mjerenja nekim mjernim senzorom postaje jasniji.

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, odn. mjerni senzor, a koji se provodi 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 omogućavaju definiciju potrebnih pogonskih parametara u nekom zadanom mjernom volumenu promatranog senzora. Poznato je međutim [10], 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 [10], koji su primjenjivi za mjerenja velikih serija proizvoda.

Sustav za planiranje mjerenja. Poznavanje efekata koji se javljaju prilikom interakcije mjernog senzora sa površinom mjernog objekta, te njihovih utjecaja na mjernu nesigurnost, npr. utjecaj promjene smjera kontakta ticala mjernog senzora kod kontaktnih mjernih senzora [10], ili refleksije svjetla sa zakrivljenih površina kod projekcijskih mjernih senzora, može se preko odgovarajućih programskih algoritama upotrijebiti u svrhu planiranja optimalne trajektorije mjernog ticala odn. 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 preko izvjesnih preporuka 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 u dodiru upravo sa ovim programskim modulom, njegova brzina odziva, jasnoća prikaza rezultata mjerenja na ekranu, te količina pažnje koju mjeritelj mora posvetiti pri samom njegovom korištenju i planiranju slijedećeg koraka utjecati će izravno na stupanj mjeriteljeve koncentracije i ugodnosti pri radu sa odabranim mjernim uređajem, a samim time i na njegovu sposobnost planiranja daljnjeg postupka mjerenja.

U općenitom smislu, 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 kojime 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 u smislu razdvajanja programa na zasebne module, bitno je da digitalizirani podaci kada napuštaju ovaj modul nisu podvrgnuti nikakvim postupcima filtriranja (osim obrade osnovnim algoritmom), čime bi se dovelo 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 slijedeće 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 sa 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 reducirati ovo vrijeme čekanja sa prikladnim prilagodbama 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 automatizirani način prikupljanja željenih podataka na nekom mjernom senzoru (uz zadržavanje općenitosti primjene zadanog mjernog uređaja). U tom smislu korišteni 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 sa nekim unaprijed poznatim digitaliziranim modelom. Međutim, postoje i takove mjerne zadaće (npr. kontrola odstupanja od kružnosti pomoću kontaktnih ticala [10]), 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.

5.1.7. Ljudski faktor

Ako promotrimo sve faze nekog mjernog procesa (neovisno o primijenjenoj mjernoj tehnologiji i uređajima), započevši sa 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 [10] na osnovi 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 sa različitim razinama znanja imati različit utjecaj na kvantitativan iznos mjerne nesigurnosti, iako se zapravo ništa u korištenoj mjernoj tehnologiji ili mjernom objektu nije mijenjalo.

5.1.8. Zahtjevi naknadne obrade podataka

U direktnoj sprezi sa 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 planera mjerenja u suradnji sa konstruktorom omogućiti 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 sa 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 [10] 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 za 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.

5.2. Analiza unutrašnjih faktora

Pod terminom *unutrašnji faktori* u užem smislu ovdje se promatraju tehnološki principi na koje se za definiciju mjerne informacije pojedina mjerna metoda oslanja. U širem smislu, s obzirom na činjenicu da se sva mjerenja zapravo moraju vršiti sa 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.

Diskusija pojedinih faktora izvršiti će se stoga odvojeno za kontaktne i beskontaktne projekcijske sustave, jer su pritom izvori i smisao djelovanja unutrašnjih faktora uvjetovani različitim utjecajnim elementima. Zajednički naglasak biti će stavljen na analizu unutrašnjih utjecaja koji se javljaju uslijed:

- realnih konstrukcijskih izvedaba mjernog senzora,
- korištenih modela definicije mjerne točke,
- raspodjele mjernih točaka,
- definicije mjernog volumena,
- utjecaja kalibracije uređaja,
- utjecaja programske podrške

5.2.1. Kontaktni TMU

S obzirom na proširenost kontaktnih TMU-a, i njihovu dugu tradiciju, utjecaj i načini određivanja kvalitativnih iznosa i interakcija unutrašnjih faktora, kao i njihovog utjecaja na mjernu nesigurnost kvalitetno su pokriven literaturom, te će se ovaj sažeti prikaz utjecaja unutrašnjih faktora kod kontaktnih TMU-a temeljiti na radu domaćih autora [10, 37], budući da je [37] neke od analiza unutrašnjih parametara vršio upravo na kontaktnom TMU-u, korištenom i prilikom izrade ovog rada.

Glavni izvori unutrašnjih utjecaja na točnost sistematizirani su prema:

- utjecaju mehaničke strukture TMU-a,
- utjecaju mjerne glave,
- utjecaju statičke i dinamičke deformacije elemenata TMU-a, te
- utjecaju temperature.

- *Utjecaj mehaničke strukture TMU*

Kontaktni smisao djelovanja TMU-a zahtijeva prikladnu mehaničku izvedbu elementarnih dijelova TMU-a, stoga će većina utjecaja na mjernu nesigurnost biti koncentrirana na geometrijske pogreške. Izvore ovih sustavnih pogrešaka treba promatrati prema konstrukcijskim utjecajima, točnostima izrade i sastavljanja pojedinih elemenata, dimenzionalnoj stabilnosti, trošenju i sl, a najčešće se manifestiraju u vidu neželjenih pomaka koje zbog njihova izvora mjerni sustav ne može registrirati.

Određivanje iznosa geometrijskih pogrešaka treba provesti izravno na pojedinim komponentama mjernog uređaja, primjenom vanjskih nezavisnih mjernih uređaja. Prema izvoru ovih pogrešaka, svrstavaju se u četiri osnovne grupe:

- pogreške pravocrtnosti pomicanja
- pogreške okomitosti pomicanja
- pogreške kuta
- pogreške osnog pozicioniranja

Pogreške pravocrtnosti pomicanja u smjeru osi x, y i z nastaju kao posljedica odstupanja od ravnosti vodilica, a određuju se sa šest parametara za svaku od osi pomaka u dvije preostale okomite ravnine (npr. za procjenu odstupanja pravocrtnosti pomicanja elementa u smjeru osi x potrebno je ispitati postoje li i komponente pomaka u smjerovima osi y i z). Iznosi ovih pogrešaka određuju se direktno na mjernom senzoru, mehanički, primjenom lineala ili optički, primjenom laserskog interferometra. Postupci su prikazani u [10, 37].

Pogreške okomitosti pomicanja odnose se na održavanje okomitosti između pripadajućih osi u određenim granicama. U tom smislu definiraju se tri kutna parametra odstupanja okomitosti od osi, za koje je dopušteno pomicanje elemenata mjernog uređaja. Po svom nastanku, usko su vezana uz odstupanja od pravocrtnosti pomicanja, pa se ne mogu smatrati konstantnim. Iznosi pogrešaka okomitosti ispituju se slično pogreškama pravocrtnosti pomicanja pomoću usporedbe sa mehaničkim ili optičkim kutnikom [10, 37].

Pogreške kuta odnose se na efekte kutnih zakreta elemenata TMU-a oko glavnih koordinatnih osi, izraženih preko devet parametara. Primjerice, prilikom pomicanja elementa u smjeru osi x pogreške kuta definirane su kao: uvijanje oko osi x, nagib osi x oko osi y, te skretanje osi x oko osi z. Praktično ih je teško razlučiti od pogrešaka translacije koje se javljaju kod pomicanja elemenata TMU-a, a ispituju se kombinacijom laserskih interferometara (nagib) i autokolimatora (skretanje). Pogreške uvijanja određuju se korištenjem elektroničke libele.

Pogreške osnog pozicioniranja odnose se na pogrešku pri vršenju translatornog pomaka elemenata TMU-a, prilikom promjene pozicije uzduž svake od osi, te se mogu opisati sa tri parametra pomaka: Δx, Δy, Δz, po jedan u smjeru svake od osi. Uzrok im treba tražiti u pogreškama mjernih skala, a iznosi im se određuju primjenom paralelnih graničnih mjerki, stepenastih mjerki ili laserskih interferometara.

- *Utjecaj mjerne glave*

Drugi glavni izvor unutrašnjih utjecaja na mjernu nesigurnost je utjecaj mjerne glave, koji je po iznosu značajan, a ponekad čak i dominantan nad svim ostalim unutrašnjim utjecajima [37] (npr. ukoliko se mjere predmeti malih dimenzija pa su potrebni mali pomaci TMU-a).

Mjerna glava predstavlja cjelokupni izmjenjivi podsustav kontaktnog TMU-a. Prema izvedbama kontaktnih varijanti mjernih glava razlikujemo tzv. "trigger" i analogne mjerne glave, te ih s obzirom na ovu podjelu treba kritički promatrati u smislu njihove električke i mehaničke strukture, točnosti kinematike, sistema izmjenjivih ticala i produžetaka, postizive mjerne sile, brzine gibanja, smjera ticanja i sl.

Prema izvorima pogrešaka prikazanima u [37], za razumijevanje utjecaja mjerne glave potrebno je analizirati:

- utjecaj kalibracije mjernog ticala,
- utjecaj kinematike mjerne glave,
- utjecaj dinamičkih efekata, mjerne sile i brzine ticanja,
- utjecaj promjene kuta mjerne glave i glave sa više ticala, te
- utjecaj zamjene mjerne glave.

- *Utjecaj kalibracije mjernog ticala*. Kalibracijom ticala određuje se dinamički promjer i stvarne koordinate središta glave ticala u odnosu na globalni koordinatni sustav TMU. Kalibracija se provodi na kuglastim etalonima poznatog promjera, te se bilo kakva mjerna nesigurnost glede referentnog etalona izravno prenosi u mjernu nesigurnost dinamičkog promjera ticala. Pritom se ne smije zanemariti ni činjenica da se kalibracija dinamičkog promjera zapravo vrši na uređaju kojim se vrši i mjerenje, pa će greške njegovih mjernih uređaja također utjecati na definiciju dinamičkog promjera (a najčešće se kalibracija vrši upravo na sredini mjernog područja gdje je i najveće habanje pomičnih dijelova uslijed velike frekvencije korištenja u tom području). Pod pojmom dinamičkog promjera zapravo se podrazumijeva onaj promjer različit od realnog, koji uključuje i različite faktore specifične za mjerno ticalo i vrstu mjerne glave, kao što su npr. dimenzije, oblik i deformacija ticala pri kontaktu. Dinamički promjer kod trigger glava obično je manji od stvarnog, budući da prilikom kontakta, a prije slanja signala o dodiru, prethodi mali pomak i deformacija tijela ticala. Analogne glave omogućuju određivanje parametara kalibracije po principu os po os, što omogućava provedbu korekcije savijanja i drugih parametara kalibracije mjernog ticala u bilo kojem mjernom pravcu.

- *Utjecaj kinematike mjerne glave* potrebno je promatrati s obzirom na konstrukciju, smjer i položaj glave s ticalom tijekom gibanja. Primjerice, trigger mjerne glave će prilikom mjerenja konture sferične ili valjkaste površine dati odziv sa tri izražena ispupčenja, uzroke kojih treba tražiti u konstrukcijskoj izvedbi ove glave kojoj je korijen ticala zapravo uležišten u tri točke. Iako izmjereni oblik konture sferične površine pritom ne odgovara realnom, izmjereni promjer može biti i točan, budući da dolazi do efekta usrednjavanja navedenih izmjerenih izbočina i ispupčenja, ako se za izračun promjera uzmu sve izabrane mjerne točke. Također je poznato da će se utjecaj na mjernu nesigurnost javiti i ovisno o orijentaciji mjerne glave, duljini ticala i smjera ticala prilikom mjerenja istog artefakta [37]. Utjecaj kinematike na mjernu nesigurnost potrebno je proširiti i na dinamičke efekte u smislu putanje vrha ticala, jer primjerice, konstantna obodna brzina kod kružnog gibanja ne znači i nepostojanje dinamičkih inercijskih sila u smjeru normale na smjer gibanje.

- *Utjecaj dinamičkih efekata, mjerne sile i brzine ticanja*. Ovaj je unutrašnji utjecaj zapravo u uskoj vezi sa vanjskim utjecajem materijalne karakteristike površine mjernog objekta, prikazanim u poglavlju 5.1.2. Radi se o problemu usklađivanja iznosa mjerne sile kod koje će mjerna glava detektirati kontakt sa površinom mjernog objekta sa specifičnim karakteristikama površine mjernog objekta sa brzinom pomaka ticala, te broja potrebnih mjernih točaka i vremena dostupnosti mjernog objekta. U tom smislu neke trigger mjerne glave imaju mogućnost definiranja sile kontakta, te se radi minimalizacije ovog utjecaja preporuča korištenje što kraćeg ticala i male mjerne sile. Pritom je potrebno voditi računa i o vektoru smjera kontaktne sile, budući da ove glave ne pokazuju identična mjerna svojstva u radijalnom i aksijalnom smjeru ticanja,

s obzirom na tijelo ticala. Kod mjerenja s potrebnom visokom točnošću, trigger mjerne glave prepuštaju mjesto analognim mjernim glavama, budući da se kod njih iznos mjerne sile mijenja linearno s otklonom ticala, te se kod njih preciznije može odrediti trenutak i sila dodira.

- *Utjecaj promjene kuta mjerne glave i glave sa više ticala.* Promjena kuta predstavlja najveći izvor pogrešaka kod ovih motoriziranih mjernih glava, budući da se definicija vektora položaja središta ticala definira dinamički za vrijeme procesa mjerenja, te nema nezavisne vanjske kontrole položaja kontaktnog ticala tijekom promjene orijentacije (iako su u literaturi prikazane hibridne izvedbe kod kojih se položaj ticala određuje posredno, preko tri nezavisna interferencijska sustava). Kod izvedbi glava sa više ticala potrebno je precizno poznavati vektore položaja svakog od ticala, što uzrokuje dodatni problem prilikom kalibracije, jer će se izravno pogreška vektora položaja središta ticala preslikati na položaj izmjerene točke na površini mjernog objekta [37].

- *Utjecaj zamjene mjerne glave.* Automatizacijom procesa mjerenja uvedeni su sustavi koji imaju mogućnost automatske izmjene mjerne glave. Pritom je potrebno konstrukcijom prihvatnog dijela ostvariti visoku ponovljivost prihvata mjerne glave kako bi se izbjegle potrebe za kalibracijom glave prilikom svake izmjene [37].

