Moderni trokoordinatni mjerni sustavi

Grdić, Alen

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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:235:124255

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

ZAVRŠNI RAD

Alen Grdić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Biserka Runje, dipl. ing. Alen Grdić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Biserki Runje i dr. sc. Marku Katiću na stručnoj pomoći, savjetima i informacijama tijekom izrade ovog rada.

Alen Grdić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ALEN GRDIĆ** Mat. br.: 0035184726

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MODERNI TROKOORDINATNI MJERNI SUSTAVI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MODERN COORDINATE MEASUREMENT SYSTEMS**

Opis zadatka:

Brzi razvoj naprednih beskontaktnih mjernih tehnika rezultirao je pojavom brojnih novih trokoordinatnih mjernih sustava, kao i unaprjeđenim karakteristikama postojećih sustava. U okviru ove teme student će opisati izvedbe i definirati područje primjene za:

1. Višesenzorne trokoordinatne mjerne uređaje,
2. Mjerne ruke,
3. Fotogrametrijske metode,
4. Projekcijske skenere
5. Uređaje za lasersko 3D mjerenje
6. Računalnu rendgensku tomografiju.

Potrebno je analizirati navedene sustave s aspekta mjerne nesigurnosti, mjernog volumena, brzine mjerenja, rezolucije, mogućnosti on-line / off-line mjerenja. Također, potrebno je dati osvrt na mogućnosti sinergije više mjernih sustava.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4 . ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS KRATICA VI
SAŽETAK VII
1. UVOD 1
2. VIŠESENZORNI TROKOORDINATNI MJERNI UREĐAJI 3
2.1. Vrste senzora 3
2.1.1. Kontaktne metode 5
2.1.2. Optičke metode 5
2.2. Princip rada 6
2.2.1. Zamjena senzora 7
2.3. Odabir uređaja 7
3. MJERNE RUKE 9
3.1. Primjena 3D mjernih ruku 10
3.2. Mjerne ruke sa mogućnošću laserskog skeniranja 11
3.2.1. Primjena 3D mjernih ruku sa laserskim skenerom 12
3.3. 3D mjerne ruke protiv drugih mjernih metoda 12
4. FOTOGRAMETRIJSKE METODE 13
4.1. Princip rada 14
4.1.1. Fotogrametrijske oznake 14
4.2. Tipovi fotogrametrijskih sustava 15
4.2.1. Ručni sustav 15
4.2.2. Robotizirani sustav 16
4.3. Postupak mjerenja 17
4.4. Primjena fotogrametrije 18
5. PROJEKCIJSKI SKENERI 20
5.1. Projekcija uzorka 20
5.1.1. 3D skeniranje plavim svjetlom 22
5.1.2. Primjena projekcijskih skenera 23
6. UREĐAJI ZA LASERSKO 3D MJERENJE 24
6.1. Općenito o laseru 24
6.1.1. Primjena lasera u mjerenju 25
6.2. Laserska interferometrija 26
6.2.1. Princip rada laserskog interferometra 27
6.3. Laser tracker 30
6.3.1. Primjena laser trackera 31
7. RAČUNALNA RENDGENSKA TOMOGRAFIJA 32
7.1. Priroda x-zraka 32

7.1.1. Nastanak x-zrake....33
7.2. Vrste CT skenera....34
7.2.1. Translacijski skeneri....34
7.2.2. Konusni skeneri....34
7.3. Princip rada....35
7.4. Izvedbe CT uređaja....36
7.4.1. „On line“ izvedba....37
7.5. Primjena 3D računalne rendgenske tomografije....38
8. ANALIZA NAVEDIH SUSTAVA....41
8.1. Utjecaji na mjernu nesigurnost....41
8.2. Usporedba mjernih sustava....44
8.3. Mogućnost sinergije više mjernih sustava....48
9. ZAKLJUČAK....51
LITERATURA....52
PRILOZI....55

POPIS SLIKA

Slika 1. Klasifikacija mjernih sustava 1
Slika 2. Vrste senzora [1],[2] 3
Slika 3. Višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaj [5] 4
Slika 4. Višesenzorni princip rada [6] 6
Slika 5. Postolje za promjenu senzora [7] 7
Slika 6. Uređaj sa više senzora [8] 8
Slika 7. 3D mjerna ruka [9] 9
Slika 8. Primjena 3D mjerne ruke u proizvodnji [11] 10
Slika 9. 3D mjerna ruka sa laserski skenerom [12] 11
Slika 10. Princip triangulacije [14] 13
Slika 11. Fotogrametrijske oznake [15] 14
Slika 12. Ručni fotogrametrijski sustav [16] 15
Slika 13. Prikaz prostornog položaja kamere i mjernih točaka [16] 16
Slika 14. Robotizirani fotogrametrijski sustav [17] 17
Slika 15. Reverzno inženjerstvo trupa broda [16] 18
Slika 16. Mjerenje deformacija zida [19] 19
Slika 17. Sustav za mjerenje projekcije uzorka [20] 20
Slika 18. Projekcija 1D uzorka [22] 21
Slika 19. Skeniranje plavim svjetlom [26] 22
Slika 20. Mjerenje složene geometrije [24] 23
Slika 21. Povratno inženjerstvo [25] 23
Slika 22. Apsorcija i emisija svjetlosti [28] 24
Slika 23. Vrste interferencije [30] 26
Slika 24. Uzorak svijetlih i tamnih pruga [31] 27
Slika 25. Princip interferometrijskog mjerenja dužine [32] 28
Slika 26. Laserski interferometar za mjerenje linearnog pomaka [33] 29
Slika 27. Laserski interferometar za mjerenje zakreta [34] 29
Slika 28. Laser tracker [35] 30
Slika 29. Retrorefleksivna meta [37] 30
Slika 30. Područje primjene laser trackera [38] 31
Slika 31. Elektromagnetski spektar [41] 33
Slika 32. Nastanak x-zrake [42] 33
Slika 33. Translacijski skener [44] 34
Slika 34. Konusni skener [45] 35
Slika 35. Otvorena izvedba [47] 36
Slika 36. Zatvorena izvedba [48] 36
Slika 37. „On line“ izvedba CT uređaja [50] 37
Slika 38. Prikaz rendgenske cijevi i detektora na rotirajućem postolju [49] 37
Slika 39. Dimenzijska usporedba sa 3D modelom [39] 38
Slika 40. Ispitivanje materijala [39] 39
Slika 41. Izrezani 3D volumen [39] 39
Slika 42. Analiza sklopa [51] 40
Slika 43. Glava cilindra [52] 46
Slika 44. Turbina [53] 47
Slika 45. Mjerna ruka + lasersko skeniranje [54] 48

Slika 46. Laser tracker + kutni enkoder [55] 49
Slika 47. Projekcija uzorka + fotogrametrija + kontaktno mjerenje [56] 49
Slika 48. CMM + optički senzor [57] 50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba mjernih sustava.....44

POPIS KRATICA

CMM – *Coordinate measuring machine*

CAD – *Computer-aided design*

CDD – *Charge-coupled device*

ADM – *Absolute distance measurement*

SAŽETAK

Brzi razvoj naprednih beskontaktnih mjernih tehnika rezultirao je pojavom brojnih novih trokoordinatnih mjernih sustava, kao i unaprjeđenjem postojećih sustava.

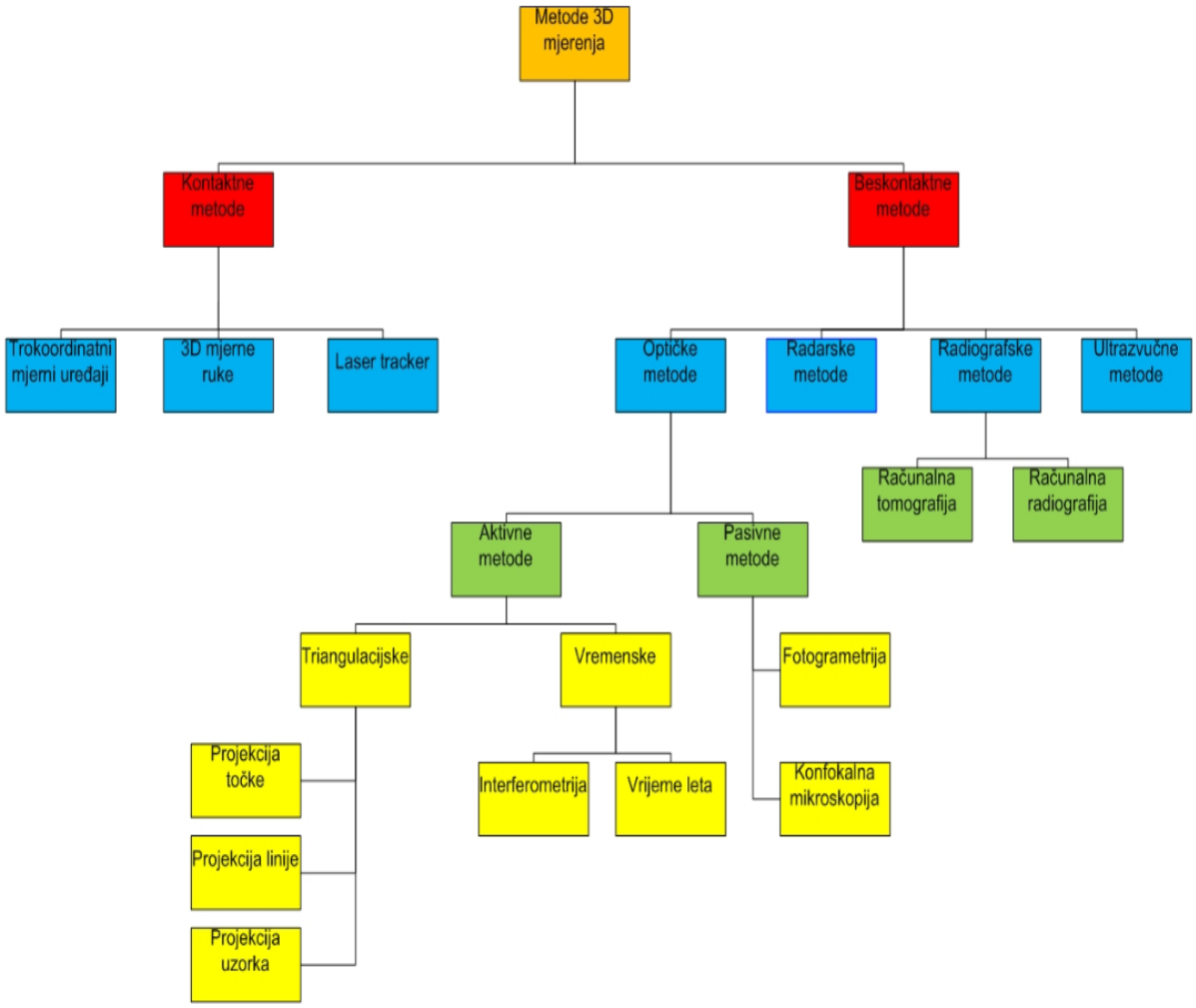
U okviru ovog rada opisane su izvedbe i definirana su područje primjene za višesenzorne trokoordinatne mjerne uređaje, mjerne ruke, fotogrametrijske metode, projekcijske skenere, uređaje za lasersko 3D mjerenje i računalnu rendgensku tomografiju.

Na kraju su analizirani navedeni mjerni sustavi s aspekta utjecajnih veličina mjerne nesigurnosti, mjernog volumena, brzine mjerenja, rezolucije, mogućnosti on-line / off-line mjerenja i dan je osvrt na mogućnosti sinergije više mjernih sustava.

Ključne riječi: višesenzorni uređaj; mjerna ruka; fotogrametrija; projekcijski skener; lasersko 3D mjerenje; računalna rendgenska tomografija

1. UVOD

Uloga mjerenja kao praktične tehničke djelatnosti od velike je važnosti kako u svakodnevnom životu tako i u području proizvodnje. Industrijska proizvodnja, u najširem smislu, obuhvaća sve aktivnosti uključene pri izradbi nekog proizvoda, pa tako i mjerenja. Danas se bez mjerenja ne može zamisliti kontrola kvalitete proizvoda kao preduvjeta za njegovu prodaju. Porastom složenosti oblika proizvoda, geometrija proizvoda postaje sve kompliciranija za mjerenje i kontrolu. Zbog zahtjeva mjerenja složene geometrije potrebno je primjenjivati takve mjerne uređaje, odnosno metode, koji su precizni i brzo izvršavaju veliki broj operacija mjerenja. Metode 3D mjerenja mogu se podijeliti u dvije grupe koje se dalje dijele u podgrupe kao što je vidljivo na slici 1.



Slika 1. Klasifikacija mjernih sustava

Tradicionalni trokoordinatni mjerni uređaji sa kontaktnim senzorom su fleksibilni i efikasni u kontroli geometrijskih karakteristika, ali nedostatak im je niska produktivnost s aspekta brzine mjerenja.

Razvoj naprednih beskontaktnih mjernih tehnika rezultirao je pojavom brojnih novih trokoordinatnih mjernih sustava, kao i unaprjeđenjem karakteristika postojećih sustava. Takvi moderni sustavi omogućuju istovremeno brza i precizna mjerenja složenih oblika. Također moguća je i kombinacija više mjernih sustava gdje jedan sustav nadopunjava drugi što omogućava provedbu takvih mjerenja za koje niti jedan sustav pojedinačno nije sposoban sam obaviti. U ovom radu će se detaljno objasniti neke od prikazanih metoda i provest će se analiza navedenih sustava prema zadanim kriterijima.