- *Utjecaj statičke i dinamičke deformacije elemenata TMU-a*

Utjecaj statičke deformacije zapravo je u uskoj vezi sa mehaničkom strukturom kontaktnih TMU-a i masom mjernog objekta, te je dobar dio efekata statičkih utjecaja već određen prilikom mjerenja utjecaja mehaničke strukture. Primjerice, progib vodilica mosta kod mostne izvedbe kontaktnog TMU-a prouzročen pomicanjem poprečnog klizača s pinolom i mjernom glavom kompenzira se kompenzacijom pogrešaka pravocrtnosti, ali ukoliko se most pomiče u pravcu uzdužne osi TMU-a iznos pogreške pravocrtnosti i kuta nagiba ne ovisi samo o njegovoj poziciji već i poprečnom položaju klizaća na mostu. U [37] je prikazano modeliranje ovog efekta s obzirom na krutost elemenata i zračnih ležaja.
Utjecaj dinamičke deformacije sa pojavom vibracija vidljiv je u novije vrijeme kroz problem povećanja brzine mjerenja uz očuvanje ili čak poboljšanje točnosti mjernog uređaja. Ovo predstavlja veliki problem, budući da se radi o potrebi za velikim ubrzanjima pri naglim pokretanjima i zaustavljanjima pomičnih elemenata koji su značajnih masa, pri čemu se može pojaviti pobuđivanje rezonantnih frekvencija pojedinih elemenata, odnosno povećava se vrijeme potrebno za smirivanje elemenata konstrukcije. Mjerenjem na TMU Ferranti Merlin 750 provedena u [37], pokazalo se da je vrijeme smirivanja ticala iznosilo 2[s]. Ovaj efekt dolazi do izražaja pri provedbi skeniranja nepoznate površine, koja se najčešće provode po zakrivljenim površinama uz registriranje koordinata točaka za vrijeme dok su pomični elementi još podvrgnuti promjeni ubrzanja. Pinola i ticalo zbog svoje mase, duljine i naglih promjena ubrzanja dovode do "prednjačenja" ili "zaostajanja" ticala za ostalim elementima TMU-a, pridonoseći time pogreškama izmjerenih točaka. Pritom su posebno interesantne pobude niske frekvencije, budući da one rezultiraju većim amplitudama. To se prilikom mjerenja izražava u obliku značajnih slučajnih pogrešaka. Za ilustraciju intenziteta utjecaja dinamičkih efekata interesantna je studija utjecaja pulsiranja zračnih ležajeva TMU Ferranti Merlin 750 provedena u [37], koja pokazuje da se za kontinuiran dotok tlaka zraka od 5 [bar] pojavljuje vertikalno pulsiranje amplitude 1.2[μm] što negativno utječe na ponovljivost rezultata mjerenja.

- *Utjecaj temperature*

Utjecaj temperature predstavlja izrazito složen faktor koji utječe na nesigurnost mjerenja kod kontaktnih TMU-a, posebno stoga što je razdvajanje ovog utjecaja u smislu unutrašnjih i vanjskih uzročnika ponekad nejasno. Prilikom provođenja mjerenja bitno je očuvati stacionarnost temperaturne raspodjele po volumenu mjernog uređaja, što nije uvijek moguće održati uslijed vanjskih i unutrašnjih izvora i ponora topline. Iako kontaktni TMU-i nemaju nekih izrazito jakih unutrašnjih izvora topline, utjecaj na točnost može nastati uslijed zračenja topline pogonskih elektromotora i elektroničkih komponenti, topline generirane trenjem (u ležajevima, navojnom vretenu, vodilicama i sl.), te razlike u temperaturi komprimiranog zraka i vodilica zračnih ležajeva. Literaturom [10, 37] su prikazani iscrpni eksperimenti kojima se ispitivao utjecaj trenja na kontaktnim površinama, te utjecaja temperature komprimiranog zraka zračnih ležajeva.

5.2.2. Projekcijski sustavi

Kontaktni TMU-i, unatoč velikom broju osnovnih tipova i podvarijanti (poglavlje 3.1.) dijele zajedničke strukturne elemente kojih je utjecaj na mjernu nesigurnost moguće prema prošlom poglavlju jednoznačno sistematizirati. Projekcijski senzori pak, za kodiranje položaja objektne mjerne točke i digitalizaciju njena slikovnog osjeta koriste različite principe (npr. pomično stakalce sa metaliziranim uzorkom, LCD projektore, projiciranje točke ili linije uz ostvarivanje relativnog pomaka senzora i mjernog objekta mehaničkim sustavima sa unutarnjim ili vanjskim gibljivim elementima i sl.) i različite fizičke izvedbe mjernih senzora. Stoga je i definicija unutrašnjih utjecajnih faktora u ovom radu donekle provedena s obzirom na mjerne sustave korištene pri provedenim eksperimentima (proizvođačke specifikacije prikazane su u poglavlju 6.2.).

Utjecaji unutrašnjih faktora kod projekcijskih sustava nisu bili do sada u dostupnoj literaturi pregledno sistematizirani, te će se u nastavku sistematizirati s obzirom na:

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

- *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*) [26], te posebnom analognom LPED pretvorniku [22]. Pritom se intenzitet svjetla fokusiranog preko odgovarajuće optike na fotoosjetljivo područje poluvodičkog osjetila pretvara u analogni električni signal koji se digitalizacijom pretvara u sliku na monitoru računala. CCD i CMOS tipovi kamera 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 odziv optičkih elemenata nije u potpunosti linearan za kompletno područje intenziteta svjetla koje na njega upada. Matrična raspodjela piksela obično je fizički na čipu izvedena sa 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 će pogreške digitalizacije linije biti minimalne ako promatrani linijski efekt stoji pod kutem od 45º u odnosu na linije matrice čipa. Kod sustava sa projiciranjem nekoherentnog svjetla prevladavajuću upotrebu danas imaju monokromatski čipovi, jer prema poglavlju 4.1. boja ne služi kodiranju mjerne informacije, te je dovoljno digitalizirati samo promjenu intenziteta. Neki laserski sustavi koriste i fotoosjetljive senzore koji su u stanju digitalizirati i boju te teksturu površine, ali time ne doprinose točnosti uređaja, već mogućnost digitalizacije boje služi prvenstveno za digitalizaciju teksture površine doprinoseći pritom ukupnom vizualnom dojmu. 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. 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 sa elemenata slike. Analogni LPED detektori opisuju položaj projicirane zrake na fotoosjetljivu površinu promjenom jakosti struje inducirane na dvije okomite osi velike silicijske diode. Ovaj se tip detektora može poistovjetiti sa monolitičkim CCD čipom, koji može digitalizirati položaj intenzitetno kodiranog signala unutar vremenskog intervala od 50-100 [μs], te zbog ovako velike brzine odziva omogućuju višestruko očitavanje istog stacionarnog signala doprinoseći time smanjenju šuma u rezultatu. Prema [22]**,** linearnost odziva definirana je unutrašnjim fizičkim karakteristikama diode (npr. gustoćom struje, debljinom, otporom i temperaturom) i može varirati po površini diode, dok nelinearnost postaje izraženija prema rubovima i uglovima diode.

Utjecaj optičkih elemenata. Ovaj je utjecaj potrebno promatrati s obzirom na vrstu svjetla koje prolazi kroz optičke elemente objektiva. Poznato je da koherentno monokromatsko svjetlo prilikom kontakta sa površinom stvara efekt zrnatosti, čija će raspodjela ovisiti o utjecaju optičkih elemenata projektora i hrapavosti površine. Prema [37], potrebno je zasebno analizirati zrnatost uzrokovanu projekcijom koherentnog svjetla (eng. o*bjective speckle*) i zrnatost uzrokovanu digitalizacijom reflektirane komponente projicirane zrake svjetla (eng. *subjective speckle*). Ovisno o količini svjetla koju blenda propušta na fotoosjetljivo područje korištenog fotodetektora varirati će i utjecaj zrnatosti na detektiranu raspodjelu svjetloće projicirane zrake, a time i na mogućnost preciznog određivanja položaja mjerne točke. Za veće promjere upadne zrake zrnatost će više utjecati na slikovnu raspodjelu svjetloće. Istovremeno, veći otvor blende uzrokovati će efekt usrednjivanja reflektirane zrake te će zrnatost imati manji utjecaj na slikovnu definiciju mjerne točke. Međutim, veliki otvor blende istovremeno smanjuje dubinsku oštrinu slikovnog preslikavanja, što smanjuje primjenjivost na većim, odnosno promjenljivim predmetnim udaljenostima. Prema istom izvoru, smanjivanjem promjera projicirane zrake, a time i promjera točke na mjernom objektu, te smanjivanjem otvora blende, utjecaj zrnatosti na raspodjelu svjetloće se smanjuje.

S obzirom na efekt promjene puta zrake prilikom prolaska kroz neki optički sustav razlikujemo sedam vrsta aberacija svjetlosne zrake (sferna, kromatska, lateralna kromatska, "coma", astigmatizam, "field curvature", "curvilinear distortion"). U fotogrametriji se uobičajeno modelira efekt radijalne distorzije [63] (poglavlje 4.1 i 4.2), koji se pojavljuje u vidu distorzije snimljene slike, te model distorzije uzrokovane fizičkom montažom leća u objektivu, koja uzrokuje pomak slikovne koordinate glavne točke snimke H (slika 22.) iz središta objektiva (eng. *decentring ditorsion*).

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 sa materijalnim i geometrijskim svojstvima površine, ali i s obzirom na utjecaj lokalnog toplinskog izvora unutar konstrukcije mjernog senzora. Pritom je prilikom konstrukcije mjernog senzora potrebno odabrati izvor odgovarajućeg intenziteta kako bi se minimalizirali utjecaji okolišnjeg osvjetljenja, te interakcija projiciranog svjetla sa mjernim objektom. Budući da su laserske zrake izrazito prostorno i vremenski koherentne, prema [37] 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. Valnu duljinu i promjer izvora koherentnog svjetla stoga je potrebno tako odabrati, da se položaj u kojem je projicirana zraka usko fokusirana poklapa sa predmetnom udaljenošću mjernog objekta. Prema istom izvoru, laserske zrake koje su na izlazu iz izvora imale veći promjer pokazati 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 nemaju izražen efekt zrnatosti prilikom osvjetljavanja površine, ali intenzitet projiciranog svjetla puno brže opada u ovisnosti od udaljenosti od mjernog objekta s obzirom na nekoherentne izvore. Stoga se senzori sa nekoherentnim izvorima svjetla uobičajeno koriste na manjim predmetnim udaljenostima od laserskih.

Utjecaj pomičnih elemenata. Projekcijski sustavi u usporedbi sa kontaktnim TMU-ima sastoje se od malenog broja gibljivih elemenata, ili ih uopće nemaju. Pritom se ovdje misli na one elemente konstrukcije koji mijenjaju svoj položaj samo tijekom procesa mjerenja, izuzimajući pritom pomične dijelove koji su za vrijeme mjerenja fiksirani (npr. pomični 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* 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 princip projiciranja (poglavlje 4.1.) proizlazi da upravo o vremenski i prostorno kontroliranom pomaku stakalca sa rasterskom strukturom vremenskog faznog pomaka i Gray koda ovisi točnost rješavanja problema jednoznačnosti. Pritom je

važno tijekom cijelog procesa mjerenja 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. 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 ne određuje međusobni razmak i raspodjelu mjernih točaka u izmjerenom oblaku, ali izravno utječe na točnost i ponovljivost mjerenja. Radi potpunosti, spomenimo da danas postoje i izvedbe projekcijskih skenera baziranih na nekoherentnom izvoru svjetla koji nemaju mehanički pomične dijelove, već se kontrolirana promjena projicirane svjetlosne strukture provodi korištenjem LCD sustava [64], te kod njih nema niti spomenutog utjecaja pomičnih elemenata.
Laserski sustav Cyberware korišten u ovom radu ima fiksnu postavu ogledala i kamere dok se za kontrolirani pomak mjernog objekta u smjeru osi *x* prema slici 6.3 koristi translacijski stol (koji uz translatorna može prema potrebi vršiti i rotacijska gibanja). Prilikom translatornog gibanja, brzina gibanja stola uvjetuje prostornu rezoluciju točaka u smjeru pomaka. Preciznost vođenja definirati će samo promjenu u gustoći točaka, ukoliko ta nejednolikost pomaka ne dovede do pojave vibracija, čemu može doprinijeti i činjenica što stol nema riješen prihvat mjernog objekta, već se mjerni objekt na njega oslanja slobodno. Pomak stola sa mjernim objektom u smjeru osi *y* izvodi se preko ručnog sustava koloturnika i to prema potrebi, ukoliko su dimenzije mjernog objekta prevelike da stane u trenutno vidno polje ovog senzora.

- *Utjecaj načina definiranja mjerne točke i mjernog volumena*

U širem smislu, pod utjecajem načina definiranja mjerne točke misli se na utjecaj geometrije mjernog senzora 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. Pritom je proces definiranja mjerne točke zapravo dinamička pojava čiji utjecaj nije dovoljno promatrati samo sa stajališta matematičkog modela. S obzirom na način definiranja mjerne točke, oba projekcijska sustava korištena u ovom radu položaj mjerne točke određuju triangulacijom njenog položaja relativno u odnosu na elemente mjernog senzora. Konvergentnost orijentacije, trenutno vidno polje svake od kamera i međusobni razmak kamera definirati će očekivani iznos pogreške triangulacije, što je prikazano u poglavlju 4.2. Istovremeno, zbog konvergentne orijentacije kamera moguća su zasjenjenja kamere ili projiciranog svjetlosnog snopa, što utječe na kvalitetu, broj i raspodjelu točaka po volumenu [3,65]. U tom smislu potrebno je promatrati i interakciju projiciranog svjetlosnog snopa sa površinom mjernog objekta. Primjerice projiciramo li uski snop laserske zrake na područje ruba objekta, zbog odstupanja slikovnog osjeta od Gaussove raspodjele odlučivanje o njenom položaju samo na osnovi teorije izložene poglavljem 4.3 dovelo bi do pogrešnog zaključka o položaju ruba. Ukoliko pak isti efekt promatramo u prostorno-vremenskom smislu promjene svjetloće koji je upravo za jednu od tipova Cyberware serije laserskih skenera predložio [3], tada će dodatna informacija o tijeku promjene oblika projicirane točke biti dostupna i omogućiti ispravno zaključivanje o položaju mjerne točke na površini mjernog objekta.
Također, kompleksna je i interakcija matematičke definicije projicirane točke sa zahtjevom za preciznim mehaničkim pomakom, koja kod projekcijskih sustava nekoherenentog svjetla zahtijeva izvjesno vrijeme za projiciranje kompletnog svjetlosnog rastera.

Opisane utjecaje definicije mjerne točke je bez pristupa točnom matematičkom modelu i mjernom sustavu koji nema ugrađenih drugih literaturom nedokumentiranih korekcijskih funkcija nemoguće u potpunosti procijeniti.
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 [66]. Laserski skener korišten u ovom radu pritom se oslanja na kombinaciju mehaničkog pomaka i numeričke registracije [66]. Potreba za preciznim pomakom deflektorskog ogledala ovdje je izbjegnuta fiksnom izvedbom izvora i digitalizatorske kamere i uvođenjem dodatnog translatornog gibanja mjernog objekta u smjeru osi *x,* prema slici 6.3. Potreba za kontroliranim mehaničkim pomakom zapravo ga svrstava u rang hibridnih optičko-kontaktnih sustava što mu izravno ograničava primjenu, jer će i elementi sa visokim i sa niskim brojem površinskih detalja biti digitalizirani jednakom brzinom, te stoga i jednakom prostornom rezolucijom.
Projekcijski se sustav *Atos* za spajanje pojedinačnih mjerenja u zajednički oblak točaka koristi referentnim fotogrametrijskim točkama fiksno vezanim za mjerni objekt ili njegovu okolinu. Za orijentaciju trenutnog koordinatnog sustava koristi se pasivnim osjetima za pronalaženje prostornog položaja referentnih točaka. O rasporedu i gustoći referentnih točaka ovisiti će mogućnost digitalizacije kompletnog mjernog volumena, kao i mogućnost pokrivanja detalja sa većim brojem preklapajućih mjerenja, povećavajući time potpunost definicije oblaka točaka. S obzirom na karakteristike mjernih točaka u izmjerenom oblaku [67], pravilno digitalizirani oblak točaka trebao bi sadržavati minimalno potreban broj osjeta za pravilnu numeričku rekonstrukciju željenih geometrijskih karakteristika, vodeći pritom računa o: iznosu šuma u mjernom rezultatu, gustoći mjernih točaka (prostornoj rezoluciji i relativnoj raspodjeli), potpunosti digitaliziranja mjernog volumena, te točnosti s kojom je oblak digitaliziran. Prednost je ovog projekcijskog sustava i što je tijekom mjerenja moguće dodati dodatne referentne točke, ukoliko se za tim pokaže potreba.

- *Utjecaj kalibracije sustava*

Utjecaj kalibracije sustava već je ranije spomenut kao vanjski utjecajni parametar, ali osim unutrašnjih parametara matematičkog modela, zajedničko je optičkim projekcijskim metodama koje su tema ovog rada da se procesom kalibracije izravno definira i područje trenutnog mjernog volumena, te time zbog konačnih dimenzija optičkih detektora i prostorna rezolucija oblaka točaka. Kalibracija se provodi na objektima poznatog oblika i geometrije, ali 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 kod kontaktnih TMU-a prilikom ponavljajućih kontrolnih mjerenja.
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. Verzija projekcijskog sustava *Atos* korištena u ovom radu kalibracijom određuje vanjske i unutrašnje parametre orijentacije kamera i distorzije leća objektiva, dok se relativna orijentacija projektora ne kalibrira.

- *Utjecaj programske podrške*

Ovaj je utjecaj također moguće promatrati s obzirom na njegov unutrašnji i vanjski karakter. Radi se o 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 sa programskim paketima kontaktnih TMU-a [10]. 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.

Provedena diskusija unutrašnjih i vanjskih parametara ukazuje na postojanje velikog broja utjecajnih parametara koji po svom uzroku i smislu djelovanja utječu na mjernu nesigurnost provedenog mjerenja nekim od kontaktnih ili projekcijskih mjernih senzora. Svaki senzor pritom, zbog svojih specifičnosti prouzrokovanih konstrukcijom ili matematičkim modelom imao bi vlastiti smisao navedenih faktora, koji literaturom nisu pokriveni za specifičnosti svakog od senzora. Za potpuno razumijevanje pojedinog diskretnog utjecaja te njihove interakcije stoga bi bilo potrebno serijom pažljivo pripremljenih eksperimenata kojima bi se uzimali u obzir samo specifični utjecaji pojedinog utjecajnog faktora provesti analizu pojedinih utjecajnih parametara za svaki od korištenih senzora. Ovakva analiza bi, kako teoretski, tako i s obzirom na nedostupnost prikladne opreme za takvo iscrpno istraživanje prelazila granice ovoga rada.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Koncepcija eksperimenta

Eksperimentom je potrebno na, u Hrvatskoj trenutno dostupnim predstavnicima aktivnih kontaktnih i projekcijskih mjernih senzora, čiji su teoretski modeli prikazani poglavljem 4, preko usporednih mjerenja prikladnog mjernog objekta prikazati odziv realnih mjernih sustava, vezano uz definiciju unutarnjih i vanjskih parametara koji su prikazani prethodnim poglavljem.

Mjerenja su provedena na slijedećim mjernim sustavima;

- projekcijski sustav nekoherentnog strukturiranog svjetla "*Atos*", dostupan u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku pri Katedri za eksperimentalnu mehaniku FSB, Zagreb,
- projekcijski sustav koherentnog laserskog svjetla "*Cyberware Mini-model Shop 3030RGB/HIREZ/MM*", dostupan u Centru za proizvodne postupke d.o.o, Heinzelova 60, Zagreb,
- kontaktni trokoordinatni mjerni uređaj "*Ferranti Merlin 750*", dostupan u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina pri Katedri za mjerenja i kontrolu FSB, Zagreb.

S obzirom na činjenicu da se u svakodnevnoj praksi na navedenim senzorima digitaliziraju realni elementi strojarskih konstrukcija, eksperimentalni dio ovog rada zamišljen je tako da se odabir mjernog objekta izvrši na osnovu konkretnih geometrijskih i materijalnih zahtjeva, s naglaskom na rješavanje nekog konkretnog praktičnog tehničkog problema.

Postavljeni zahtjevi na odabir mjernog objekta s obzirom na geometrijske karakteristike odnosili su se na slijedeće zahtjeve:

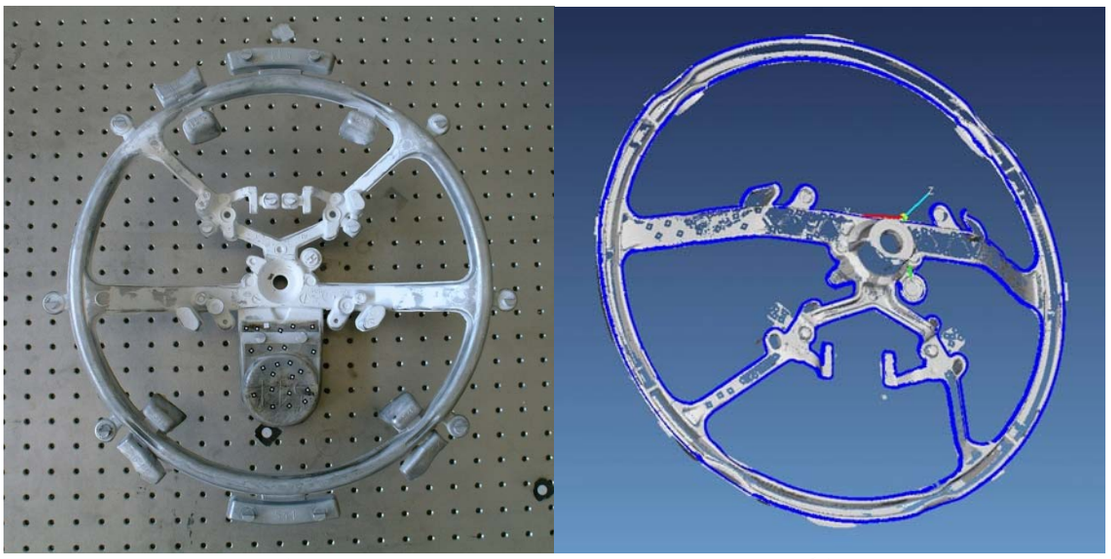
- mjerni objekt treba zauzeti takav mjerni volumen koji su u stanju digitalizirati svi dostupni senzori, bez obzira na potrebne specifične zahvate koje je prilikom pripreme mjerenja na njima potrebno izvršiti,
- mjerni objekt treba biti takovog volumena i mase da se omogući manipulacija i prihvat unutar mjernog volumena mjernog uređaja,
- oplošje mjernog objekta treba sadržavati kontinuirane plohe i područja naglih diskontinuiteta,
- poželjno je da površina mjernog objekta sadržava raznolike površinske artefakte:
    - provrte,
    - slijepe rupe,
    - nagle diskontinuitete,
    - glatke plohe,
    - oštre rubove,
    - zakrivljena, udubljena i ispupčena područja, i sl.

Zahtjevi materijala mjernog objekta:

- termički stabilan u uvjetima laboratorijskih mjerenja,
- neosjetljiv na izravan kontakt,
- neosjetljiv na eventualno tretiranje površine bojom.

Sukladno gornjim geometrijskim i materijalnim zahtjevima, kao mjerni objekt čija će se geometrija ovdje digitalizirati odabran je sirovi aluminijski odljevak volana upravljačkog mehanizma, svjetski poznatog proizvođača automobila, slika 49.a.

Volan je diskretna i vitka konstrukcija okvirnog promjera 370 [mm] i visine 125 [mm], sa jednom naglašenom izbočenom i udubljenom stranom, sa velikim brojem uskih slobodno definiranih površina i lokalnih površinskih artefakata, te zamršenom prostornom krivuljom srha. Srh je nastao na spojnom mjestu kalupa kao posljedica lijevanja materijala u dvodijelni kalup, a koncentriran je u obliku uske trake materijala po vanjskom i unutrašnjem obodu po svakoj od četiri poprečne spojnice koje spajaju vanjski obruč sa centralnim dijelom, te zaostalih dijelova uljevnog sustava. Radi lakše vizualizacije ovog problema, simulacija položaja i oblika prostorne krivulje srha prikazana je plavom krivuljom na slici 49.b.



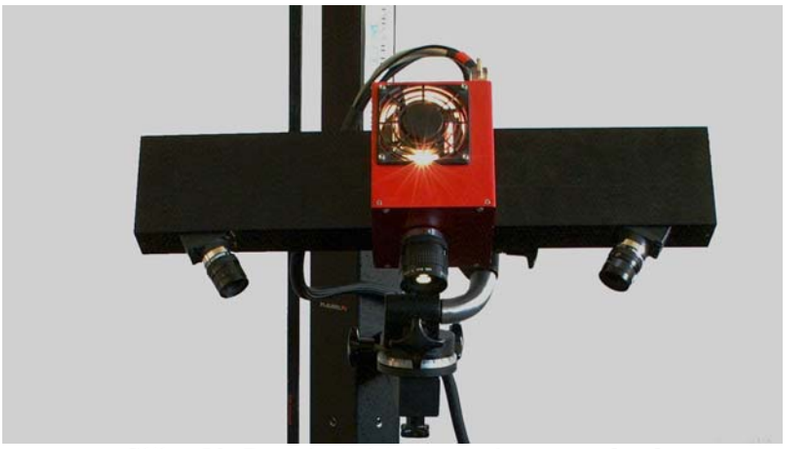
a) b)

Slika 49. a) odabrani mjerni objekt, b) simulacija položaja krivulje srha

Problem koji je pritom bilo potrebno riješiti [68] je kako na temelju digitalizacije sirovog odljevka volana (slika 49.a.) ocijeniti prikladnost navedenih mjernih sustava, kao i njihovih temeljnih principa s obzirom na unutarnje i vanjske faktore, primijenjeno na praktičnom problemu određivanja konture srha (slika 49.b.), te položaja i geometrije ploha na koje će se prilikom postupka krzanja srha oslanjati sirovi odljevak. Površina digitalizirana ovim senzorima treba sadržavati dovoljan broj informacija o geometriji mjernog objekta kako bi se iz oblaka točaka mogao konstruirati alat kojim će se omogućiti kvalitetan prihvat mjernog objekta u rekonstruiranom alatu, te stabilno oslanjanje i pravilno krzanje srha.

6.2. Prikaz proizvođačkih specifikacija korištenih mjernih sustava

6.2.1 Projekcijski sustav Atos



Slika 50. Projekcijski sustav *Atos standard*

Proizvođačke specifikacije:

- Mjerni volumen 135x108x108 do 350x280x280 [mm³]
- Predmetna udaljenost 500 – 1200 [mm]
- Gabariti senzora 610x160x125 [mm³]
- Brzina mjerenja 440 000 točaka u 8 sekundi
- Prostorna rezolucija 0.1 do 0.5 [mm]
- Mjerni šum 0.007 – 0.02 [mm]
- Verzija mjernog softvera: 4.4.7

Napomena: Korišteni sustav *Atos standard* je prva verzija u seriji sustava *Atos*, te danas postoje slijedeće varijante:

- Atos Standard,
- Atos II,
- Atos II Small Objects,
- Atos III,
- Atos III Small Objects,

čije su detaljne specifikacije dostupne na internet adresi http://www.gom.com.