2. VIŠESENZORNI TROKOORDINATNI MJERNI UREĐAJI

U današnje vrijeme sve više se koriste višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaji u odnosu na tradicionalne koordinatne mjerne uređaje (eng. Coordinate measuring machine) sa jednim senzorom. Višesenzorne trokoordinatne mjerne uređaje kao što im i samo ime kaže opisuje uporaba više od jednog senzora koji prikupljaju podatke položaja točaka kako bi se dobile tražene dimenzije preko koordinata tih istih točaka. Vrlo bitna stvar kod ovakvih uređaja je naći način kako iskoristiti prednosti većeg broja senzora s ciljem poboljšavanja produktivnost rada.

2.1. Vrste senzora

Svi mjerni uređaji koriste barem jednu tehnologiju senzora. Taj senzor je ustvari sonda koja „osjeti“ mjerni komad. Dvije glavne kategorije senzora su:

- Kontaktni senzori
- Beskontaktni senzor



Slika 2. Vrste senzora [1],[2]

Slika 2. prikazuje dvije najčešće vrste senzora. Lijevo na slici se nalazi primjer kontaktnog senzora dok je na desnoj strani beskontaktni senzor.

Kontaktni senzori su svi oni koji uključuju dodir sa komadom kako bi se obavilo mjerenje. Najpoznatiji primjeri kontaktnih senzora su CMM kontaktne sonde, gdje se ticalom preko fizičkog dodira sa mjernim komadom dobivaju podaci o koordinatama točaka.

Kod beskontaktnih senzora ne postoji fizički kontakt sa mjernim komadom. Danas se u primjeni može pronaći znatan broj beskontaktnih tehnologija senzora. Postoji širok spektar beskontaktnih tehnologija koje koriste kameru kako bi se dobile optičke slike. Laserski skeneri npr. koriste optiku i detektore za „hvatanje“ laserske zrake koja se odbija od površine komada. Nove tehnologije mikro sondi rade na principu rezonancije ili spektralne analize svjetlosti kojom se određuje udaljenost između sonde i površine mjernog komada. Svaka tehnologija koristi drugačiji princip za izračunavanje koordinata traženih točaka.

Iz navedenog se da zaključiti da svaka kombinacija kontaktnog i beskontaktnog senzora na jednom mjernom stroju čini višesenzorni mjerni uređaj, slika 3. Tri senzora koji se obično nalaze na višesenzornom trokoordinatnom mjernom uređaju su kontaktna sonda sa ticalom, laserski i video senzor. Kontaktne sonde su one koje se već nalaze na CMM-u. Kamere su sastavni dio svih uređaja koji koriste optiku i svjetlost za mjerenja. Laserske sonde proizvode koherentno lasersko svijetlo (zraku) za osvjetljavanje određenog dijela površine mjernog komada i pripadajući detektor koji prikuplja reflektirane zrake. Ovdje su nabrojane samo neke vrste senzora, no jasno je da se mogu koristi i drugi senzori. [3]



Slika 3. Višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaj [5]

2.1.1. Kontaktne metode

Kod kontaktnih metoda ticalom se ostvaruje fizički dodir sa mjernim komadom. Postupak je takav da se ticalo dovede do željene lokacije, napravi se kontakt ticala sa površinom mjernog komada, vrati se natrag i premjesti na drugu lokaciju te se postupak ponavlja onoliko puta koliko točaka je potrebno izmjeriti.

Postoje i izvedbe kontaktnih sondi kod kojih se skenira površina komada tako da ticalo dovede u fizički dodir sa mjernim komadom i nastavlja se gibati duž njegove površine čime se podaci o mjerenju kontinuirano prikupljaju. Kod takvih izvedbi prikuplja se puno više podataka nego kod metode točka po točka, brži su i temeljitiji, ali potrebna je i složenija kontrola kako bi se održao kontakt između površine i ticala zbog raznih odstupanja oblika jer se sonda pomiče. Programski sustav mora zadržati prostorne odnose svih prikupljenih točaka. [4]

2.1.2. Optičke metode

Prednosti od video senzora na višesenzornim mjernim uređajima je sposobnost CCD kamere da precizno izmjeri područja sa blagim zaobljenjima, rubove i značajke koje su toliko male da ih ticalo ne može dosegnuti ili komade koji su prekrhki. Snimanjem komada prikupljajući točke područja u optičkom vidokrugu kamere, takav uređaj može razviti 3D konturni prikaz površine. Mogućnost optičkog zumiranja omogućuje skeniranja koja variraju po pitanju rezolucije, čime se prilagođavaju promjenama površinske teksture i različitim veličinama i značajkama oblika.

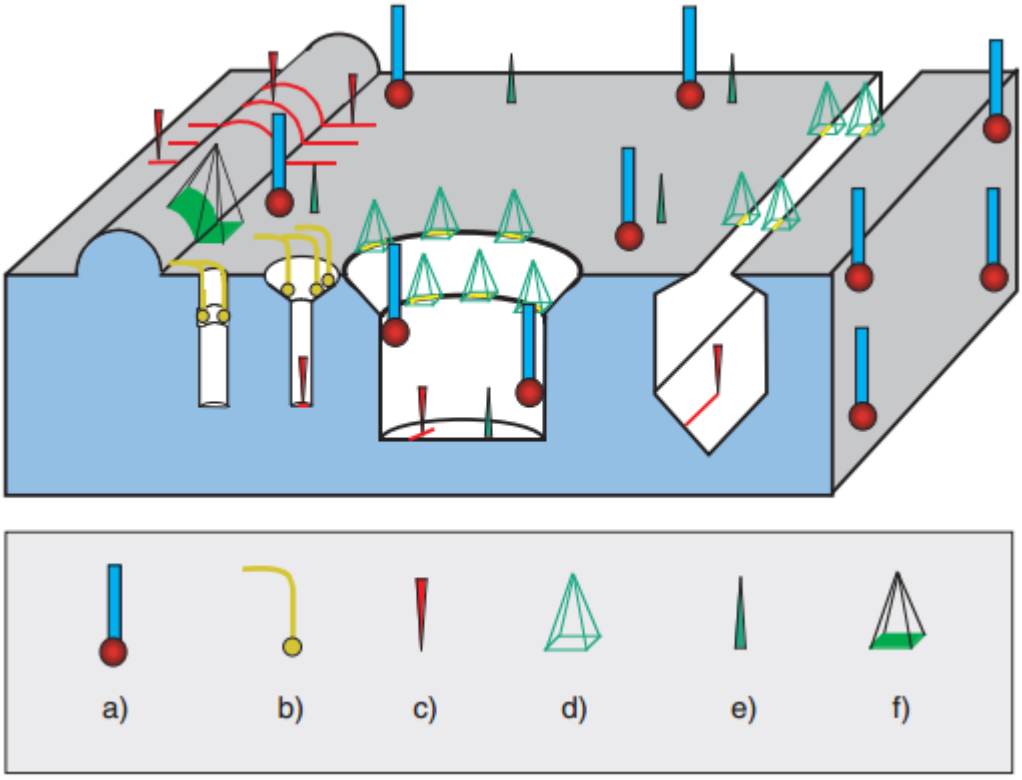
Lasersko skeniranje popunjava mali međuprostor između kontaktnih i optičkih metoda. Koristi se za vrlo složena područja, najčešće gdje ticalo ili kamera ne mogu ući. Kao primjer može se navesti mjerenje značajki dna neke rupe. Pod pojmom složena područja misli se i na ona mjesta gdje je koncentracija nekih oblika velika, ako postoji više cilindričnih udubljenja lasersko skeniranje omogućuje brže obavljanje mjerenja za razliku od mjerenja ticalom gdje se svaki cilindar mora posebno mjeriti. Laserski uređaji pomiču točku ili lasersku liniju duž površine mjernog komada, kontinuirano prikupljajući podatke o točkama.

Poput laserskih metoda, projekcijski skeneri se također mogu koristiti za 3D mjerenje površine istovremeno brzo i točno. Sustav fokusira izvor svijetla na ciljanu površinu mjernog komada, prikuplja podatke o raspršenju svijetla i analizira spektralan odziv kako bi odredio

udaljenost do površine. Osim što je metoda brza i točna, omogućuje mjerenje visoko reflektirajućih površina, ali i onih koje su prozirne. [4]

2.2. Princip rada

Kod višesenzornih trokoordinatnih mjernih uređaja, podaci o položaju točaka se prikupljaju korištenjem više vrsti senzora gdje jedna metoda nadopunjuje drugu, a prikupljene točke se koriste za određivanje kutova i udaljenosti njihovih međusobnih udaljenosti. To omogućuje ovakvim sustavima korištenje senzora koji je najpogodniji za mjerenje određene značajke površine komada, jer nije bitan način na koji je pojedina točka mjerena, čime je moguće provesti mjerenja složenih oblika koja nisu moguća u sustavima sa samo jednim senzorom.



Slika 4. Višesenzorni princip rada [6]

Slika 4. prikazuje mogućnost korištenja više vrsti senzora za mjerenje različitih oblika površine; a) mehaničko ticalo, b) vlaknasto ticalo, c) laser, d) fotogrametrijsko mjerenje, e) auto fokusiranje, f) projekcijski skener

2.2.1. Zamjena senzora

Sustav izmjene senzora za vrijeme mjerenja može se izvesti na dva načina. Najčešći način je taj da se ostali senzori nalaze na postolju za promjenu senzora, slika 5. Uređaj ispusti jedan senzor na slobodno mjesto postolja i automatski preuzima drugi bez prisustva operatera. Neki sustavi su dizajnirani tako da je drugi senzor uvučen u tijelo sustava pa se po potrebi automatski izvlači van, što omogućuje brži pristup drugom senzoru istovremeno smanjujući mogućnost oštećenja senzora.



Slika 5. Postolje za promjenu senzora [7]

2.3. Odabir uređaja

U sustavima namijenjenim za automatizirano mjerenje, korisnici obično traže balans između točnosti, brzine i troškova rada. Odabir između tih kriterija zna biti dosta težak. Razvoj višesenzorskih uređaja, uz naknadno poboljšavanje postojećih sposobnosti, nudi mogućnost zadovoljavanja navedenih kriterija. Većina uređaja su ustvari uređaji sa jednim senzorom kojima je naknadno ugrađen dodatni senzor. Kako su oni optimizirani za primarni senzor, nemaju programske funkcije koje optimiziraju performanse svih senzora. [4]

Višesenzorni zauzimaju manje prostora, kojeg bi zauzimali uređaji sa svakim senzorom posebno, troše manje energije, smanjuju vrijeme rada, a istovremeno i minimiziraju rukovanje i namještanje komada. Takav stroj može koštati manje od pojedinačnih strojeva sa jednom metodom mjerenja, čime se smanjuju i kapitalni troškovi. U današnje vrijeme kontinuiranih poboljšanja produktivnosti i smanjenja troškova, višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaji mogu biti važan čimbenik u postizanju tih ciljeva. Automatizacija višesenzorskih sustava

dovodi do glavne prednosti ovih uređaja u odnosu na tradicionalne CMM-ove, a to je ušteda vremena. Nakon što se programira postupak mjerenja, numerički upravljani mjerni uređaj će taj postupak slijediti automatski bez ikakve potrebe za operatorom, eventualno da nadzire proces mjerenja. Također je važno napomenuti da ovakvi sustavi mogu točnije okarakterizirati površinu mjernog komada nego sustavi sa jednim senzorom. Mogućnost uporabe više senzora prilikom mjerenja daje fleksibilnost ovakvim sustavima, što znači da mogu mjeriti razne oblike, s različitim dimenzijama i tolerancijama, pa je uređaj spreman zadovoljiti različite potrebe u svim situacijama.



Slika 6. Uređaj sa više senzora [8]

3. MJERNE RUKE

3D mjerne ruke, poznate kao i artikularne ruke, su prijenosni koordinatni mjerni uređaji, ručno vođeni, koji određuju i snimaju položaj sonde, odnosno ticala, u 3D prostoru i prikazuju rezultate kroz za to namijenjeni softver. Naziv su dobile zbog sličnosti sa ljudskom rukom sa ramenom, laktom, podlakticom i pripadajućim zglobom kao što je vidljivo na slici 7. Kako bi se utvrdio položaj ticala, u svakom spoju ruke se nalazi pripadajuća staklena pločica za mjerenje kuteva zakreta zglobova, enkoder, koji izračunava položaj ticala kako se ruka slobodno kreće tijekom obavljanja mjerenja.



Slika 7. 3D mjerna ruka [9]

Radijalni doseg ruke kada je potpuno ispružena se kreće u rasponu od 0,5m do 2m. U koordinatnoj mjernoj industriji, ruke su klasificirane prema ukupnom radnom volumenu, koji može biti od 1m do 6m. Što je ruka kraća, to je točnija jer je u tom slučaju manje mehaničkih pogrešaka povezanih sa duljinom pojedinih dijelova. Također podjela se može dati i prema stupnju slobode gibanja. Ruke najčešće imaju 6 stupnjeva slobode gibanja, ali ako na kraju

imaju i ručku za upravljanje sa rotirajućim zglobom, onda se mogu smatrati kao uređaji sa 7 stupnjeva slobode gibanja.

Jedna od glavnih prednosti pri korištenju mjernih ruku je njihova prenosivost. U usporedbi sa tradicionalnim CMM-ovima, ruke su znatnom manje i lakše za korištenje, a zbog toga što nisu fiksirane na jednom mjestu omogućuju mjerenje na raznim mjestima bez da se dio donosi na uređaj. To smanjuje vrijeme zastoja stroja i sprječava pojavu uskog grla uzrokovanog kontrolom u proizvodnji. Mjerne ruke su također prilagodljive na nepovoljne okolišne uvjete, pogotovo na povišene temperature. Točnost mjernih ruku premašuje većinu ručnih uređaja za mjerenje. Osim šta su znatno jeftinije, mjerne ruke su i jednostavnije za korištenje od klasičnih nepomičnih CMM-ova. [10]



Slika 8. Primjena 3D mjerne ruke u proizvodnji [11]

3.1. Primjena 3D mjernih ruku

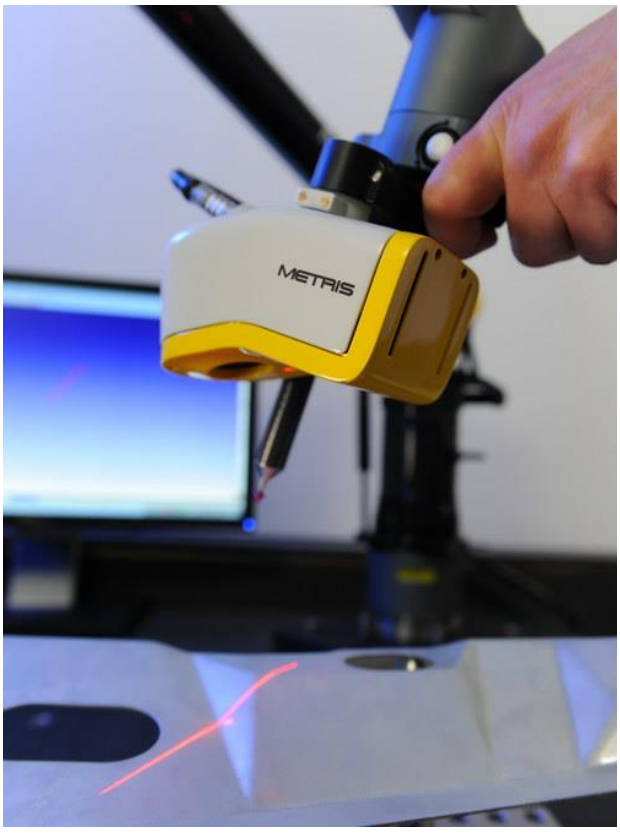
Najčešći zahtjevi za korištenje mjernih ruku su [10]:

- Dimenzijska analiza: Prikupljanje podataka o dijelovima kako bi se mogla napraviti usporedba sa podacima crteža i nacrta

- Kontrola na temelju CAD-modela: Usporedba stvarnih dijelova sa pripadajućim CAD modelom
- Međufazna kontrola: Kontrola prije, tijekom i nakon obrade dok je dio montiran na stroj
- Poravnavanje: Poravnavanje alata i naprava kako bi se točno postavili
- Povratno inženjerstvo: Prikupljanje jedinstvenih podataka dijela sa mjernom rukom opremljenu laserom za izradu CAD modela

3.2. Mjerne ruke sa mogućnošću laserskog skeniranja

Mjerne ruke mogu biti i opremljene sa uređajem za lasersko mjerenje. Lasersko skeniranje omogućuje prikupljanje podataka o dijelu bez izravnog kontakta, slično kao postupak lakiranja sa pištoljem za nanošenje boje. Laserski skener može brzo prikupiti podatke (oblake točaka) pri visokim frekvencijama što rezultira milijunima točaka koje će kasnije formirati CAD model. Prednosti korištenja laserskog skeniranja uključuju brzinu prikupljanja podataka, jednostavnost korištenja i manje rizika od utjecaja na dio prilikom postupka mjerenja.



Slika 9. 3D mjerna ruka sa laserski skenerom [12]

Laserski skeneri koji se koriste na mjernim rukama obično se sastoje od kamere i lasera. Emitirano lasersko svijetlo koje izlazi iz skenera ima bit će prikazano kao laserske pruge ili laserske pomične točke koji izgledaju kao laserska linija. Laser se zatim projicira na dio, a kamera zatim snima podatke temeljene na položaju laserske linije na dijelu i dobivaju se 3D koordinate točaka preko računala. Brzina prikupljanja točaka može biti od 10 000 pa do nekoliko stotina tisuća točaka u sekundi. [10]

3.2.1. Primjena 3D mjernih ruku sa laserskim skenerom

Najčešći zahtjevi za korištenje mjernih ruku sa laserskim skenerom su [10]:

- Kontrola na temelju CAD-modela: Usporedba stvarnih dijelova sa pripadajućim CAD modelom
- Povratno inženjerstvo: Prikupljanje 3D podataka dijela za izradu CAD modela
- Izrada dokumentacije: Prikupljanje digitalnih informacija za izradu dokumentacije

3.3. 3D mjerne ruke protiv drugih mjernih metoda

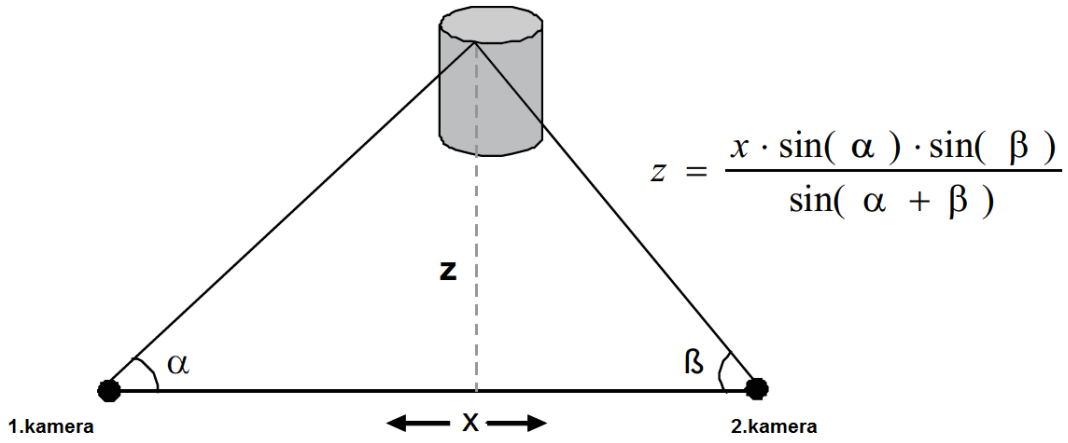
Stotinama godina, ručni mjerni uređaji kao što su mikrometar i pomično mjerilo su se koristili za mjerenja dimenzija. Zbog svoje mehaničke jednostavnosti takvi alati se mogu koristiti samo za neke osnovne izmjere širine, duljine ili debljine. Ukoliko je potrebno izmjeriti neki složeni oblik, mjerenje ručnim uređajima bi oduzelo mnogo vremena. Iako takve metode daju točne i precizne izmjere, potreban je kvalificiran radnik koji bi obavio mjerenje jer su takva mjerenja osjetljiva na ljudske pogreške.

Koordinatni mjerni uređaji su uvedeni 1960-ih godina za strojare i inženjere kako bi mogli izmjeriti različite oblike te mjerenja sa visokom točnošću, većom nego što pružaju ručne metode mjerenja. Fiksni CMM-ovi obično se sastoje od postolja za mjerenje, mjerne sonde, računala i pripadajućeg softvera. Sonda se može pomicati u smjeru tri osi samo u mjernom volumenu stroja. S napretkom tehnologije, mjerne ruke su razvijene kako bi obavljale istu funkciju kao CMM, ali nisu ograničene na jedno mjesto već su pokretne, odnosno mobilne. Iako ne pružaju točnost kao nepomični CMM-ovi, mjerne ruke su lakše, jednostavne za korištenje i puno jeftinije od CMM-ova.

4. FOTOGRAMETRIJSKE METODE

Fotogrametrija je trodimenzionalna koordinatna mjerna tehnika koja koristi fotografije kao temelj za mjerenje oblika, veličine i položaja objekta. Više od 30 godina, građevinari i geodeti koriste fotogrametriju za izradu topoloških 3D karata. Industrijski inženjeri također koriste fotogrametriju za mjerenja, kontrolu, promatranje deformacija i sl. Za industrijske potrebe koristi se blisko-predmetna fotogrametrija. Tehnologija se koristi u cijelom svijetu u različitim proizvodnim industrijama kao što su automobilska i zrakoplovna, u brodogradnji itd. [13]

Triangulacija je temeljno načelo koje se koristi u fotogrametriji. Snimanjem sa najmanje dvije različite lokacije (stereo par fotografije), tzv. linije vizira se mogu razviti od svake kamere pa do točaka na objektu. Te linije, odnosno zrake zbog njihove optičke prirode, matematički se presijecaju kako bi producirale 3D koordinate željenih točaka. Sljedeća slika prikazuje princip određivanja udaljenosti na temelju triangulacije.



Slika 10. Princip triangulacije [14]

Fotogrametrijsko mjerenje spada u skupinu pasivnih metoda za određivanje položaja mjerne točke isključivo na temelju površinskih fotogrametrijskih markera i obradom slike, u odnosu na aktivne metode koje neposredno definiraju položaj mjerne točke, relativno u odnosu na mjerni senzor, što se postiže ili izravnim dodirom ticala na površinu mjerenog dijela ili projiciranjem neke vrste svijetla na istu površinu.

4.1. Princip rada

Fotogrametrijska kamera ne mjeri objekt izravno, već mjeri središte reflektirajuće oznake. Zbog toga što fotogrametrija mjerni na principu triangulacije, samo 2 fotografije su potrebne u teoriji za mjerenje. Međutim, najmanje četiri do šest fotografija se preporuča da bi se mogla dobiti pouzdana mjerenja. Snimanje se obavlja sa jednom kamerom čiji se položaj u prostoru neprestano mijenja ili sa dvije fiksno postavljene kamere relativno jedna na drugu.

Nakon što su fotografije snimljene, sofisticirani softver za obradu automatski pregledava prikupljene digitalne fotografije i izvodi položaj određene mjerne točke na snimkama iz različitih pozicija kamare primjenom triangulacije. Osim za mjerenja, grafičko sučelje softvera omogućuje operateru uvid u točke, pozicije kamere prilikom snimanja, sjecišta kutova linija vizira i sl. [13]

4.1.1. Fotogrametrijske oznake

Fotogrametrijski sustav definira položaj objektnih točaka preko fotogrametrijskih markera na njegovoj površini. Ti markeri su načinjeni najčešće od 0,1mm debelog, ravnog, sivkasto reflektirajućeg materijala. Takav materijal ima nekoliko prednosti u odnosu na konvencionalne mjerne markere koji se sastoje od bijelog kruga na crnoj površini (ili obrnuto). Učinkovitije vraća svjetlo prema izvoru svjetala obično 100-1000 puta učinkovitije od konvencionalnih markera. Sljedeća slika prikazuje strojni dio označen fotogrametrijskim oznakama. [13]



Slika 11. Fotogrametrijske oznake [15]

4.2. Tipovi fotogrametrijskih sustava

Fotogrametrijski sustavi mogu biti:

- Ručni sustav
- Robotizirani sustav

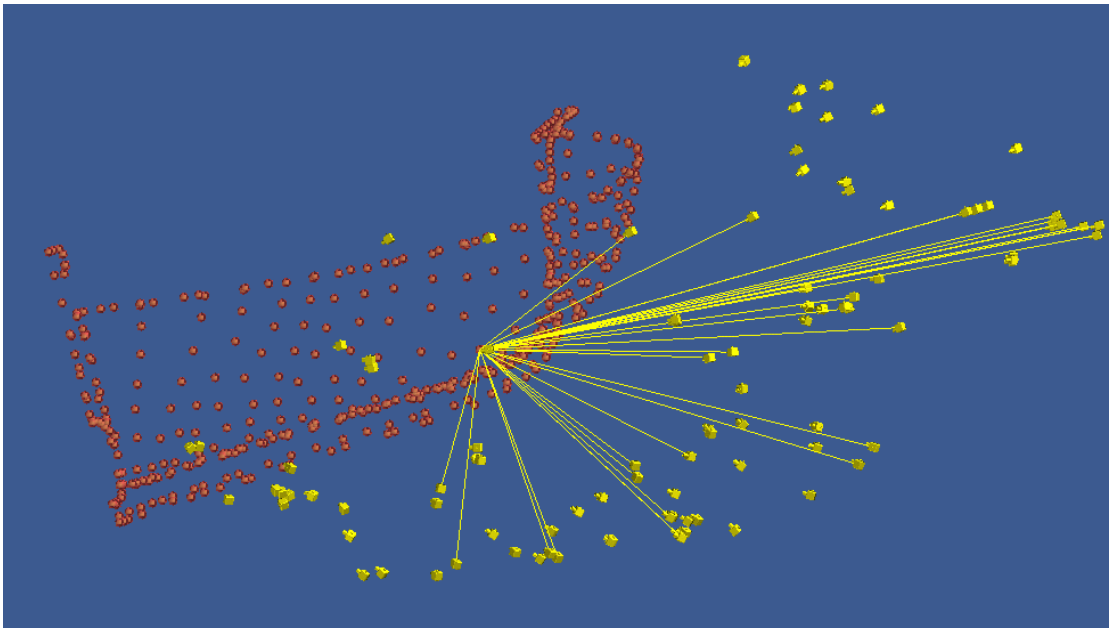
4.2.1. Ručni sustav

Ručni sustav za fotogrametrijsko snimanje sastoji se od profesionalnog digitalnog fotoaparata, računala za obradu rezultata, fotogrametrijskih oznaka, referentnih motki i druge opreme kao što je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 12. Ručni fotogrametrijski sustav [16]

Na objekt se nanosi potreban broj mjernih točaka kako bi se točno opisala njegova geometrija. Digitalnim fotoaparatom snimaju se fotografije iz različitih položaja koje se nakon toga obrađuju na računalu. Program u digitalnim fotografijama s visokom točnošću automatski pronalazi sve mjerne točke. Kada svakoj točki ustanovi položaj u svim snimkama na kojima se ona pojavljuje program provodi predkalibraciju na principu triangulacije i optimizaciju rezultata "metodom izjednačenja zrakovnog snopa". Mjerilo snimanja određuje se na temelju referentnih motki. Konačan rezultat ove automatizirane analize precizne su trodimenzionalne koordinate mjernih točaka u zajedničkom koordinatnom sustavu.