6.2.2. Laserski sustav Cyberware Mini-model shop 3030RGB/HIREZ/MM



Slika 51. Laserski sustav Cyberware Mini-model shop 3030RGB/HIREZ/MM

Proizvođačke specifikacije:

- Vidno polje
  - X = 250 [mm] ili kut kod rotacije mjernog objekta = 360°
  - Y = 130 [mm] na minimalnoj visini Z
  - Y = 170 [mm] na maksimalnoj visini
  - Z = 150 [mm]

- Prostorna rezolucija
  - Pomak u smjeru osi X ovisi o brzini platforme; tipično 30 osjeta/sekundi za posmak platforme od 150 [µm] - 1.0 [mm]
  - Y = 313 [µm]
  - Z ovisi o kvaliteti površine, tipično od 50-200 [µm]

- Mogućnost digitalizacije teksture površine, 8 bitova za svaku od komponenata RGB boje

- Brzina akvizicije 14,580 točaka u sekundi sa istovremenim snimanjem teksture

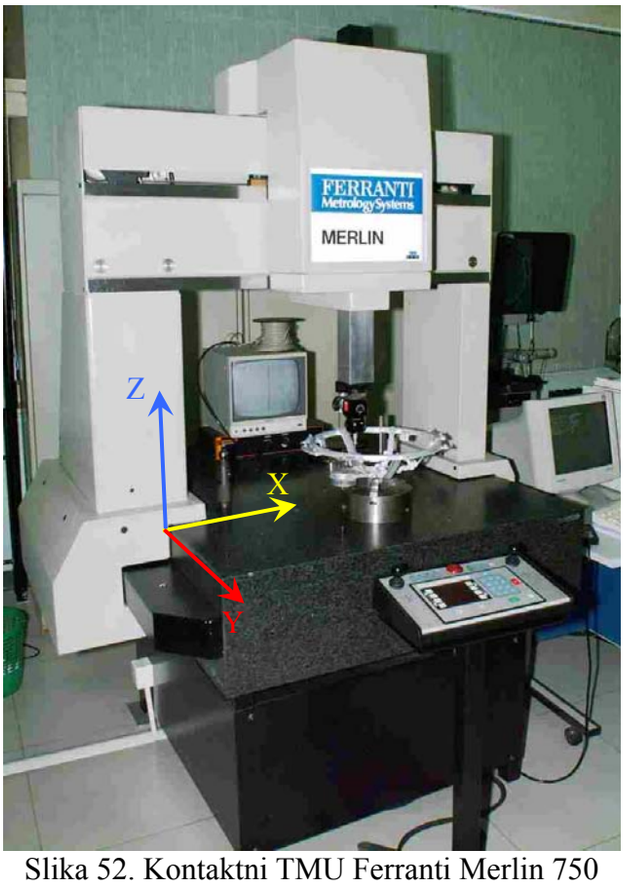
- Mjerni volumen:
  - Širina 510 [mm]
  - Visina 365 [mm]
  - Dubina 480 [mm]
  - Najveća dopuštena masa mjernog objekta 29 [kg]

- Gabariti uređaja:
  - Širina 738 [mm]
  - Visina 813 [mm]
  - Dužina 825 [mm]
  - Masa 92.3 [kg]

- Pomaci u cilindričnom i linearnom modu (prema slici 51.)
  - X = 0 [mm]-350 [mm] Električni servo-motor
  - Y = 0 [mm]-350 [mm] Ručno pozicioniranje, sa kalibriranim zaustavnim pozicijama stola
  - Z = 0 [mm]
  - Zakret okretnog stola = 0°-360° Električni servo-motor

- Općenito:
  - Prijenos podataka SCSI / USB
  - Ploha svjetla Vertikalna u YZ ravnini
  - Zahtjevi okoliša Normalni uredski ili laboratorijski uvjeti

6.2.3. Kontaktni trokoordinatni mjerni uređaj Ferranti Merlin 750



Slika 52. Kontaktni TMU Ferranti Merlin 750

Proizvođačke specifikacije:

- Gabariti mjernog prostora x*y*z = 750 * 750 * 500 [mm^3]
- Mjerni sustav optoelektronički, razlučivosti 0.5 [µm]
- Granična pogreška mjerenja duljine u smjeru osi ± (4+L/275) [µm], a u prostoru ± (5+L/150) [µm], pri čemu je L izražen u [mm]
- Ponovljivost mjerenja 2 [µm]
- Mjerna glava Renishaw Ph9
- Tlak zraka 5 [bar]

6.3. Opis postupka i rezultata mjerenja

6.3.2. Mjerenje sa projekcijskim sustavom ATOS

- Postava senzora:
  - optička postava senzora sastoji se od dvije 8-bitne monokromatske (eng. grayscale) kamere "Sony XC-75CE" dimenzija čipa 752x582 piksela, od kojih je svaka opremljena objektivom žarišne duljine f_k = 12 [mm]
  - objektiv na projektoru žarišne duljine f_k = 6 [mm]
  - sustav je kalibriran standardnim planarnim kalibracijskim objektom dimenzija 200x160 [mm^2]

  Navedena postava omogućila je trenutno vidno polje dimenzija ekvivalentnih veličini kalibracijskog objekta, sa prostornom rezolucijom od cca 0.25 [mm] na predmetnoj udaljenosti od oko 380 [mm], mjereno od bazne linije senzora.

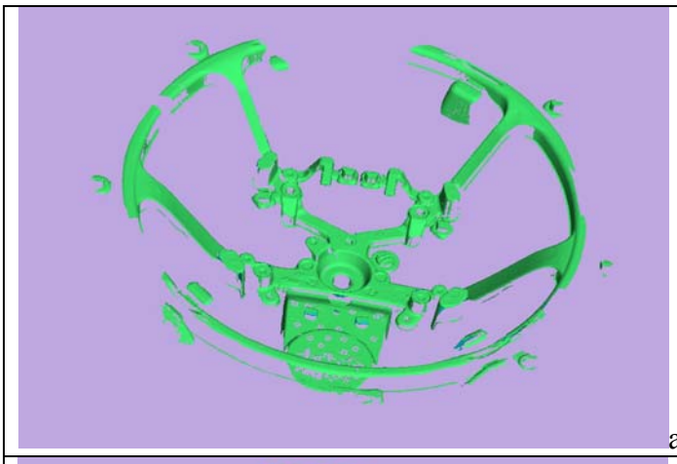
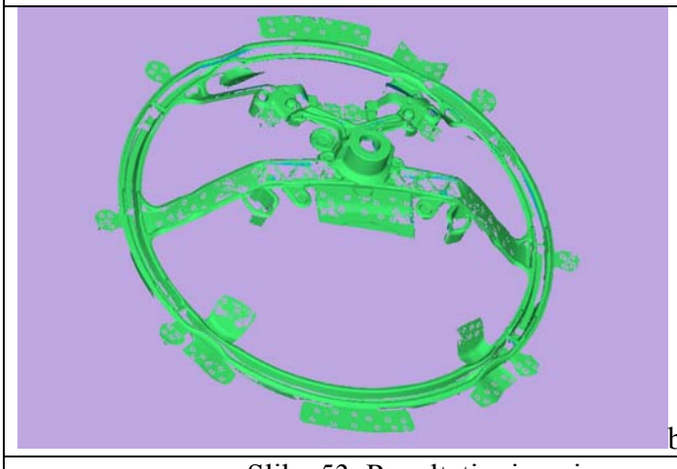
- Postava mjernog objekta

  Mjerni objekt izrađen od aluminija imao je izraženu zadovoljavajuće ujednačenu mat površinu, ali se preliminarnim mjerenjem pokazalo da za zadane uvjete okolišne rasvjete i snage projektora od 250 [W] ne reflektira dovoljni intenzitet difuzne komponente svjetla, te je stoga površina tretirana tankim slojem bijelog titan-dioksida u obliku spreja (Standard-Chek, proizvođača *Helling*).
  U svrhu omogućavanja registracije trenutnih orijentacija mjernog senzora u odnosu na mjerni objekt pripremljen je nosač mjernog objekta na koji su nalijepljene fotogrametrijske točke. Nosač je zapravo ravna ploča na koju su postavljeni objekti različitih visina i oblika, oblijepljeni referentnim točkama (bijela točka na tamnoj podlozi promjera 2 [mm]).

- Mjerenje

  Pripremljeni nosač mjernog objekta najprije je fotogrametrijski snimljen pomoću prethodno kalibriranog projekcijskog senzora *Atos* (ovaj se postupak inače provodi klasičnim fotogrametrijskim kamerama i sustavom *Tritop,* ali se je zbog nedostatka prikladnih kalibracijskih štapova za sustav *Tritop* ovdje primijenilo mjerenje senzorom *Atos* sa ugašenim projektorom). Provedenim postupkom određene su prostorne koordinata referentnih točaka, te je potom na nosač pažljivo pričvršćen mjerni objekt, pazeći da ne dođe do doticanja objekta ili mjeritelja sa nosačem i fotogrametrijskim točkama koje bi dovelo do njihovog pomaka.
  Uslijedio je postupak mjerenja površinske geometrije projiciranjem strukturiranog rastera mjernim senzorom *Atos*. Provedena su dva mjerenja, jedno za kompletnu ispupčenu, a drugo za kompletnu udubljenu stranu odljevka volana.
  Nakon provedenog mjerenja snimljene slike su dodatno obrađene kako bi se dobio kompletni oblak objektnih točaka za obje orijentacije mjernog objekta.
  Mjerenje je provedeno u uvjetima polovično zamračene prostorije osvijetljene dnevnim svjetlom bez dodatnih izvora svjetla pri temperaturi zraka od 25°C i vlažnosti od 70%. Mjerenje i obradu mjerenja proveo je autor ovog rada.

- Rezultati

 a)	⇒ Udubljena strana ⇒ 22 mjerenja ⇒ cca 710,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 2[h]
 b)	⇒ Ispupčena strana ⇒ 75 mjerenja ⇒ cca 1,500,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 5[h]

Slika 53. Rezultati mjerenja sa projekcijskim sustavom *Atos*

6.3.3. Mjerenje sa projekcijskim sustavom Cyberware

- Postava senzora

  Fiksna postava ovog senzora omogućuje samo promjenu brzine i posmaka mjernog stola, tj. brzine translacije u smjeru osi *x* prema slici 52. ili rotacije (koja ovdje nije korištena) mjernog stola električnim servo motorom, te njegovo ručno spuštanje (u smjeru osi *y*) u prethodno određene položaje. Pomak u smjeru osi *z* nije moguć. Projicirana ploha svjetla je fiksna u odnosu na mjerni senzor i nalazi se u vertikalnoj YZ ravnini.

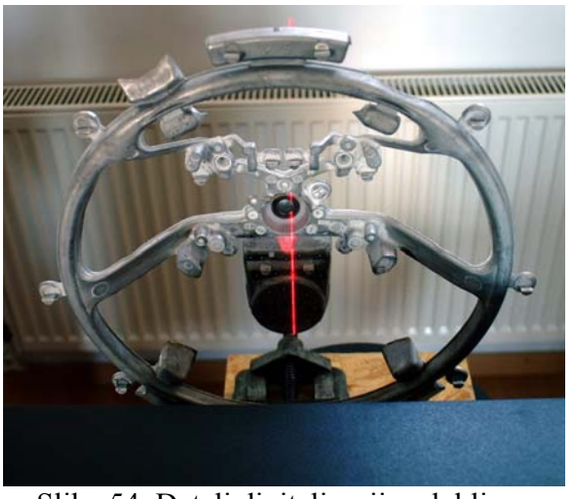
- Postava mjernog objekta

  Prema subjektivnoj procjeni mjeritelja, površina mjernog objekta imala je zadovoljavajuća optička svojstva za digitalizaciju projiciranjem koherentnog laserskog snopa svjetla, te ju stoga nije bilo potrebno dodatno tretirati. Volan je bio na jednom kraju vanjskog obruča učvršćen stegom, kao što se vidi na slici 51.

- Mjerenje

  Izvršena su zasebna mjerenja udubljene i ispupčene strane mjernog objekta, prema slikama 54. i 55. Senzor je u smjeru osi *x* limitiran posmakom mjernog stola od 250 [mm], te je stoga zasebno snimljena lijeva, a zasebno desna strana udubljene i ispupčene strane volana. Ograničenje vidnog polja po visini zahtijevalo je tri mjerenja, prvo je izvršeno u najvišoj poziciji mjernog stola te je potom ručno preko sistema koloturnika stol spuštan još dva puta u kalibrirane pozicije. Mjerenja iz svakog od položaja po vertikali spojio je upravljački programski paket, uz provođenje korekcije visine stola. Brzina posmaka stola u smjeru osi *x* postavljena je tako da prostorna rezolucija bude cca 0.3 [mm], a naknadno je provedeno i mjerenje centralnog udubljenog dijela volana sa posmakom od 0.5 [mm]. Mjerenje je provedeno u uredskim prostorijama osvijetljenim pozadinskim prirodnim dnevnim svjetlom pri temperaturi od 25°C. Podaci o vlažnosti zraka nisu poznati.

  Mjerenje je izvršio djelatnik Centra za proizvodne postupke, dipl. ing. K. Curić.

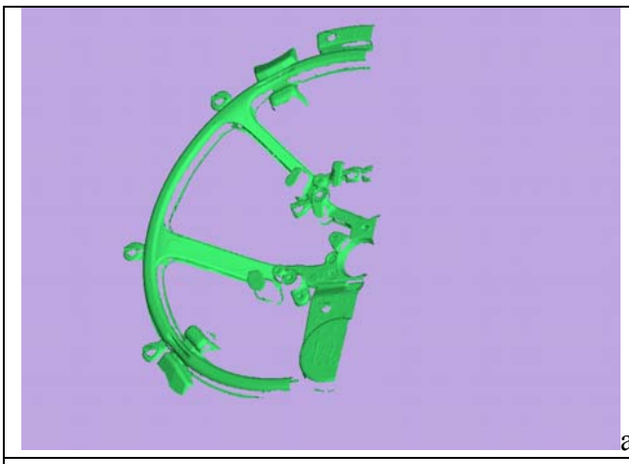


Slika 54. Detalj digitalizacije udubljene strane



Slika 55. Detalj digitalizacije ispupčene strane

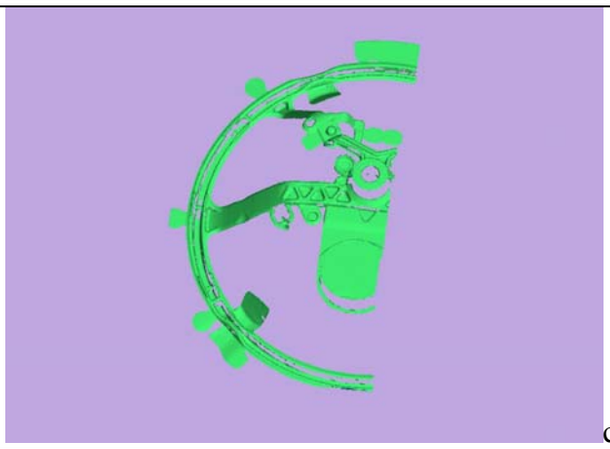
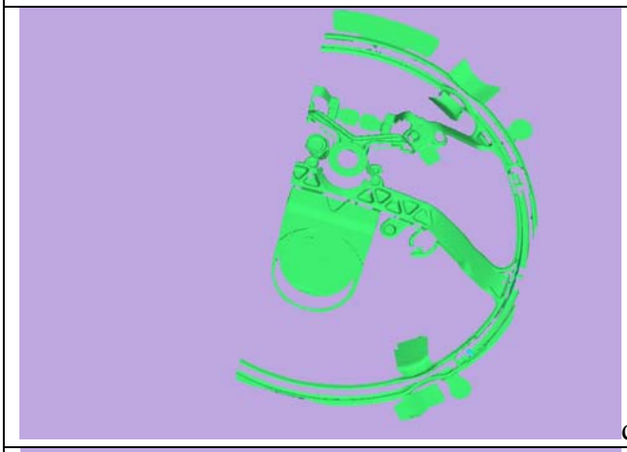
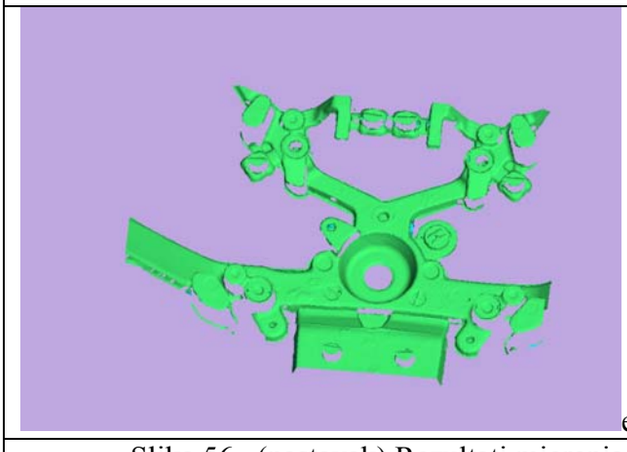
- Rezultati