Slika 13. Prikaz prostornog položaja kamere i mjernih točaka [16]

Na slici 13. vidi se položaj mjernih točaka s objekta (crveni kružići) i pozicije kamere odakle su fotografije snimane (žuta boja). Linije predstavljaju optičke pravce projekcije jedne mjerne točke kroz objektiv kamere u svim položajima snimanja u kojima je ta točka bila vidljiva. Sjecište ovih pravaca definira položaj te mjerne točke u prostoru. Nakon što je izračunat položaj mjernih točaka u prostoru (koordinate X,Y,Z), trodimenzionalni oblik objekta postaje poznat. Time je omogućeno određivanje njegovih dimenzija.

4.2.2. Robotizirani sustav

Robotizirani fotogrametrijski sustavi se uobičajeno sastoje od jedne kamere i uređaja za 3D skeniranje. Takvi sustavi omogućuju:

- Precizna mjerenja
- Kratko vrijeme ciklusa
- Uštedu vremena
- Veliku ponovljivost i pouzdanost
- Niže troškove fiksiranja dijelova



Slika 14. Robotizirani fotogrametrijski sustav [17]

Slika 14. prikazuje robotizirani fotogrametrijski sustav koji ima mogućnost 3D skeniranja projekcijom uzorka na površinu mjernog komada što omogućuje visoku preciznost mjerenja

4.3. Postupak mjerenja

Mjerni sustav za fotogrametrijsko mjerenje sastoji se od senzora koji sadrži jednu ili više optičkih komponenata za akvizaciju slike, zatim posebno pripremljenog mjernog objekta, te programske podrške za analizu snimljenih fotografija.

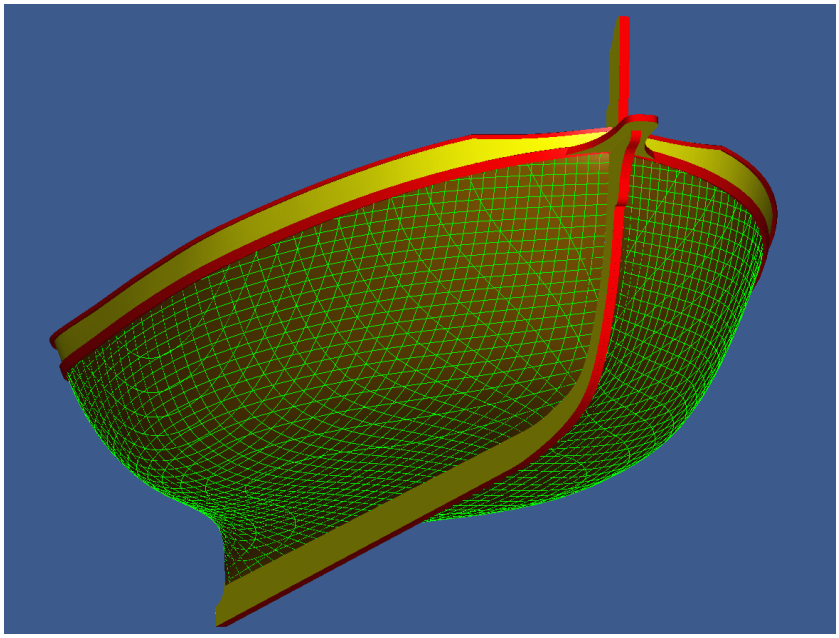
Fotogrametrijsko mjerenje se obično sastoji od sljedećih koraka [18]:

- Planiranje mjerenja
- Označavanje objekta fotogrametrijskim oznakama (markerima)
- Fotografiranje
- Mjerenje na temelju slika
- Obrada slika kako bi se dobili 3D koordinate točaka
- Analiza rezultata

Ovo je općeniti slijed postupaka jer svaki mjerni projekt je jedinstven. Sadržaj i redoslijed gore navedenih koraka se može promijeniti prema zahtjevima projekta.

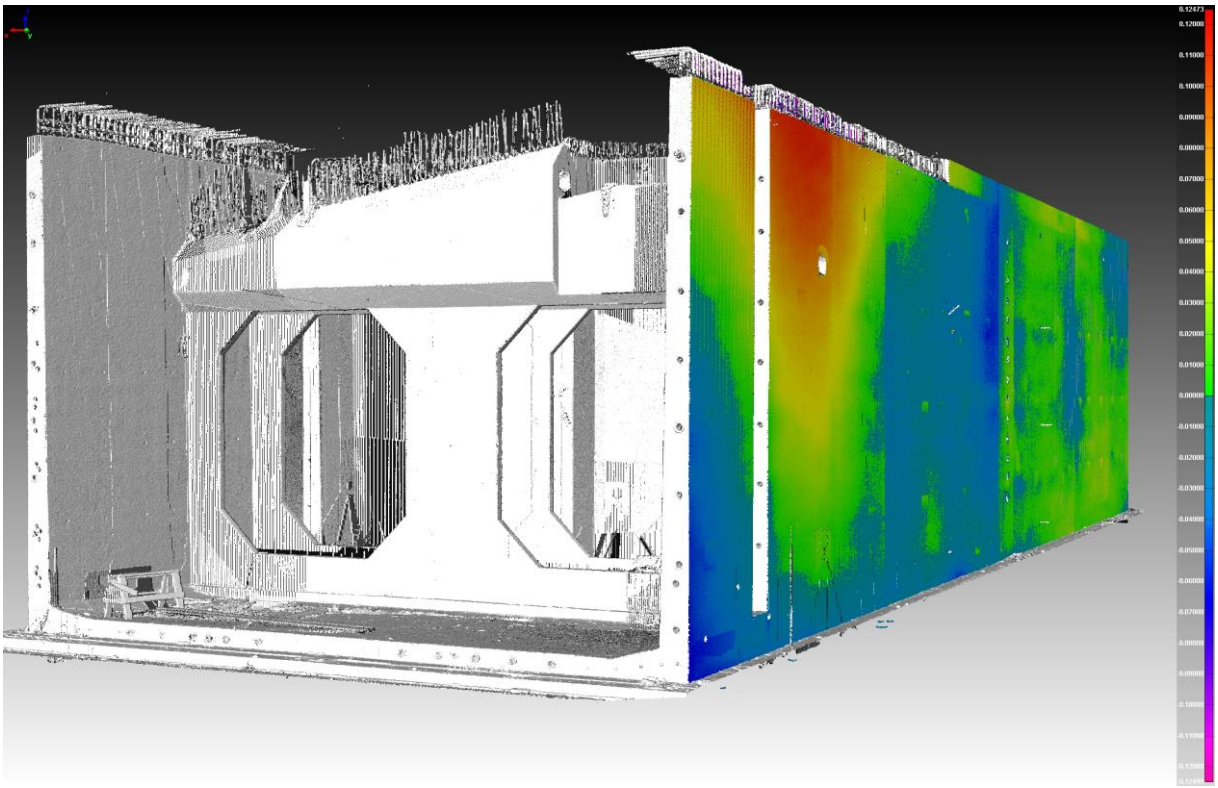
4.4. Primjena fotogrametrije

Fotogrametrija je najprikladnija za mjerenje velikih objekata, u teškim i prometnim industrijskim postrojenjima gdje su često prisutni okolišni čimbenici poput vibracija i visokih temperatura. Digitalna fotogrametrija omogućava precizna mjerenja čak i ako operater stoji na vibrirajućem, nestabilnom podu ili na nekoj skeli koja se nalazi na podu postrojenja što je čest slučaj u brodogradilištima. Fotogrametrijska kamera može prikupiti 3D podatke mjerenja laboratorijske kvalitete i točnosti, a da joj pri tome nisu potrebni laboratorijski uvjeti koji su potrebni drugim mjernim instrumentima. Fotogrametrija se također koristi i za mjerenje deformacija. Mobilnost, brzina, točnost i prilagodba prostornim ograničenjima su snažne prednosti fotogrametrijskog mjerenja. [13]



Slika 15. Reverzno inženjerstvo trupa broda [16]

Slika 15. prikazuje karakteristične linije trupa broda, odnosno paralelne presjeke u horizontalnoj, uzdužnoj i poprečnoj ravnini nakon provedenog fotogrametrijskog snimanja i računalne obrade podataka.



Slika 16. Mjerenje deformacija zida [19]

Slika 16. prikazuje mogućnost fotogrametrijskog mjerenja deformacije objekta. Žuta i crvena boja na slici predstavlja vrijednost veću od propisane dok plava i zelena predstavljaju niže vrijednost od propisanih.

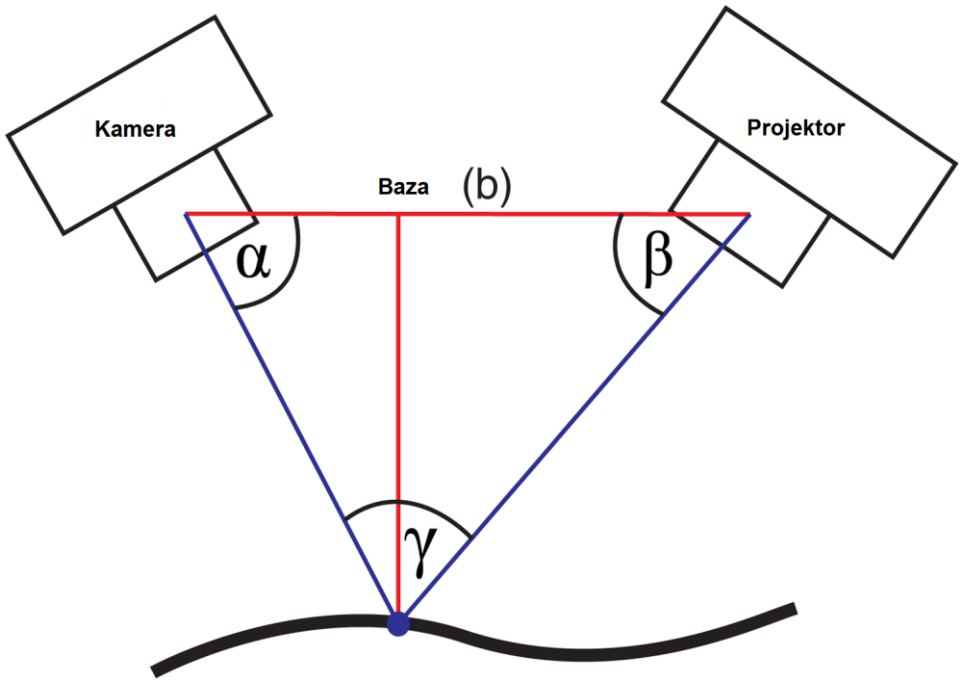
5. PROJEKCIJSKI SKENERI

5.1. Projekcija uzorka

3D optička metrologija koja koristi projekciju strukturiranog uzorka svjetla je dobro uhodana metoda za brzo dobivanje 3D koordinata detalja na mjernom komadu. To je beskontaktna metoda mjerenja i pogodna je za primjenu u područjima automatizirane optičke kontrole.

Mjerni sustavi koji koriste strukturirano svjetlo rade na principu triangulacije kod kojih se serija svjetlosnih točaka, piksela, projicira kao uzorak na površinu mjerenog objekta. Deformacija projiciranog uzorka svijetla na objektu se snima kamerom i uspoređuje se orginalnim, odnosno referentnim uzorkom koji daje projektor. Kako su poznati kutovi nagiba projektora i kamere, triangulacijom se može odrediti udaljenost svakog piksela.

Sustav za mjerenje na bazi strukturiranog svjetlosnog uzorka se sastoji od projektora, detektora (jednog ili više) i jedinice za procesiranje/analizu podataka. Sinkronizacija između projektora i detektora (CCD kamera) je bitna za precizno i učinkovito bilježenje slike. [21]



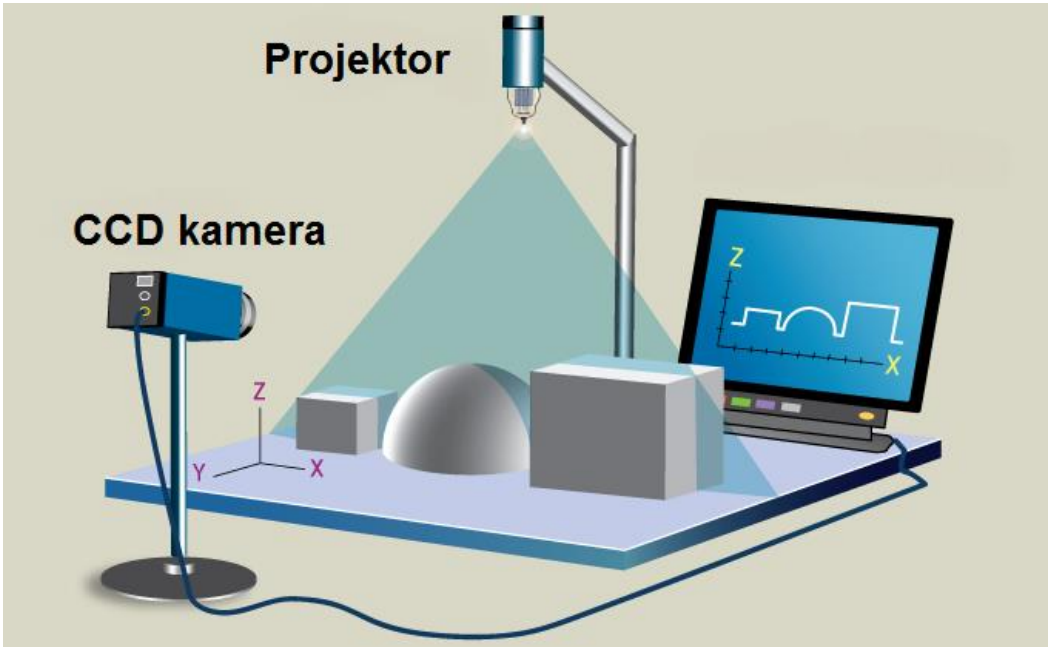
Slika 17. Sustav za mjerenje projekcije uzorka [20]

Izbor uzorka strukturiranog svijetla je povezan sa obradnim tehnikama podataka koje se koriste za računanje 3D koordinata točaka. Na odabir uzorka utječu parametri zahtjeva kao što su točnost, vrijeme ciklusa mjerenja, površinske karakteristike objekta i sl.

Koraci kod 3D optičkih mjerenja [21]:

- Postupak kalibracije
- Projekcija uzorka
- „Hvatanje“ slike
- Dekodiranje uzorka na temelju piksela
- Triangulacija
- Rekonstrukcija površine

Uzorak koji se projicira na dio može biti 1D ili 2D uzorak. Sljedeće slike prikazuje 1D uzorak.

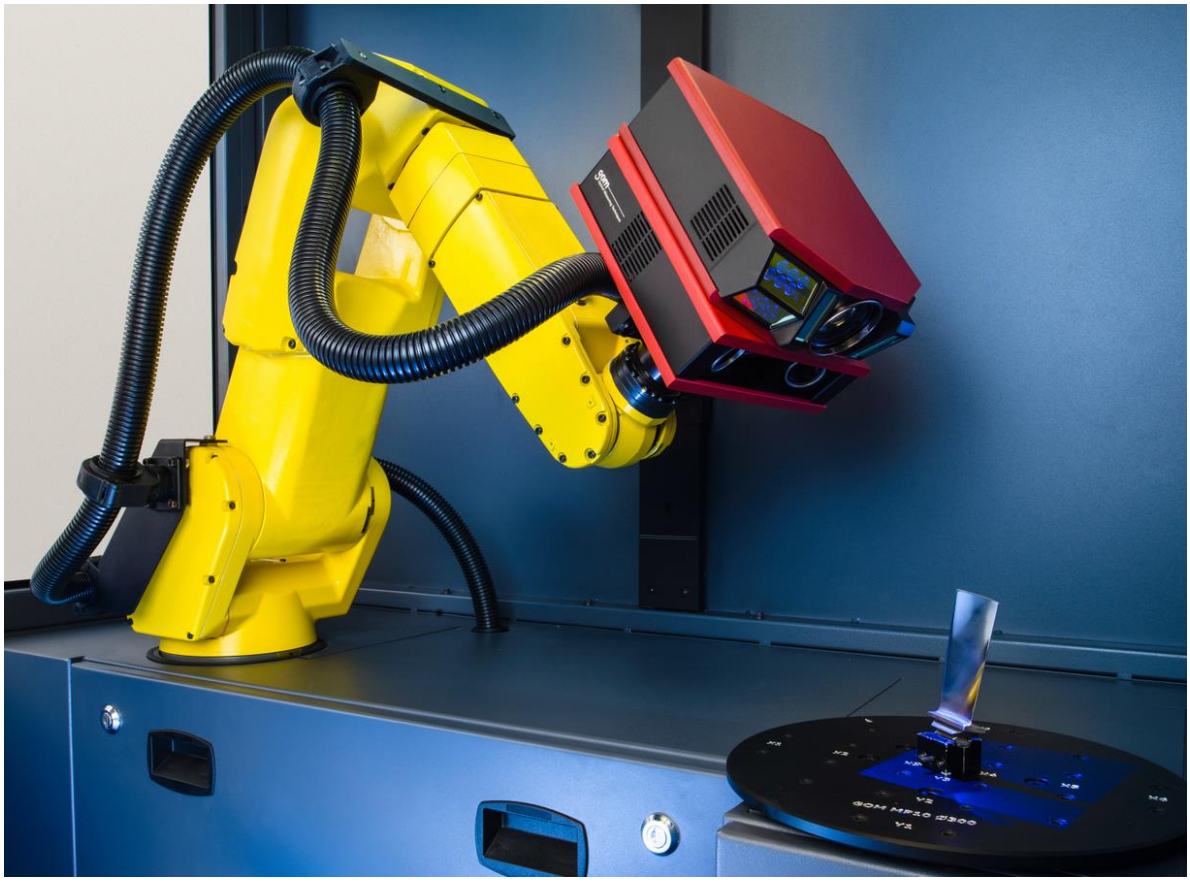


Slika 18. Projekcija 1D uzorka [22]

5.1.1. 3D skeniranje plavim svjetlom

Projicirani uzorci pri skeniranju u zadnjih nekoliko godina se mogu naći u različitim bojama. Poznata bijela svjetlost je najčešće zamijenjena plavom, a moguće su izvedbe i sa crvenom i zelenom projekcijom. Studije su pokazale da boja uzorka jako malo utječe na povišenje točnosti, tako da je promjena boje više uzrok marketinške prirode. Ipak postoje neke prednosti plavog svjetla u odnosu na bijelo, a to su [23]:

- Dugotrajniji izvor svjetla
- Niža temperatura zbog uporabe LED svjetla
- Sposobnost skeniranja u dobro osvjetljenim prostorijama zbog mogućnosti filtriranja drugih izvora svjetala



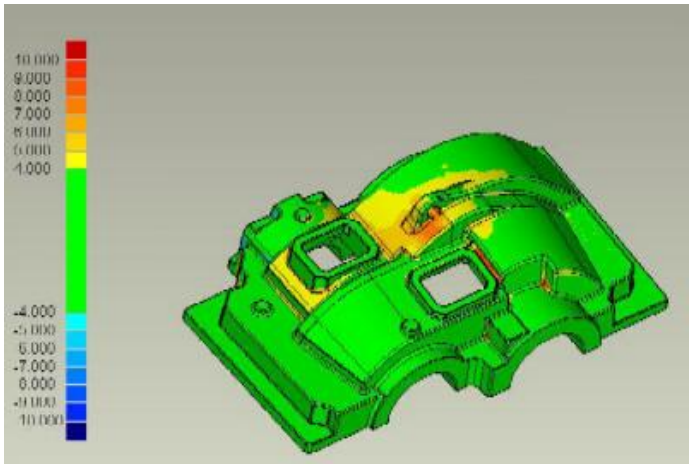
Slika 19. Skeniranje plavim svjetlom [26]

Slika 19. prikazuje robotizirano skeniranje dijela koji se nalazi na rotirajućem postolju. Uređaj projicira uzorak plavog svjetla na dio, a kamera snima deformaciju projiciranog uzorka.

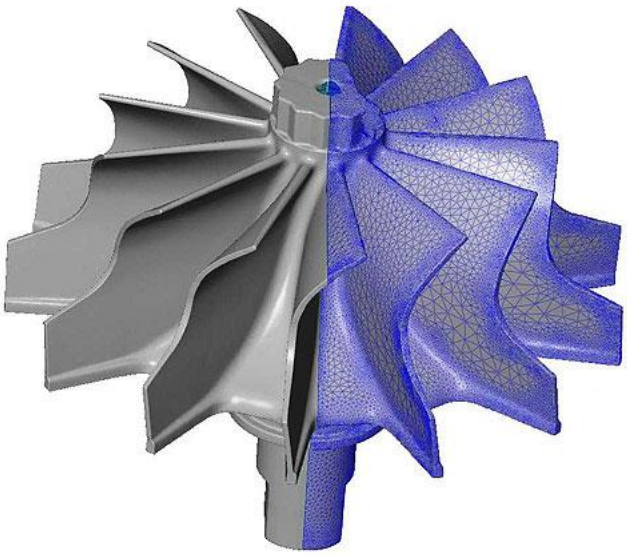
5.1.2. Primjena projekcijskih skenera

Najčešći zahtjevi za korištenje projekcijskih skenera su:

- Mjerenje složene geometrije
- Povratno inženjerstvo



Slika 20. Mjerenje složene geometrije [24]



Slika 21. Povratno inženjerstvo [25]

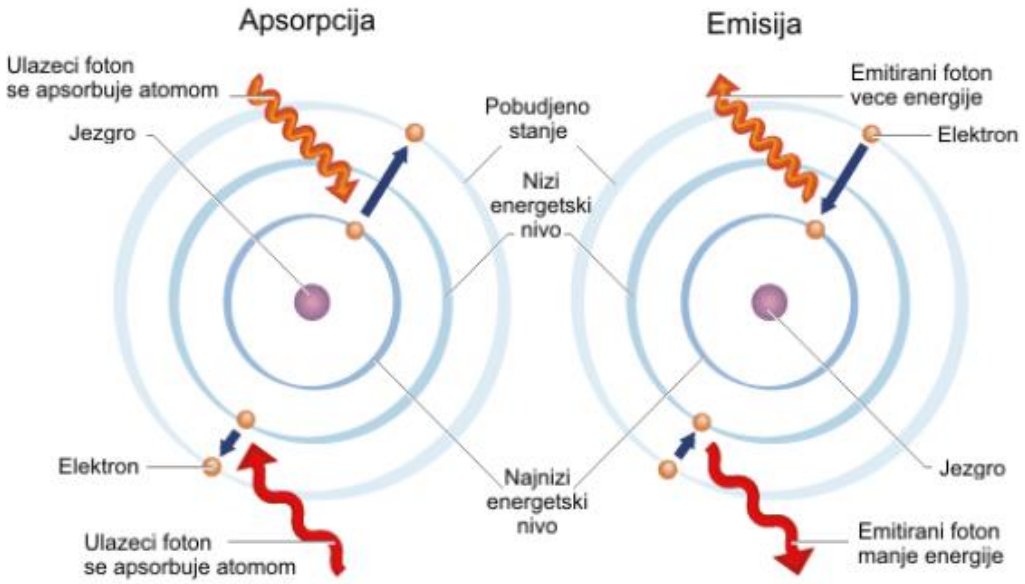
Prethodne dvije slike prikazuju mogućnosti primjene projekcijskih skenera u svrhu dobivanja 3D modela.

6. UREĐAJI ZA LASERSKO 3D MJERENJE

6.1. Općenito o laseru

Laser (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) naziv je za optičku napravu koja emitira koherentni snop fotona.

Laser radi na principu pobude atoma izazivajući svjetlosnu emisiju i apsorciju pri prolasku sa jedne na drugu energetsku razinu. Ukoliko se dio atoma ili molekula laserskog medija dovede u pobuđeno stanje, oni će emitirati fotone spontanom emisijom. Ti fotoni se dalje mogu apsorbirati na nepobuđenim atomima, ili izazvati stimuliranu emisiju na preostalim pobuđenim atomima. Laserska zraka se može proizvesti jedino ako stimulirana emisija dominira nad apsorpcijom i spontanom emisijom zračenja. Slika 22. pokazuje princip nastajanja laserske zrake. [27]



Slika 22. Apsorcija i emisija svjetlosti [28]

Osnovne karakteristike laser su [28]:

- Koherentnost
- Monokromatičnost
- Linearna polariziranost

Intenzitet emisije laserskog snopa mnogo je veći u odnosu na druge izvore svjetlosti. Na bazi laserske tehnologije konstruirani su mjerni sustavi.

6.1.1. Primjena lasera u mjerenju

Laserski mjerni sustavi koriste se u proizvodnim mjerenjima za [28]:

- Najtočnija mjerenja dimenzija
- Pozicioniranje, dijagnostiku, podešavanje i montažu alatnih strojeva
- Kontrolu kvalitete
- Provjeru okomitosti površina
- Izradu preciznih optičkih skala u optičkoj industriji

Laserska mjerenja i kontrola mogu se vršiti u statičkim i dinamičkim uvjetima uz beskontaktno djelovanje mjernog sustava. Laserski mjerni sustavi su najtočniji u suvremenoj mjernoj tehnici pa se koriste i kao etaloni. Točnost lasera je 10 do 100 puta veća od ostalih mjernih sustava. Laserski inteferometri su najtočniji za mjerenje dimenzija svih drugih mjernih uređaja pa se koriste kao internacionalni i nacionalni etaloni za te namjene. Laserski interferometri rade na principu refleksije ili registracije prolazećih zraka.

Primjena laserske metrologije može se podijeliti prema postupcima koji se provode, a to su [28]:

- Princip trokuta kod kojeg se koriste triangulacijske metode računanja udaljenosti
- Postupci mjerenja vremena prolaska zraka do mjernog objekta i nazad
- Postupci autofokusa

Procedure mjerenja vremena se koriste kada su u pitanju veliki mjerni komadi. Mjeri se vrijeme potrebno da laserska zraka dođe do mjernog komada i da se vrati. Na osnovu vremena i poznate brzine svjetlosti može se točno odrediti udaljenost. Autofokusne metode se koriste za mjerenje kvalitete površine.