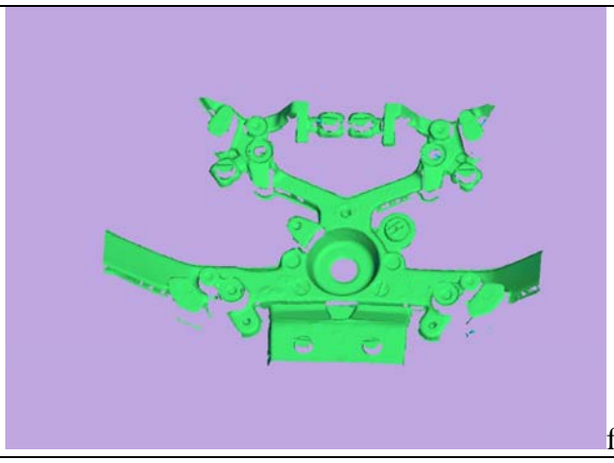
a)

⇒ Udubljena strana, lijeva polovina
⇒ Rezolucija u smjeru osi *x* 0.3[mm]
⇒ cca 300,000 točaka
⇒ vrijeme mjerenja cca 10min

Slika 56. Rezultati mjerenja sa projekcijskim sustavom Cyberware

 b)	⇒ Udubljena strana, desna polovina ⇒ Rezolucija u smjeru osi *x* 0.3 [mm] ⇒ cca 300,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 10min
 c)	⇒ Ispupčena strana, lijeva polovina ⇒ Rezolucija u smjeru osi *x* 0.3 [mm] ⇒ cca 330,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 10min
 d)	⇒ Ispupčena strana, desna polovina ⇒ Rezolucija u smjeru osi *x* 0.3 [mm] ⇒ cca 350,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 10min
 e)	⇒ Centralni dio udubljene strane, ⇒ Rezolucija u smjeru osi *x* 0.3 [mm] ⇒ cca 160,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 3min

Slika 56. (nastavak) Rezultati mjerenja sa projekcijskim sustavom Cyberware

 f)	⇒ Centralni dio udubljene strane, ⇒ Rezolucija u smjeru osi *x* 0.5 [mm] ⇒ cca 100,000 točaka ⇒ vrijeme mjerenja cca 3min

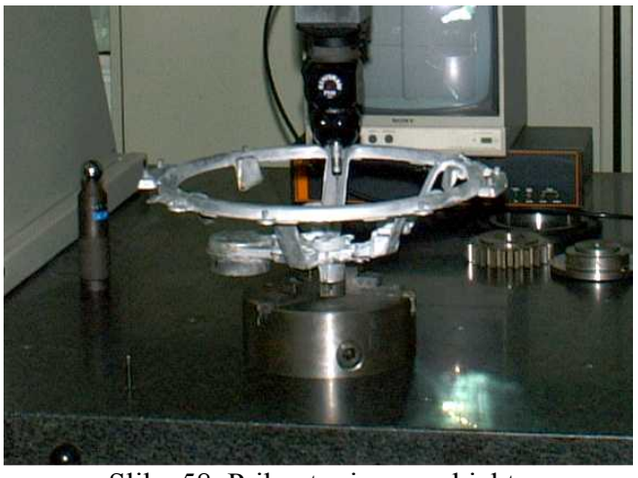
Slika 56. (nastavak) Rezultati mjerenja sa projekcijskim sustavom Cyberware

6.3.1. Mjerenje sa TMU Ferranti Merlin 750

- Postava senzora
  - Kontaktni TMU Ferranti Merlin 750 opremljen je zakretnom trigger mjernom glavom Renishaw Ph9 sa kuglastim ticalom promjera 2 [mm],
  - Dinamički promjer glave ticala kalibriran je na čeličnom kalibru (kugli) RET 138-34 promjera 30 [mm] slika 57., i iznosio je 1.997 [mm].



Slika 57. Kalibracija ticala kuglastim kalibrom



Slika 58. Prihvat mjernog objekta

- Postava mjernog objekta

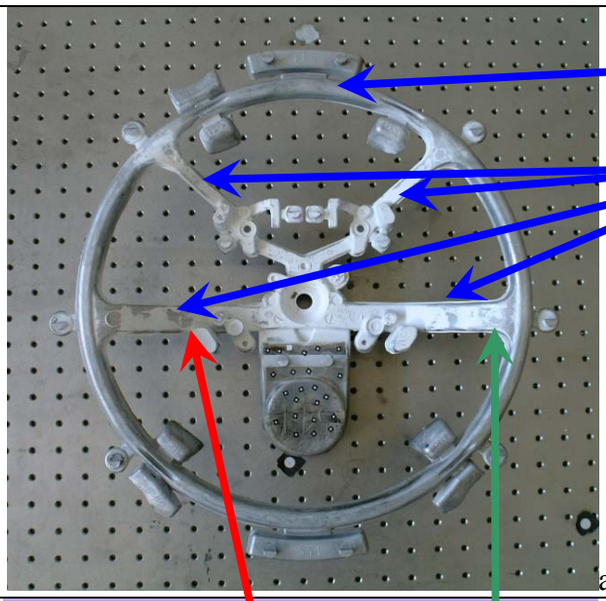
  Mjerni objekt učvršćen je u tri točke, prema slici 58, pomoću teške okrugle stege (poznatije kao amerikaner glava koja se koristi kod tokarskih strojeva), čime je postignuto čvrsto temeljenje mjernog objekta. Smješten je u sredinu mjernog volumena kontaktnog TMU-a, tako da se položaj oslonca poklapao sa prethodnim položajem kalibracijske kugle. Na mjestima planiranog kontakta s ticalom površina mjernog objekta očišćena je benzinom.

- Mjerenje

  Postupak mjerenja kod ovog mjernog uređaja može teći na dva načina, kontaktom u proizvoljnoj točci, pri čemu mjeritelj preko upravljačkog uređaja proizvoljno navodi vrh ticala, ili programiranim gibanjem u jednoj ravnini, pri čemu senzor sam pronalazi površinu mjernog objekta. Provedena mjerenja izvršena su preko funkcije programiranog gibanja: najprije je ručno definiran položaj početne točke, iz koje je potom u zadanoj ravnini i zadanom smjeru sa zadanim korakom mjerni uređaj ticalom automatski "tražio" površinu mjernog objekta. Ovaj postupak automatskog skeniranja površine kod navedenog uređaja zapravo traje u dvije faze: u prvoj fazi se vrši orijentacijsko pronalaženje površine, da bi u drugoj izvršio mjerenje ponavljajući prethodno definirano gibanje. Mjerenje je provedeno pri temperaturi zraka od 20°C i vlažnosti od 50%.

  Postupak kalibracije, programiranja uređaja i mjerenje proveo je dipl. ing. S. Medić, djelatnik Katedre za mjerenja i kontrolu pri FSB.

- Rezultati

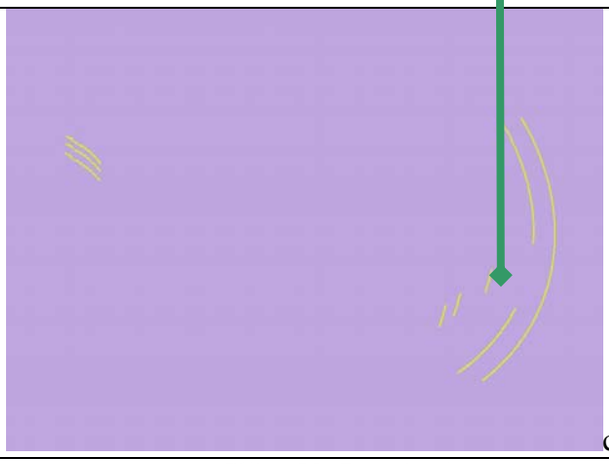


a)



b)

⇒ 9 uzdužnih presjeka na lijevoj unutrašnjoj spojnici
⇒ ukupno 689 točaka
⇒ vrijeme mjerenja cca 2[h]



c)

⇒ 9 presjeka:
- o tri linije oboda
- o dvaput po tri linije unutrašnje lijeve i desne spojnice

⇒ ukupno 574 točke
⇒ vrijeme mjerenja cca 3[h]

Slika 59. Rezultati mjerenja sa TMU Ferranti Merlin 750

7. RASPRAVA

Interpretacija rezultata mjerenja, prikazanih poglavljem 6.3 provesti će se s obzirom na utjecaj vanjskih i unutrašnjih faktora. Na usporednoj diskusiji mjernih senzora baziranoj na teoretskim postavkama poglavlja 5. prikazati će se za vrijeme procesa mjerenja zamijećeni utjecaji i međusobne interakcije pojedinih utjecajnih faktora.

7.1. Utjecaj vanjskih faktora

- Geometrijske karakteristike mjernog objekta;

  - Utjecaj dimenzija mjernog objekta

    ⇒ Mjerni volumen korištenog TMU-a po svojim je gabaritima daleko veći od volumena koji zauzima odabrani mjerni objekt, što omogućava prihvat mjernog objekta u proizvoljnom broju orijentacija koje su potrebne da bi se ispunili zahtjevi mjernog zadatka. S tim u vidu, tijekom procesa mjerenja nije bilo potrebno vršiti preinake na mjernom uređaju radi promjene mjernog volumena.

    ⇒ Projekcijskom sustavu *Atos* trenutni mjerni volumen definiran je postupkom kalibracije od cca 200x160x140 [mm^3], a odabran je tako da prostorna rezolucija mjerenja bude otprilike 0.25 [mm]. Mjerni objekt je po svojim gabaritima premašivao veličinu trenutnog mjernog volumena te je bilo nužno osigurati veći mjerni volumen korištenjem fotogrametrijskih referentnih točaka. S obzirom na veličinu mjernog volumena, objekt je uspješno digitaliziran u svim onim točkama koje su bile neophodne za jednoznačno definiranje zahtijevanih geometrijskih karakteristika, kao što je prikazano osjenčanim oblacima točaka na slici 53. a i b.

    ⇒ Trenutni mjerni volumen laserskog sustava također je zbog konstrukcijske izvedbe senzora manji od ukupnog volumena mjernog objekta, što je djelomično moguće kompenzirati kontroliranim vertikalnim pomakom mjernog stola. Zbog ograničenja translatornog posmaka mjernog stola u smjeru osi *x* od samo 250[mm] uspješno je digitalizirana tek po jedna polovica udubljene, odn. ispupčene strane volana, što je ilustrirano slikom 56. a-d. Svaka polovica ispupčene odn. udubljene strane digitalizirana je sa tri posmaka u vertikalnom smjeru.

  - Utjecaj površinske geometrije

Površinska geometrija zadanog mjernog objekta iznimno je komplicirane geometrije uslijed postojanja iznimno uskih, zakrivljenih, ispupčenih i udubljenih ploha, te velikog broja lokalnih površinskih artefakata.

⇒ Postojanje dijelova uljevnog sustava smanjuje pristupnost mjernog ticala, te zahtijeva korištenje čim manjeg promjera ticala. Korišteni TMU bio je opremljen trigger glavom koja zahtijeva postojanje dovoljnog slobodnog područja oko mjernog objekta kako bi se ticalo moglo vratiti u inicijalni neotklonjeni položaj. Pomak koji pritom vrši definiran je programskim parametrima. Ukoliko bi se definicija srha pokušala provesti s vanjske ispupčene strane, uslijed utjecaja površinske geometrije javio bi se problem dostupnosti unutrašnje, udubljene strane.

⇒ Utjecaj površinske geometrije i kod projekcijskog sustava *Atos* treba promatrati u smislu načina definicije mjerne točke, budući da će nagli diskontinuiteti i postojanje oštrih kutova i rubova (upravo slučaj kod srha) utjecati na vidljivost i zasjenjenost slikovnog osjeta objektne koordinate u pojedinoj kameri. Sukladno ovim zahtjevima potrebno je provesti postupak planiranja mjerenja kojim će se definirati dovoljan broj referentnih točaka kako bi se povećala pristupnost površini mjernog objekta, te dostupnost zasjenjenih dijelova površine.

⇒ Prethodno opisani utjecaji vrijede i za projekcijski skener koherentnog laserskog svjetla, jer površinska geometrija na isti način utječe na vidljivost i dostupnost pojedinih dijelova površine.

- Utjecaj lokalnih svojstava površine

  Površina mjernog objekta bila je glatka, bez izraženih lokalnih površinskih grešaka kojima bi mogla utjecati na definiciju mjerne točke nekom od korištenih metoda.