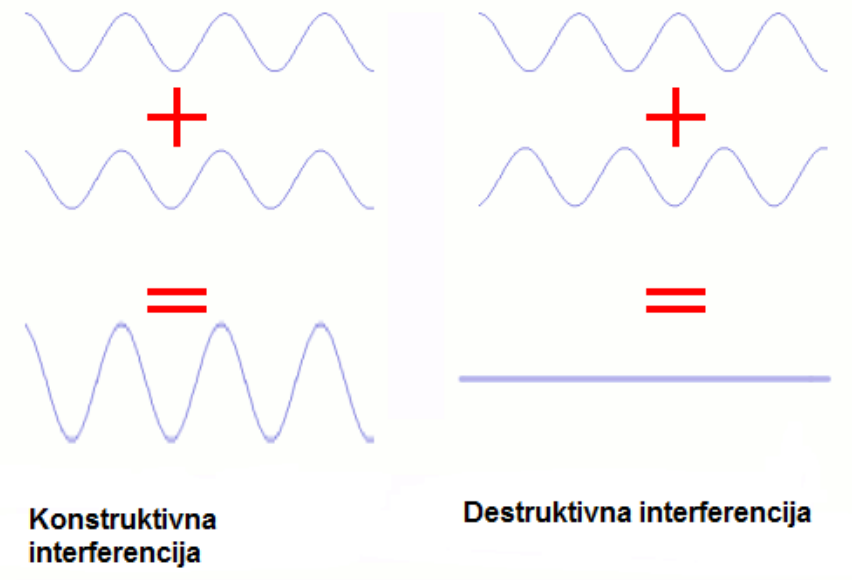
6.2. Laserska interferometrija

Laserska interferometrija je dobro uhodana metoda za mjerenja udaljenosti i kutova sa odličnom preciznošću. Davne 1880. godine, laserska interferometrija je prvi put demonstrirana kao metoda mjerenja. Iako je tehnologija znatno napredovala kroz godine, osnovni princip korištenja jako male, stabilne i točno definirane valne duljine svjetla kao jedinice mjerenja je opstao. [29]

Fizička osnova interferometrijskih postupaka su koherentni svjetlosni valovi koji putuju različitim putevima. Osnova rada laserskog interferometra je, slika 23., je razdvajanje elektromagnetskih valova, kao i njihovo ponovno spajanje nakon prelaska različitih puteva. Ta pojava spajanja dvaju valova koji nose energiju naziva se interferencija, a nastali val dobiva oblik i veličinu ovisnu o obliku izvornih valova.

Postoje dvije vrste interferencije[30]:

- Konstruktivna
- Destruktivna



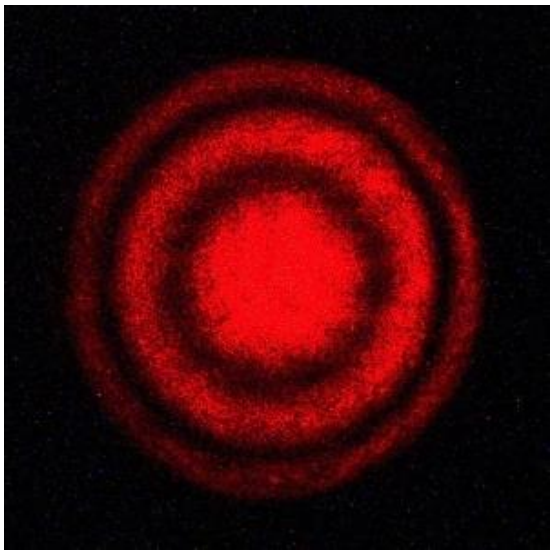
Slika 23. Vrste interferencije [30]

Slika 23. prikazuje konstruktivnu i destruktivnu interferenciju. Kod konstruktivne interferencije kombinacijom dva ili više valova dobiva se treći val. Novonastali val ima istu valnu duljinu i frekvenciju, ali veću amplitudu. Kod destruktivne vrhovi jednog vala su poništeni najnižom točkom drugog vala čime dolazi do njihovog poništenja.

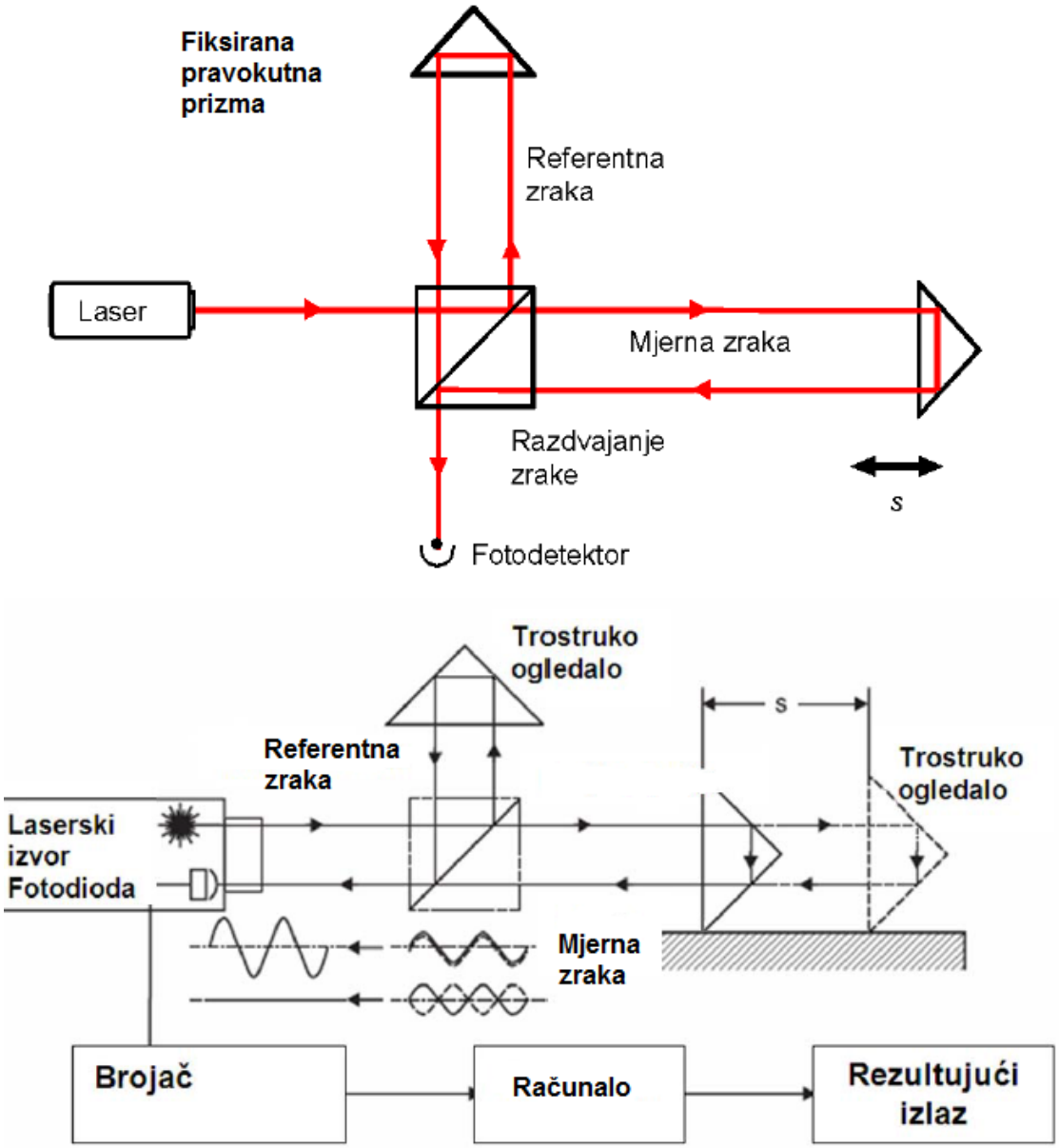
6.2.1. Princip rada laserskog interferometra

Osnovna ideja interferometrije uključuje snop svjetla (ili neku drugu vrstu elektromagnetskog zračenja) i njegovo dijeljenje na dva jednaka dijela korištenjem djelitelja zrake. To je komad stakla čija je površina prevučena vrlo tankim slojem srebra. Ako se svjetlo usmjeri na djelitelj, polovina zraka će proći kroz njega, a ostatak će se reflektirati. Reflektirana zraka koja se naziva i referentna putuje do prizme i od nje do fotodetektora. Druga zraka putuje do ili kroz mjereni komad, odbija se od drugog zrcala nazad kroz razdjelnik do kamere i pri tome prelazi veću udaljenost od prve zrake, pri čemu joj se malo mijenja faza.

Kada se te dvije zrake susretnu na fotodetektoru, one se preklapaju i njihova fazna razlika stvara uzorak svijetlih i tamnih područja. Svjetla područja su uzrok konstruktivne interferencije, a tamna destruktivne kao što je vidljivo na slici 24. Točan uzorak interferencije ovisi od dodatnom putu koji je prešla druga zraka. Pregledom i mjerenjem svijetlih i tamnih područja, odnosno koliko se puta izmijenila interferencija iz konstruktivne (svijetle pruge) u destruktivnu (tamne pruge), udaljenost se može odrediti velikom točnošću. [30]

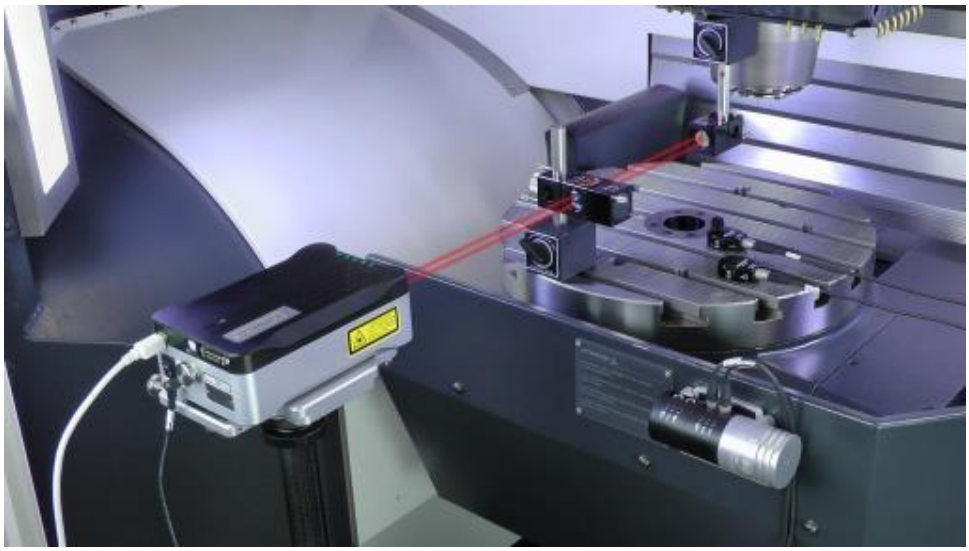


Slika 24. Uzorak svijetlih i tamnih pruga [31]

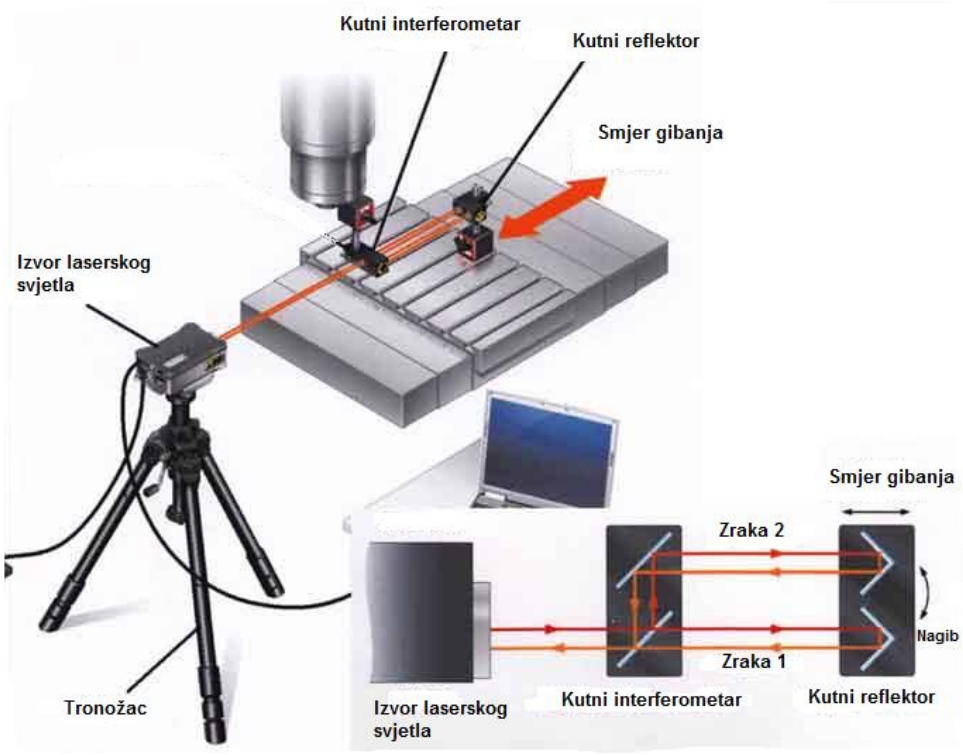


Slika 25. Princip interferometrijskog mjerenja dužine [32]

Laserski interferometri se koriste za precizna mjerenja dužina i precizna mjerenja kutova. Najčešće se primjenjuju u proizvodnji alata, posebno za visoko precizne strojeve. Strojevi čiji je pogon kontroliran laserskim interferometrima služe u proizvodnji složenih komponenti sa proizvodnim tolerancijama izraženim u nanometrima



Slika 26. Laserski interferometar za mjerenje linearnog pomaka [33]

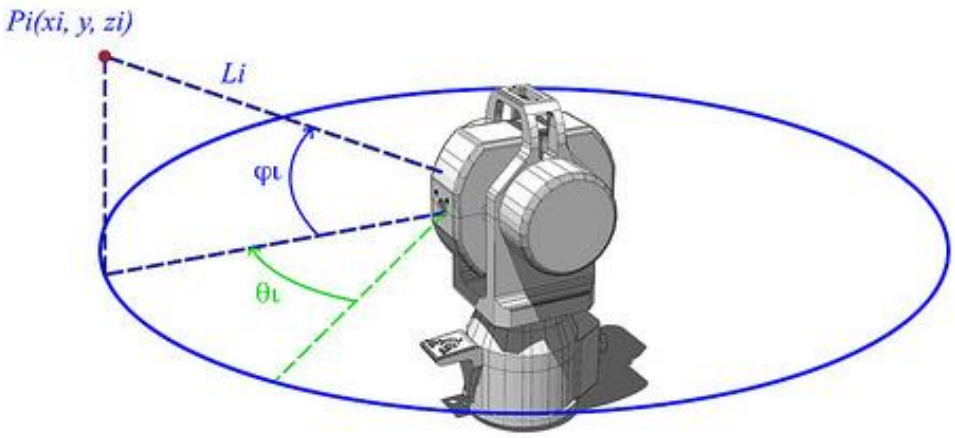


Slika 27. Laserski interferometar za mjerenje zakreta [34]

Slika 27. prikazuje laserski interferometar koji mjeri promjene nagiba kutnog reflektora na temelju relativnih promjena duljina zrake 1 i 2 od interferometra do reflektora. Zraka koja izlazi iz laserskog uređaja u kutnom interferometru se razdvaja na dva jednaka i dijela koji se reflektiraju od kutnog reflektora, u interferometru spajaju i putuju nazad na fotodetektor.