- Materijalne karakteristike mjernog objekta

  Mjerni objekt napravljen je od lake aluminijske legure te svojom masom nije predstavljao problem u smislu oslanjanja kod kontaktnog TMU-a i projekcijskog sustava *Atos*, kao ni uslijed potrebe kontroliranog pomicanja kod digitalizacije laserskim mjernim sustavom. Procjena interakcije glave ticala sa površinom na temelju dostupnih podataka ovdje se ne može iznijeti.

- Optičke karakteristike mjernog objekta

  Preliminarnim mjerenjem nekoherenim sustavom *Atos,* zaključeno je da optička svojstva površine mjernog objekta ne odgovaraju Lambertskoj difuznoj svjetlosnoj fronti, pa je za potrebe mjerenja površina tretirana tankim slojem bijelog titan-dioksida u obliku spreja.

- Okolišni utjecaji;

  Sva su mjerenja provedena u kontroliranim uvjetima uz zadržavanje stacionarnosti lokalne sobne (laboratorijske) temperature, te intenziteta osvjetljenja. U bližoj okolici mjernih uređaja nije bilo vanjskih izvora buke ni vibracija.

- Tehnološki utjecaji;

  - Definicija mjernog zadatka

    Mjerni zadatak postavljen šestim poglavljem zahtijeva digitalizaciju mjernog objekta nepoznate geometrije za koju u trenutku zadavanja mjernog zadatka nije postojala nikakva tehnička dokumentacija. Kako bi se u potpunosti provela simulacija realne potrebe digitalizacije nekog konstrukcijskog elementa proizvoljne geometrije od mjeritelja je zahtijevano da on sam, na osnovu vlastitog mjeriteljskog iskustva za zadani mjerni senzor definira mjerni zadatak. Postupak podrazumijeva rješavanje načina prihvata mjernog objekta te diskretizaciju geometrije u onim točkama preko kojih će se sa dovoljnom pouzdanošću omogućiti rekonstrukcija nalijegne površine i linija krzanja srha.

    ⇒ Uvriježeni način definicije mjernog zadatka kod kontaktnih TMU zahtijeva definiciju zamjenske geometrije. Radi se o postupku kod kojeg se mjerni volumen segmentira u one primitivne krivulje koje će omogućiti provođenje programiranja putanje vrha mjerne glave na što jednostavniji način. Prilikom definiranja mjernog zadatka u konzultaciji sa mjeriteljem geometrija ovog mjernog objekta diskretizirana je na slijedeće elemente: četiri površine duž svake od spojnica unutrašnjeg i vanjskog obruča te kružnicu duž vanjskog i unutrašnjeg oboda i linije uzduž spojnica sa vanjskim obručem, prema slici 59.a. Ostatak površinskih artefakata je zanemaren kao nebitan za zadovoljenje ovog mjernog zadatka.

    ⇒ Principijelno sličan postupak proveden je i prilikom definicije mjernog zadatka za obje projekcijske metode te je pregledom krivulje srha i zahtijevanog položaja površinskih dosjeda odlučeno provesti zasebna mjerenja ispupčene i udubljene strane. Oblak točaka na udubljenoj strani mjernog objekta iskoristiti će se za definiciju nalijegnih površina dok je procijenjeno da se zbog bolje vidljivosti digitalizacija krivulje srha provede preko ispupčene strane. Time je mjerenje projekcijskim senzorima podijeljeno na dva odvojena zadatka posljedica čega je problem povezivanja oblaka točaka prednje i stražnje plohe koji je potrebno riješiti procesom planiranja mjerenja.

  - Planiranje mjerenja

    ⇒ U ovom koraku mjeritelj je na osnovu iskustveno poznatih mogućnosti kontaktnog TMU odredio one pogonske parametre kojima će se za zadani mjerni volumen, zadani materijal i površinska geometrijska svojstva mjernog objekta omogućiti digitalizaciju traženih geometrijskih karakteristika u najkraćem vremenu i sa optimalnom cijenom koštanja. U smislu zamjenske geometrije definirane su putanje i režim rada TMU, odabran je promjer i oblik glave kontaktnog ticala, te definirani brzina i smjer gibanja ticala te način prihvata mjernog objekta. Prilikom planiranja putanje uzet je u obzir i vremenski period dostupnosti mjernog objekta te je na osnovu ovog parametra odabrana prostorna rezolucija i postavljeni prioriteti mjerenja.

⇒ Opisani postupak planiranja mjerenja kontaktnim TMU-om principijelno se ne razlikuje od planiranja mjerenja projekcijskim sustavom *Atos*, kod kojeg je također na osnovu ukupnih gabarita veličine površinskih artefakata, ukupnog mjernog volumena te lokalnih površinskih i optičkih svojstava površine mjernog objekta potrebno odabrati postavu leća i veličinu trenutnog vidnog polja senzora. Radi zahtjeva za digitalizacijom kompletnog mjernog volumena postupak planiranja mjerenja obuhvatio je i planiranje veličine, prostorne raspodjele i gustoće referentnih fotogrametrijskih točaka te način prihvata mjernog objekta. Zbog povećanja pristupnosti, referentne točke potrebno je nanijeti i na samu površinu mjernog objekta, pazeći pritom da se ne zasjene područja koja nose mjernu informaciju. Poseban problem planiranja mjerenja bio je riješiti potrebu dovođenja zasebnih oblaka točaka udubljene i ispupčene strane mjernog objekta u zajednički koordinatni sustav. Zbog uočenih nepovoljnih optičkih refleksijskih svojstava površine, postupkom planiranja mjerenja predviđeno je tretiranje površine mjernog objekta tankim slojem titan-dioksida.

⇒ Planiranjem mjerenja laserskim senzorom potrebno je uzeti u obzir konstrukcijska ograničenja mjernog senzora (unutrašnje utjecajne faktore) fiksnom širinom njegova vidnog polja. Pritom je s obzirom na potrebu digitalizacije unutrašnje udubljene i vanjske ispupčene površine odlučeno da se mjerni objekt digitalizira sa svake strane posebno. Ograničenje vidnog polja zahtijevalo je da svaka strana bude dodatno podijeljena na dvije polovice. Stoga je predviđena i mogućnost djelomičnog preklapanja vidnih polja kako bi se lijevi i desni dio oblaka točaka mogao numerički spojiti u jedan oblak. Problem povezivanja unutrašnje udubljene i vanjske ispupčene površine pritom radi ograničenog promjera rotacijskog stola nije mogao planiranjem mjerenja biti riješen. Ovisnost o mehaničkom pomaku za definiciju mjerne točke očito limitira ukupnu definiciju mjernog volumena za tijela diskretne geometrije. S obzirom na refleksijska svojstva površine, mjeritelj je na osnovi iskustva i subjektivne procjene odlučio da površina ima zadovoljavajuća refleksna svojstva za projiciranje koherentne laserske zrake te nije dodatno tretirana.

- Rukovanje mjernom opremom

  Iskustvo mjeritelja pri rukovanju korištenom mjernom opremom prilikom provođenja ovog eksperimenata bilo je od odlučujućeg značenja za ispunjenje zadanog mjernog zadatka. Svi su mjeritelji pokazali dobro poznavanje temeljnih principa i funkcionalnosti pripadajućih mjernih sustava.

- Programska podrška

  Utjecaj programske podrške ovdje je promatran u smislu utjecaja na postupak planiranja i provođenja mjerenja.

  ⇒ Programski paket koji se koristi za upravljanje kontaktnim TMU-om prilagođen je potrebama ponavljajućih automatiziranih kontrolnih mjerenja, npr. kontrole odstupanja od kružnosti. Korištenjem

postojećih funkcija za skeniranje slobodnih površina uspjelo se digitalizirati desetak paralelnih presjeka na lijevoj spojnici, što je uz stalno zalaganje mjeritelja trajalo nepuna tri sata. Pritom je bilo potrebno svaki puta iznova ručno programu definirati položaj početne mjerne točke, smjer, brzinu i gustoću digitalizanih točaka. Na osnovu tog mjerenja već i zapravo prilično jednostavne geometrije površine zaključeno je da nema smisla provoditi kompletno određivanje linije srha zbog velikog broja potrebnih diskretnih osjeta, te je provedeno drugo mjerenje u kojem je na malom broju presjeka pokazano da je određivanje površine i srha ipak pomoću prikladne mjerne taktike moguće provesti i na ovom kontaktnom TMU-u (slika 59.b.).

⇒ Programska podrška mjernog sustava *Atos* u potpunosti je podređena za digitalizaciju slobodnih površina, te je spajanje mjerenja preko referentnih točaka brzo i od korisnika zahtijeva minimalnu interakciju.

⇒ Istu jednostavnost ima i programska podrška korištenog laserskog mjernog sustava. Kako se ovdje zapravo radi o iznimno limitiranom sustavu po pitanju dopuštenih sloboda gibanja tako je i broj potrebnih interakcija prilikom planiranja i samog provođenja mjerenja minimalan.

- Ljudski faktor

  Vezanost mjeritelja za svaku od faza provedenih mjernih procesa čini ga zapravo sastavnim dijelom mjernog sustava, te se iz količine njegova znanja i zalaganja može ostvariti mjerenje i najtežih oblika ali mjeritelj može biti i izvor najvećih grešaka. Primjerice, digitalizacija linije srha kontaktnim TMU bila bi moguća i korištenjem funkcija slobodnog manualnog vođenja ticala duž rubova mjernog objekta ali ovdje nije provođena jer je geometrija mjernog objekta vrlo kompliciranа te bi od mjeritelja zahtijevala iznimnu pažnju i dugačko vrijeme mjerenja.

- Zahtjevi naknadne obrade podataka

  Mjerenje samo po sebi nikada nije svrha, te se u smislu razmjene podataka sa vanjskim CAD sustavima očekuje da svaki od korištenih mjernih senzora ima mogućnost jednostavnog prijenosa podataka. Oba projekcijska senzora raspolažu zadovoljavajućim brojem programskih filtera za dijeljenje podataka sa drugim sustavima, dok programski paket korištenog kontaktnog TMU koristi vlastiti format, te je jedina mogućnost za dijeljenje podataka sa drugim sustavima u rudimentarnom tekstualnom obliku.

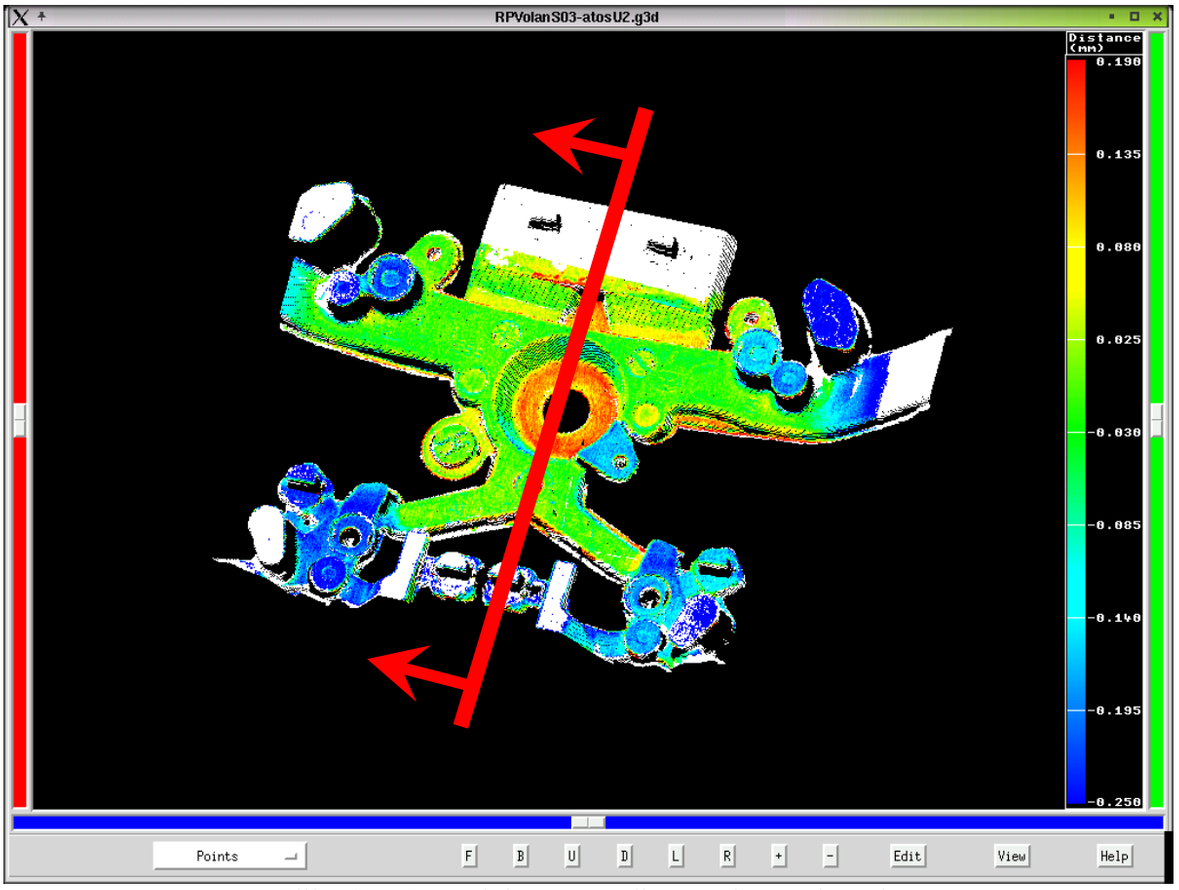
7.2. Utjecaj unutrašnjih faktora

Na temelju provedene diskusije utjecaja i interakcija vanjskih faktora na odabranom mjernom objektu proizlazi da se njihov glavni izvor i utjecaj djelovanja nalazi upravo u domeni mjeritelja, tj. onoga tko izvjesni mjerni senzor pod određenim uvjetima upotrebljava u konkretne mjeriteljske svrhe. Istovremeno se prema teoriji iznesenoj poglavljem 5.2 unutrašnji faktori smještaju u domenu konstruktora mjernog senzora, te bi se istraživanje pojedinog utjecaja trebalo provesti na svakoj od strukturnih komponenata ovdje korištenih mjernih sustava. Stoga će se sljedećom analizom promatrati utjecaj unutrašnjih faktora posredno, preko rezultata provedenih mjerenja, te će se promatrati u smislu usporedbe

efekata koji se javljaju u digitaliziranom oblaku točaka, nastalih uslijed utjecaja realnih konstrukcijskih izvedbi korištenih projekcijskih mjernih senzora. Budući da sa kontaktnim TMU-om u zadanom vremenu nije bilo moguće izmjeriti kompletan oblik linije srha, te definirati površinu koja bi bila usporediva sa količinom informacija koje daju projekcijski sustavi, ovdje će se izuzeti iz daljnje analize.