6.3. Laser tracker

Laser tracker je prijenosni koordinatni mjerni uređaj. Njegov veliki mjerni volumen omogućuje jednostavno i brzo mjerenje velikih dijelova. Slika 28. prikazuje laser tracker sa pripadajućim kutovima.



Slika 28. Laser tracker [35]

Rad laser trackera je vrlo jednostavan za razumjeti. On mjeri dva kuta i udaljenost. Udaljenost se mjeri laserskim interferometrom ili ADM metodom (eng. Absolute distance meter), a kutovi kutnim enkoderima koji mjere dvije mehaničke osi (azimutnu os i os rotacije). Tracker šalje lasersku zraku na retroreflektivnu metu koja se postavlja ili je već montirana na objekt koji se mjeri. Ta zraka se reflektira od mete i vraća natrag u tracker istim putem kojim je i izašla. Uređaj za mjerenje udaljenosti (laserski interferometar ili ADM) analizira svjetlost koja ulazi natrag u tracker i proračunava udaljenost do mete. [36]



Slika 29. Retrorefleksivna meta [37]

6.3.1. Primjena laser trackera

Najčešći zahtjevi za korištenje laser trackera su:

- Poravnavanje
- Montaža
- Kontrola
- Izrada alata
- Povratno inženjerstvo



Slika 30. Područje primjene laser trackera [38]

7. RAČUNALNA RENDGENSKA TOMOGRAFIJA

Računalna rendgenska tomografija utemeljena je 1972. godine zahvaljujući Britanskom inženjeru Godfreyu Hounsfieldu. Tehnologija koristi zračenje (x-zrake) za računalnu rekonstrukciju poprečnog tomografskog sloja na temelju višestrukog mjerenja apsorciranih vrijednosti x-zraka, odnosno izradu 3D prikaza skeniranog objekta.

3D računalna rendgenska tomografija predstavlja najnapredniji i najmoćniji uređaj za industrijsko mjerenje i analiziranje proizvoda napravljenih raznih vrsta materijala. Korištenjem ove metode, moguće je dobiti uvid unutar pojedinog dijela kako bi se uočili eventualni problemi i odstupanja nastali za vrijeme proizvodnje, osigurala dosljednost i kako bi se mogla izvući vrlo precizna i detaljna mjerenja unutarnje konfiguracije.

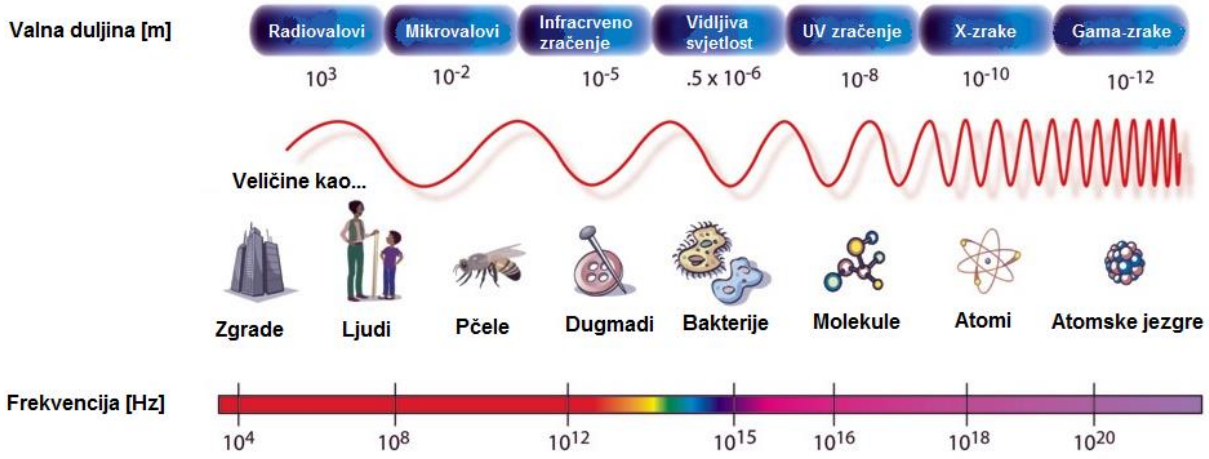
Prije nego što je računalna rendgenska tomografija našla primjenu u industriji, proizvođači su morali ponekad kako bi analizirali i testirali unutarnje značajke rezati ili lomiti prototipove pokušavajući identificirati nedostatke. Takav pristup je bio dosta kompliciran, dugotrajan, ali i skup. Potpuna dimenzijska inspekcija, unutarnja kontrola i usporedba sa CAD modelom istog dijela mogla je potrajati danima pa čak i tjednima.

CT mjerenje je vrlo precizno i pruža pogled na sve dimenzije i najmanje detalje. Ova tehnologija omogućuje virtualni prikaz presjeka i analizu unutarnjih značajki bez lomljenja i rastavljanja, mjerenje volumena stjenki, njihovu udaljenost, i prikaz položaja, oblika i veličine šupljina i inkluzija. Također omogućuje zumiranje, do nekoliko tisuća puta, promatranog predmeta. [39]

7.1. Priroda x-zraka

X-zrake su oblik elektromagnetskog zračenja, kao što je i svjetlost. Njihova posebnost je vrlo kratka valna duljina koja je otprilike 10 000 puta manja od valne duljine svijetla. Upravo je ta karakteristika odgovorna za sposobnost x-zraka da mogu prodrijeti kroz materijale koji absorbiraju ili reflektiraju obično svjetlo.

X-zrake imaju sva svojstva svjetlosti, ali je vrlo teško manipulirati njihovim ponašanjem. Na primjer, svjetlost se lomi pri prolazu kroz staklo što znači da može biti usmjereno uporabom leća u uređajima poput kamere, mikroskopa, teleskopa i sličnih uređaja. X-zrake se također lome, ali jako blago pri čemu su potrebni najnapredniji uređaji kako bi detektirali tu promjenu smjera, što znači da je gotovo nemoguće reflektirati x-zraku. [40]

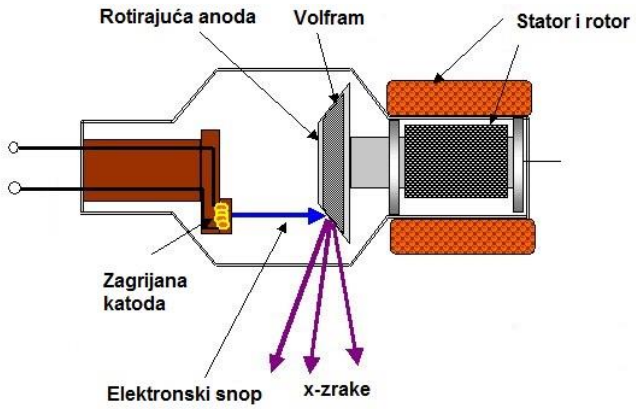


Slika 31. Elektromagnetski spektar [41]

Slika 31. prikazuje vrste elektromagnetskog zračenja i usporedbu njihovih valnih duljina sa veličinama iz ljudskog okruženja.

7.1.1. Nastanak x-zrake

Uobičajeni način dobivanja x-zrake je u rendgenskoj cijevi. To je vakuumska cijev u kojoj se sa jedne strane nalazi anoda, a s druge katoda uz koju se nalazi žarna nit. Katoda je na visokom naponu u odnosu na anodu. Kada žarnom niti teče električna struja ona se užari (volfram se užari na oko 2600 K), pa katoda izbacuje elektrone koje se ubrzavaju u električnom polju između katode i anode. Elektroni udaraju u anodu koja je načinjena od materijala koji su otporni na visoku temperaturu, poput molibdena i volframa, a ujedno se i vrti kako bi imala što bolje hlađenje. Pri tome se 99% energije elektrona pretvara u toplinu, a samo 1% odlazi u obliku ionizirajućeg zračenja koje pod pravim kutom izlazi kroz mali otvor na rendgenskoj cijevi.



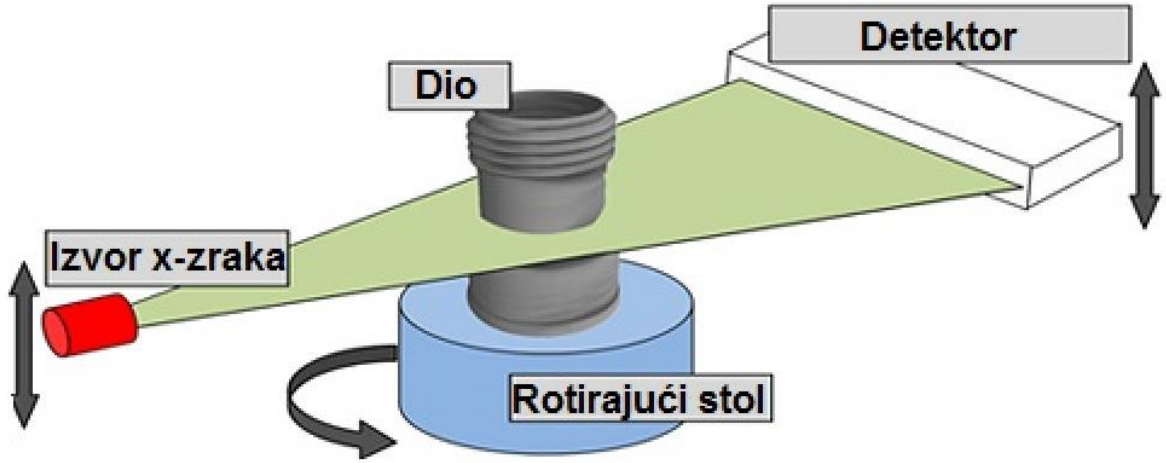
Slika 32. Nastanak x-zrake [42]

Viši napon doveden katodi rezultira većom brzinom elektrona koji pogađaju anodu čime se smanjuje valna duljina emitirane x-zrake. Što je valna duljina manja, veći je intenzitet zračenja i njegova prodornost. Veći naponi se koriste za mjerenje debljih i gušćih materijala. Snaga izvora zračenja kreće se u granicama od 100 kV do 400 kV . [43]

7.2. Vrste CT skenera

7.2.1. Translacijski skeneri

To su linijski skeneri čije zračenje ima oblik lepeze. Spadaju u prvu generaciju industrijskih CT skenera. Proizvedene x-zrake su tako namještene da čine neku liniju. Ta linija x-zraka se zatim translatira kroz dio ili sklop i podaci se uzimaju preko detektora koji se nakon toga rekonstruiraju u 3D prikaz volumena tijela. Zbog linijskog detektora ovakvi skeneri su u stanju mjeriti 2D geometriju u jednom okretaju dijela. [44]