7.3. Analiza digitaliziranih podataka

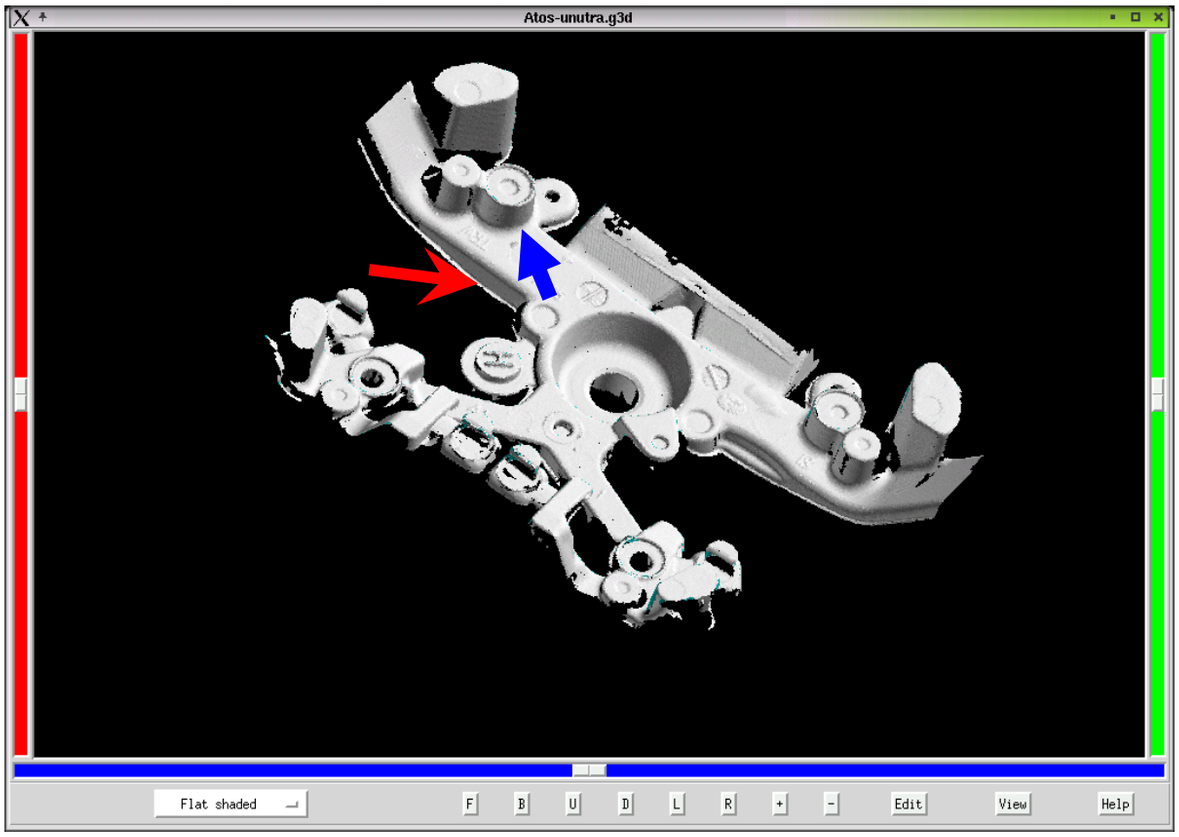
Za potrebe analize podataka digitaliziranih projekcijskim sustavima odabrana je udubljena strana centralnog dijela mjernog objekta. Postupkom registracije oblak točaka objektnih koordinata površine mjernog objekta izmjeren laserskim projekcijskim sustavom doveden je u koordinatni sustav oblaka izmjerenog projekcijskim sustavom *Atos*. Slikom 60. prikazano je postojanje značajnih odstupanja u izmjerenoj geometriji, pri čemu je kao referentna ravnina zadan oblak točaka izmjeren projekcijom nekoherentnog svjetla. Radi orijentacije, smjer kojim se tijekom projiciranja gibala laserska zrake ilustriran je crvenom linijom.



Slika 60. Numerička usporedba rezultata mjerenja

Središnje područje pokazuje efekt monotonog odstupanja dvaju izmjerenih površina, dok centralni upust sa provrtom i rubni plavi dijelovi pokazuju postojanje velikih odstupanja. Plava područja na slici 60. ukazuju da je na tim mjestima laserom digitaliziran oblak pomaknut u smjeru od mjernog senzora, dok crvena područja ukazuju da je površina laserskom skeneru djelovala "bliže". Ovakva jednolična i simetrična raspodjela pobuđuje sumnju u postojanje sistematske pogreške prilikom postupka registracije. Međutim, suprotni

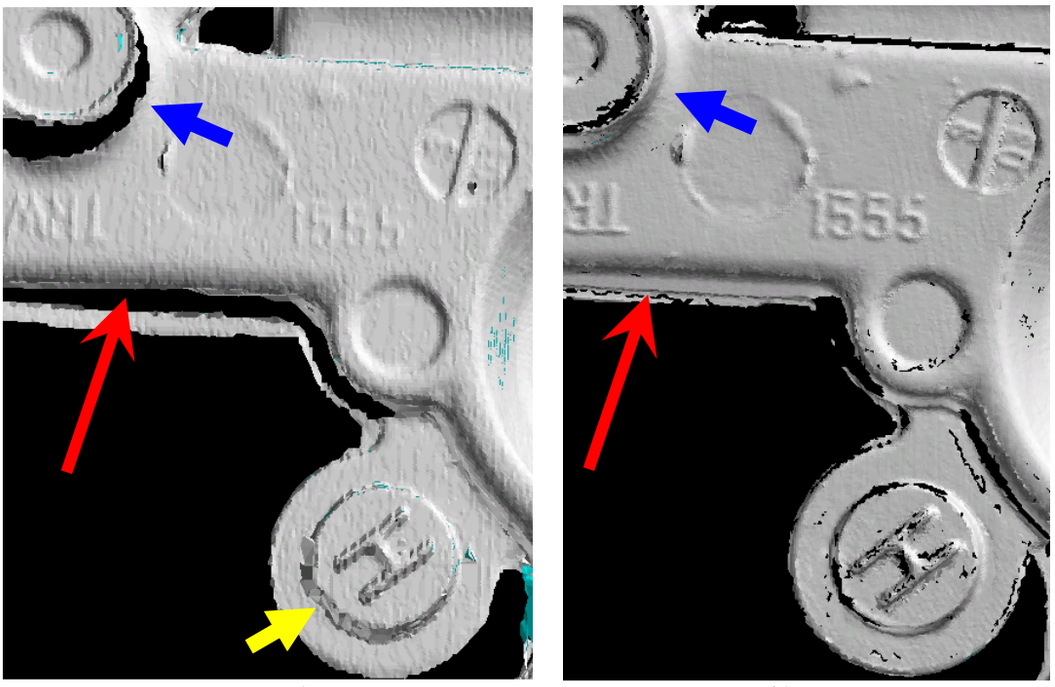
smisao predznaka pomaka, kao i sličan efekt zamijećen prilikom analize ispupčenog dijela površine daje naslutiti da je vjerojatniji razlog ovoj pojavi utjecaj defokusiranja laserske zrake, te rezultat njene interakcije sa površinom. Iznos ovog odstupanja kreće se od cca -0.25 [mm] do 0.19 [mm], što pokriva ukupno područje odstupanja reda veličine od gotovo polovice milimetra. Prilikom mjerenja laserskim skenerom područje koje pokazuje minimalna odstupanja približno se poklapalo sa sredinom mjernog područja laserskog senzora.



Slika 61. Detalj površine digitaliziran sustavom *Atos*

Korištenjem mogućnosti spajanja pojedinih mjerenja iz više različitih orijentacija u odnosu na površinu mjernog objekta na osnovu pasivnih osjeta kod mjernog senzora *Atos* postignuta je potpunost definicije promatranog dijela površine (prikazane slikom 61). Usporedimo li mjesta označena plavom i crvenom strelicom na slici 61. sa tim istim uvećanim detaljima na slici 62, proizlazi da je laserski sustav sa prostornom rezolucijom od oko 0.30[mm] izmjerio površinu srha. Ali kako srh zapravo predstavlja višak materijala koji je digitaliziran prilično grubo u odnosu na način kako se mijenjaju detalji površine koja nosi taj srh (i s obzirom da se višak materijala kojim je trenutno definiran srh mijenja od odljevka do odljevka), upravo će zahtijevani položaj ruba osnovnog materijala definirati pravu krivulju duž koje treba presjeći digitalizirani oblak točaka da bi se dobila pravilna definicija linije krzanja. Pritom se digitalizirani dio srha zapravo uzima samo kao orijentir prilikom presijecanja površine osnovnog materijala. S tim u vidu, ako ponovimo usporedbu slika 61 i 60, proizlazi da upravo na mjestima gdje se nalaze rupe u usporednom oblaku, laserski sustav nije uspio digitalizirati površinu mjernog objekta. Objašnjenje ovog efekta leži u načinu projiciranja i digitalizacije plohe laserskog svjetla, tj. geometriji mjernog senzora. Površine koje se pružaju upravo u smjeru projiciranja zrake ne mogu biti izravno i jasno osvijetljene, te se u tim

točkama i gube mjerne informacije. Upravo stoga područja označena strelicama na slici 62.a nemaju u potpunosti digitaliziranu površinu osnovnog materijala.



a) b)

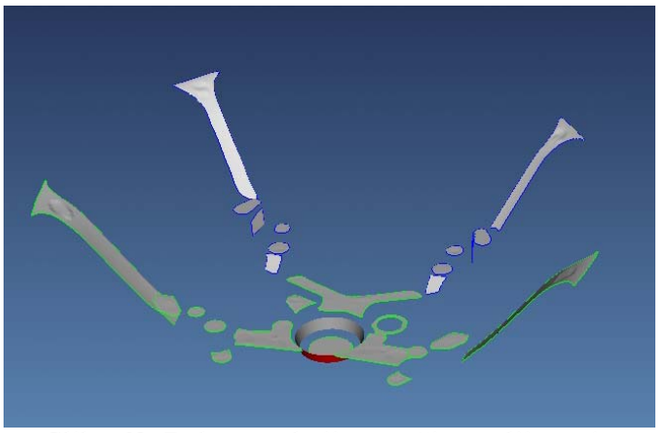
Slika 62. Usporedni prikaz detalja površine digitaliziranog a) laserskim sustavom Cyberware, b) sustavom *Atos*

Provedena mjerenja i usporedba potpunosti izmjerenih oblaka pokazuju da se obje optičke projekcijske metode pokazuju sposobne diskretizirati površinu mjernog objekta gustom mrežom objektnih mjernih točaka. Pritom je za isti mjerni volumen i istu promatranu površinu digitalizacija korištenim laserskim sustavom bila i do 10-30 puta brža nego korištenim projekcijskim sustavom *Atos*. Međutim, naivno je definirati brzinu mjerenja s obzirom na goli broj digitaliziranih točaka, jer se ne smije zaboraviti da je mjerenje zapravo samo početni dio procesa analize oblika ili deformacije nekog mjernog objekta, koja će zahtijevati potpunost definicije površine. Usporedimo li prostornu rezoluciju kojom je digitaliziran detalj površine prikazan slikom 62.a, koja je za laserski sustav iznosila oko 0.3mm i isti detalj površine prikazan slikom 62.b, digitaliziran sustavom *Atos* s prostornom rezolucijom od oko 0.25mm, vidi se da je odnos detalja i šuma bolji kod površine digitalizirane projekcijom nekoherentnog svjetla (sustavom *Atos*). Žuta strelica na slici 62.a. pokazuje područje gdje zapravo nisu digitalizirani podaci o realnoj geometriji već ih je programski paket prilikom postupka poligonizacije površine zbog razmaka manjeg od tolerancijom dopuštenog proglasio ispravnim mjernim točkama. Pritom se neispunjena područja površine digitalizirane mjernim sustavom *Atos* mogu naknadno digitalizirati, dovođenjem sustava u prikladan relativan položaj prema mjernom objektu uzimajući u obzir unutrašnje i vanjske parametre geometrije mjernog objekta i samog mjernog senzora.

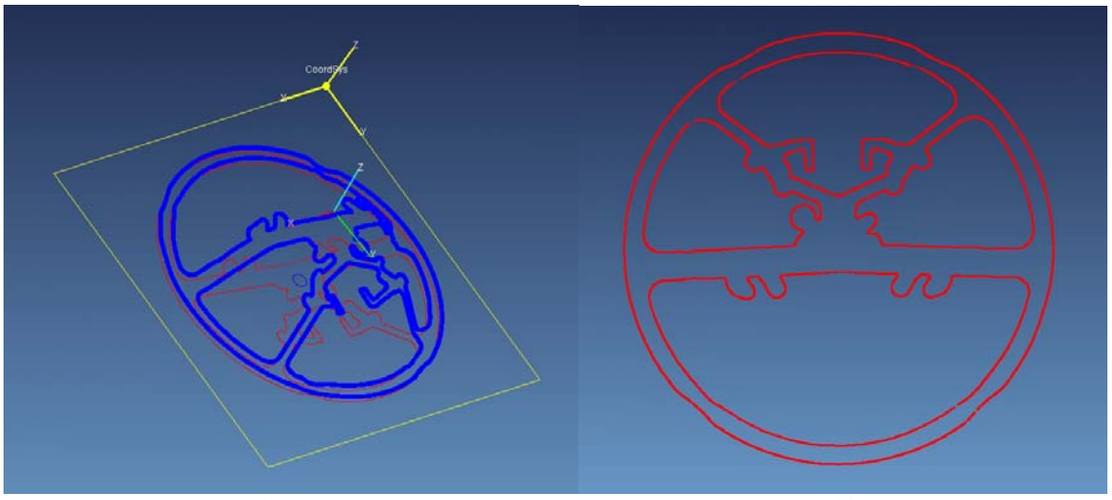
7.3 Konstrukcija dodirnih ploha i linije srha

Temeljem provedene analize projekcijskih i kontaktnih mjernih sustava, na osnovi potpunosti definicije mjernog volumena, a nauštrb brzini digitalizacije, za rješenje problema određivanja površine nalijeganja i linije krzanja srha, odabran je oblak točaka digitaliziran sustavom *Atos*.

Digitalizirani oblak geometrije unutrašnje i vanjske površine je iz mjernog programskog paketa *Atos* preko formata ".surf" prebačen u CAD programski paket I-deas gdje je izvršena rekonstrukcija površine nalijeganja (slika 63.), te određena prostorna krivulja srha, prikazana slikom 64.



Slika 63. Rekonstrukcija površine nalijeganja



a) b)

Slika 64. a) prostorna linija srha b) projekcija linije srha na baznu ravninu

8. ZAKLJUČAK

Provedenim istraživanjem i analizom podataka dobivenih na temelju provedenih eksperimenata, pokazalo se da je opravdano provoditi usporedbu metoda za prostornu digitalizaciju oblika i deformacija mehaničkih konstrukcija (koje se za definiciju mjerne točke koriste kontaktom ili optičkim beskontaktnim principima), s obzirom na način i intenzitet interakcije promatrane metode s unutrašnjim i vanjskim utjecajnim faktorima. Pritom utjecaj unutrašnjih faktora kod kontaktnih i beskontaktnih metoda proizlazi iz primijenjenih tehnoloških principa i teoretskog modela metode, pod utjecajem stvarnih konstrukcijskih izvedaba pojedinih mjernih senzora, dok se utjecaj vanjskih faktora treba promatrati u smislu svih onih utjecaja koji utječu na postupak planiranja i provedbe mjerenja s odabranim mjernim senzorom.

Temeljem provedenih eksperimenata pokazalo se da se točnost, ponovljivost, kao i mjerna i prostorna rezolucija digitalizacije položaja mjerne točke, kao naizgled idealni parametri usporedbe mjernih metoda mogu tijekom procesa mjerenja mijenjati ovisno o trenutačnoj prevazi pojedinih, prethodnim poglavljima prikazanih unutrašnjih ili vanjskih utjecajnih faktora. U tom smislu, analizom postupaka digitalizacije pokazalo se da brzina digitalizacije nije definirana samo veličinom trenutnog vidnog polja, već ju je potrebno promatrati u smislu mogućnosti potpune digitalizacije kompletnog mjernog volumena zadane konstrukcije. Laserski triangulacijski projekcijski sustavi zbog ovisnosti definicije koordinatnih sustava o pomičnim mehaničkim elementima pokazali su se podesnima za brze digitalizacije manjih mjernih volumena, kao i za manje zahtjevne mjerne zadaće. Sustavi bazirani na projekciji nekoherentnog svjetla, u sprezi sa adekvatnim pasivnim optičkim sustavom za definiciju koordinatnih sustava prikladni su za mjerenja različitih veličina mjernih objekata, te im se točnost i prostorna rezolucija povećava sa smanjenjem vidnog područja. Kontaktni TMU-i, sudeći po iskustvima iz provedenih eksperimenata, pogodni su za digitalizaciju objekata poznate geometrije, te postoji mogućnost hibridne sprege postojećih mjernih sustava sa primjerice prikladnim laserskim sustavom, sa ciljem povećanja primjenljivosti na šire područje digitalizacijskih problema.

Široko područje uzroka unutrašnjih i vanjskih utjecaja (npr. optički, materijalni ili okolišni utjecaji) ukazuje na potrebu multidisciplinarnog znanja prilikom pristupa usporedbi pojedinih mjernih metoda i pripadajućih mjernih senzora. Za kontaktne TMU-e već dugo postoje standardni postupci i mjerni artefakti za izražavanje mjerne nesigurnosti, dok se na temelju provedenog istraživanja zaključuje da je za postavljanje ekvivalentnih standarda za beskontaktne optičke postupke potrebno prethodno provesti standardizaciju unutrašnjih komponenata (odn. definirati generičke postupke analize unutrašnjih utjecajnih faktora), te tek potom pristupiti definiciji prikladnog artefakta za provođenje postupaka potrebnih za izražavanje mjerne nesigurnosti. Veliki broj danas postojećih metoda na kojima su zasnovani postojeći aktivni i pasivni mjerni sustavi vjerojatan su razlog trenutnog nesređenog statusa standardizacije optičkih digitalizacijskih sustava.

LITERATURA

[1] B. Runje, "Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine", doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2002

[2] F. Blais, "A Review of 20 Years of Range Sensor Development", Proceedings of SPIE-IS&T, Vol. 5013., 62-76, 2003.

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

[4] D. Behring, M. Gomercic, V. Michailov, R. Ritter, H. Wohlfahrt, "Grating method for deformation measurement of heterogeneous specimen", In Euromat 2000, Advances in mechanical behaviour, plasticity and damage. Session on mechanics of heterogeneous joints. 1999,

[5] M. Gomerčić, N. Drvar, "A Novel Videoextensometer For Strain Measurement On Tensile Testing Machines", Proceedings of the 18th Danubia-Adria-Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, 47-48 , 2001.

[6] N. Drvar, "The Aspects Of Tensile Testing Machine Stiffness On Measured Results", Extended summaries of TC15-youth imeko symposium on experimental solid mechanics, 35-36, 2002.

[7] N. Drvar, D. Semenski, J. Skoko, "Integration of the object grating method into numerical elastoplastic material modelling", Proc. of 19. Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, 84-85, 2002.

[8] M. Baab, D. Narita, K. Ohtani, "An Advanced Rangefinder Equipped with a New Image Sensor Having the Ability to Detect the Incident Angle of a Light Stripe", Journal of Optics, A: Pure and Applied Optics(6), 10-16, 2004

[9] V. Uffenkamp, State of the art of high precision industrial photogrammetry, Proceedings of the Third International Workshop on Accelerator Alignment, Annecy, France, October 1993.

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

[11] M. Gomerčić, "Doprinos automatskoj obradi optičkog efekta u eksperimentalnoj analizi naprezanja", Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 1999.

[12] S. N. Spitz, "Dimensional Inspection Planning for Coordinate Measuring Machines", PhD thesis, University of Southern California, Department of Computer Science, 1999.

[13] Lee, Min-Fan Ricky, Clarence W. de Silva, Elizabeth A. Croft, and Q.M. Jonathan Wu, "Machine vision system for curved surface inspection", 177-188.

[14] Kwan H. Lee, Sun Kyu Lee and Seung-Man Kim, "Design of a universal fixture for laser scanning", International Journal of Advanced Manufacturing Technology. IJAMT, 19:426-431, 2002

[15] L. Zhang, B. Curless, S. Seitz, "Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming", International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, 2002.

[16] E.J. Huising, , Pereira, L.M. Gomes, "Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications", PandRS(53), No. 5, 245-261, 1998,.

[17] Xi, F., Y. Liu, and H.Y. Feng. "Error Compensation for the 3D Line Laser Scanning Data", Proceedings of the 2nd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 275-280 2000.

[18] F. Xi, C. Shu, "CAD-based path planning for 3-D line laser scanning", Computer-Aided Design, vol. 31, no. 7, 473-479, 1999.
[19] F. Blais, J.-A. Beraldin, S.F. El-Hakim, L. Cournoyer, "Comparison of Pose Estimation Methods of a 3D Laser Tracking System using Triangulation and Photogrammetry Techniques", SPIE Proceedings, Electronic Imaging 2001, Vol. 4309. Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement VII, 2001.
[20] Raindrop Geomagic "3D Scanner Report", http://www.geomagic.com
[21] A. Simoni, L. Gonzo, M. Gottardi, "Integrated optical sensors for 3-D vision", Sensors, Proceedings of IEEE, 1-4, 2002.
[22] 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.
[23] G. Tsigaridas, M. Fakis, I. Polyzos, P. Persephonis , V. Giannetas, "Z-scan technique for elliptic Gaussian beams", Applied Physics B: Lasers and Optics 77, 71-75, 2003.
[24] R. Baribeau, M. Rioux, "Influence of speckle on laser range finders", Applied Optics;30(30):2873–2878. , 1991.
[25] Blais, F. Lecavalier, M. and Bisson, J. "Real-time processing and validation of optical ranging in a cluttered environment", The 7th International Conference on Signal Processing Applications & Technology (ICSPAT '96), 1996.
[26] H. Helmers, M. Schellenberg, "CMOS vs. CCD sensors in speckle interferometry", Optics and laser technology 35:8 , 587-595, 2003.
[27] H. Golnabi, "Image evaluation for the synchronised laser scanning systems", Optics & Laser Technology 31 (3) , 225-232, 1999.
[28] J. Park, G. N. DeSouza, A. C. Kak, "Dual-Beam Structured-Light Scanning for 3-D Object Modeling", Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 65-73, 2001.
[29] L. Zeng et. al., A two-beam laser triangulation for measuring the position of a moving object, Opt. Las. Eng., Vol.31, 445-453, 1999.
[30] V. Delaye, P. Labeye, High-resolution eye-safe time-of-flight laser range finding, Conference 4035 Proceedings of SPIE Vol. 4035
[31] V. Lombardo, T. Marzulli, C. Pappalettere, P. Sforzaa, A time-of-scan laser triangulation technique for distance measurement Optics and Lasers in Engineering 39 247–254, 2003.
[32] Beraldin J-A. et al.,"Active 3D Sensing", Modelli E Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica, NRC 44159, 2000,pp 22-46
[33] Z. Zhang, "Determining the epipolar Geometry and its Uncertainty: A review", International Journal of Computer Vision, 1997.
[34] C. Brenner, J. Böhm, J. Gühring, "Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector", SPIE Videometrics VI', Vol. 3641, 1999.
[35] A. M. McIvor, "Calibration of a laser stripe profiler", Proceedings of Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 92-98, 1999.
[36] A. M. McIvor, "Laser stripe profiler calibration using nonlinear models", Optical engineering 41, 202-212, 2002.
[37] S.Bakula, "Prilog istraživanju vanjskih i unutrašnjih utjecaja na točnost trokoordinatnih mjernih uređaja", Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 1996.
[38] W. Vliet,"Development of a fast mechanical probe for coordinate measuring machines", Precision Engineering 22:141–152, 1998

[39] 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.
[40] W. X. Li, L. D. Mitchell, "Laser scanning system testing – errors and improvements",Measurement 16, 91-101, 1995.
[41] G. Hausler, "Three-dimensional sensors-potentials and limitations", Handbook of computer vision and applications, Volume1, 485-506.
[42] W. Boehler, M. Bordas, A. marbs, "Investigating laser scanner accuracy", Proceedings of the XIXth CIPA symposium, 2003.
[43] E. Baltsavias, "A comparison between photogrammetry and laser scanning", IPRS Journal of photogrammetry and remote sensing 54, 83-94, 1999.
[44] J. Leopold, H. Gunther, R. Leopold, "New developments in fast 3D-surface quality control", Measurement 33, 179-187, 2003.
[45] Clarke. T.A., "An analysis of the prospects for digital close-range photogrammetry", Photogrammetry, IPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 50(3), 4-7, 1995.
[46] Wendt, A., Rosing, C., Weisensee, M. "Comparison of different sensor types and validation of an approach for multi sensor fusion", ISPRS Symposium Comm. V, 2002.
[47] M. Trobina, "Error model of a coded-light range sensor", Technical Report BIWI-TR-164, ETH-Zentrum, 1995.
[48] A. Marbs, "Experiences with laser scanning at i3mainz", CIPA Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, 2002.
[49] 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.
[50] K. Takamasu , M. Abbe, R.Furutani, S. Ozono, "Estimation of uncertainty in feature based metrology", 5th ISMTII, 47-52, 2001.
[51] C. Dong, C. Zhang, B. Wang, "Prediction and compensation of dynamic errors for coordinate measuring machines", Journal of manufacturing Science and Engineering, Vol 124, 509-514, 2002.
[52] S. Spitz, "Dimensional inspection planning for coordinate measuring machines", Doktrska disertacija, IRIS,1999
[53] M. Starczak, W. Jakubiec, "Optimization of measuring strategies in coordinate measuring technique", Measurement science review, Volume1, 191-194, 2001.
[54] Y. Wu, S. Liu, G. Zhang, "Improvement of coordinate machine probing accessibility", Precision engineering 28, 84-94, 2004.
[55] Liska, R. Sablatnig, "Adaptive 3D acquisition using laser light", Czech pattern recognition workshop", 111-116, 2000.
[56] 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.
[57] 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
[58] 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.

[59] S. F. El-Hakim, J. A. Beraldin, F. Blais, "A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems", SPIE Proc. 2646 of St. Petersburg Conference on digital photogrammetry, 14-25, 1995.
[60] J. Liu, L. Tian, L. Li, "Light power density distribution of image spot of laser triangulation measuring", Optics and lasers in engineering 29,457-463,1998.
[61] T.A. Clarke,A. Katsimbris, "The use of diode laser collimators for targeting 3-D objects", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXX(5): 47-54, 1994.
[62] 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.
[63] J. Salvi, X. Armangue, J. Batlle, "A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation", Pattern Recognition 35, 1617-1635, 2002.
[64] J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm, D. Fritsch, "Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector", `ISPRS Congress 2000', IAPRS 33(5), 2000.
[65] R. G. Dordch, G. Hausler, J. Herrmann, "laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement", Applied optics, Vol. 33 No. 7, 1994.
[66] Z. Huicheng, C. Jihong, Y. Daoshan, Z. Ji, S. Buckley, "Datacloud fusion in three-dimensional laser comparator", Measurement 27, 93-99, 2000.
[67] C. Lartigue, A. Contri, P. Bourdet, "Digitized point quality in relation with point exploitation", Measurement 32, 193-203, 2002.
[68] D. Semenski, A. Bakić, N. Drvar, A. Marinov, "A new 3D scanning-aided procedure in cutting tool design", Proceedings of the 8th International design conference, 799-804, Dubrovnik 2004.

KRATKI ŽIVOTOPIS

Nenad Drvar rođen je 15. veljače 1976. godine u Zagrebu, gdje je završio Srednju strojarsku školu. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu upisuje 1994. godine. Diplomirao je 1999. na usmjerenju Strojarske konstrukcije, smjer Mehaničke konstrukcije. 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. Aktivno sudjeluje u znanstveno-istraživačkom radu, te je do sada objavio 7 znanstvenih radova i sudjelovao na brojnim znanstvenim konferencijama. Osim u istraživačkom radu, sudjeluje u izvođenju nastave iz kolegija Mehanika I i II 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. He has been actively involved in the research, and has published seven 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 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.