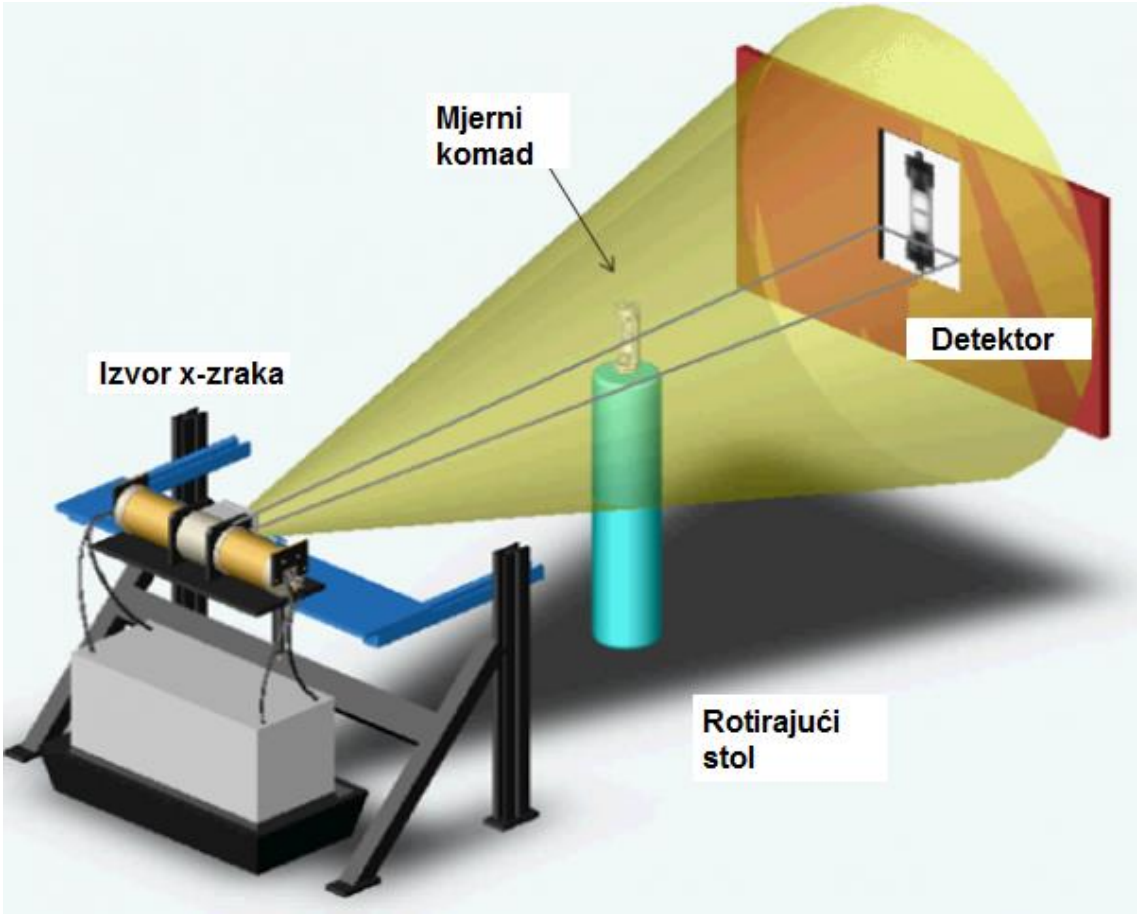


Slika 33. Translacijski skener [44]

7.2.2. Konusni skeneri

Tijekom skeniranja dio se okreće na okretnom stolu. Kako se dio rotira, x-zrake u obliku konusa stvaraju oko 1200 dvodimenzionalnih snimki koje su prikupljene od strane detektora. Te snimke se zatim obrađuju kako bi se kreirao 3D volumenski prikaz vanjske i unutarnje geometrije dijela. Zbog pločastog detektora ovakvi skeneri su u stanju mjeriti 3D geometriju u jednom okretaju dijela. [44]

Primjer konusnog skenera prikazan je na slici 34.



Slika 34. Konusni skener [45]

7.3. Princip rada

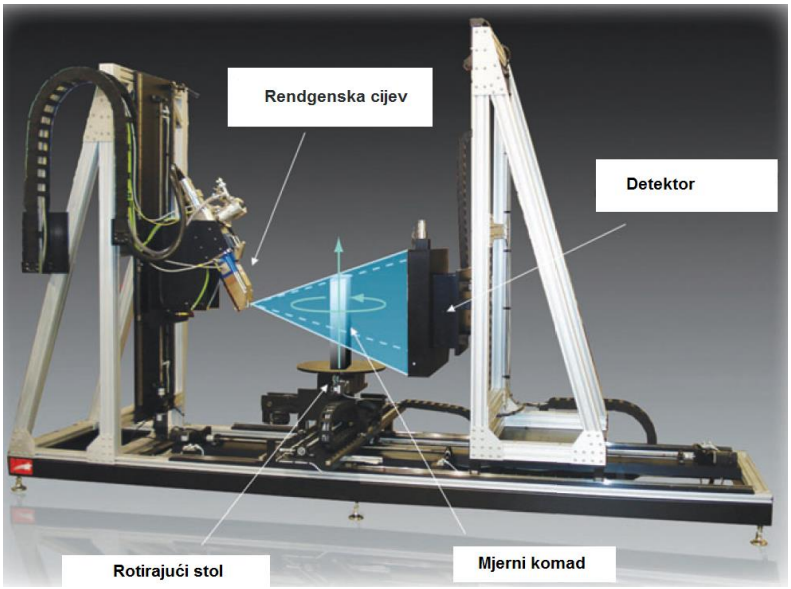
U tipičnom industrijskom postupku CT skeniranja, dio ili sklop je zatvoren unutar stroja najčešće na podlozi od ekspandirane poliesterne pjene, kako ne bi bilo fizičkog utjecaja podloge na predmet i time došlo do ikakvih deformacija..

X-zrake koje izlaze iz rendgenske cijevi prolaze kroz volumen promatranog dijela ili sklopa. Na suprotnoj strani od izvora zračenja nalazi se detektor koji mjeri količinu ionizirajućeg zračenja koje dolazi do detektora koji to zračenje pretvara u električne signale. To omogućuje određivanje slabljenja pojedinih zraka njihovim prolaskom kroz volumen dijela. Slabljenje se izražava koeficijentom apsorcije koji ovisi o gustoći i atomskom broju elementa.

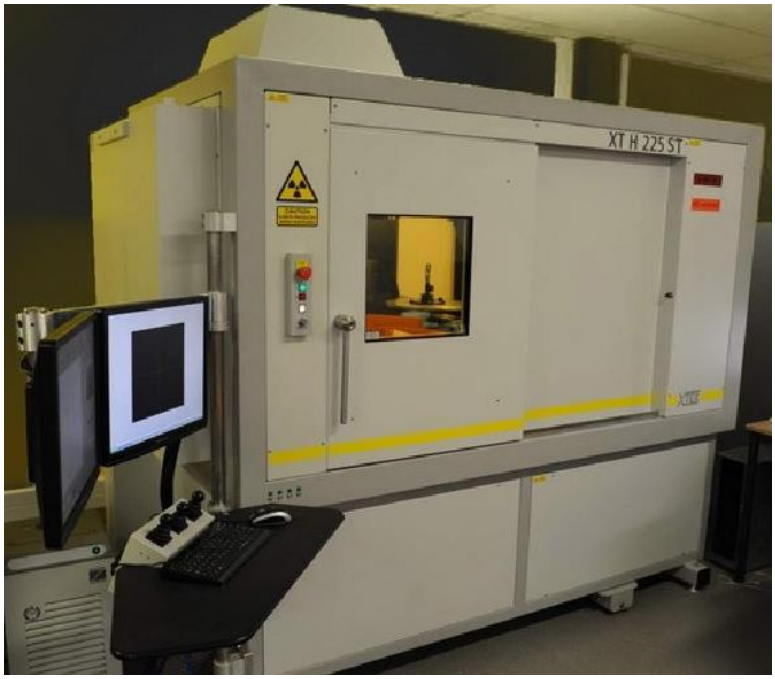
Predmet se rotira za puni krug, 360 stupnjeva, zaustavljajući se svake trećine stupnja kako bi se dobila snimka. Tijekom skeniranja, ukupno se dobije između 800 i 1200 dvodimenzionalnih snimaka. Iz niza takvih skeniranja, složenim matematičkim algoritmima se uz pomoć računala rekonstruira 3D model objekta. [46]

7.4. Izvedbe CT uređaja

Postoje otvorene i zatvorene izvedbe CT uređaja. Otvorene izvedbe se obično koriste za skeniranje većih dijelova i njihova primjena je dosta česta u zrakoplovnoj industriji. Kod otvorenih izvedbi postoji povećana opasnost za ljudsko zdravlje. Sljedeće dvije slike prikazuju moguće izvedbe CT uređaja.



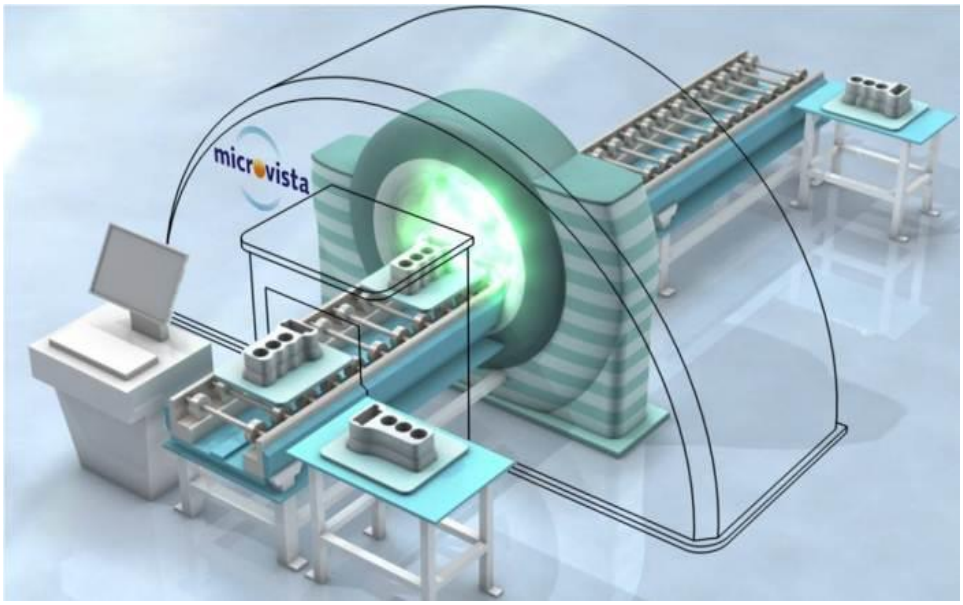
Slika 35. Otvorena izvedba [47]



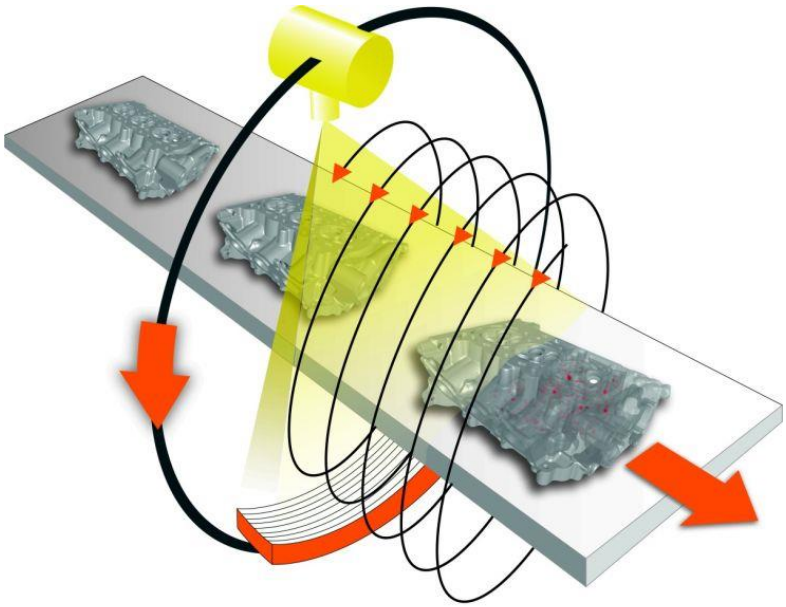
Slika 36. Zatvorena izvedba [48]

7.4.1. „On line“ izvedba

„On line“ izvedbe omogućuju brza CT skeniranja za zahtjeve velikoserijske i masovne proizvodnje. Princip rada kod ovakvih izvedbi je sličan kao i kod medicinskih CT uređaja. Dijelovi koji se nalaze na pokretnoj traci kontinuirano prolaze kroz uređaj, a rendgenska cijev i njoj na suprotnoj strani detektor se rotiraju oko pokretne trake. Sljedeće dvije slike prikazuju „On line“ izvedbu CT uređaja. [49]



Slika 37. „On line“ izvedba CT uređaja [50]

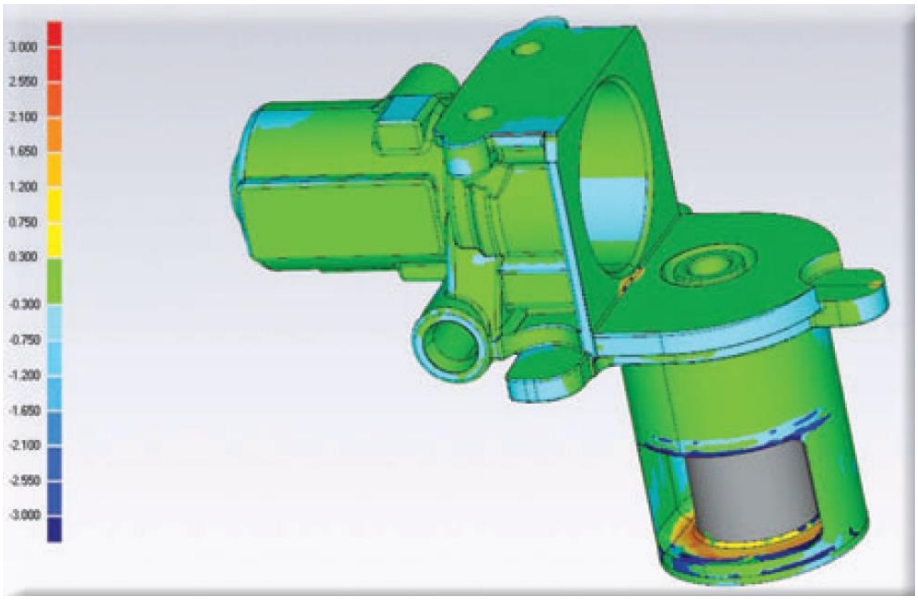


Slika 38. Prikaz rendgenske cijevi i detektora na rotirajućem postolju [49]

7.5. Primjena 3D računalne rendgenske tomografije

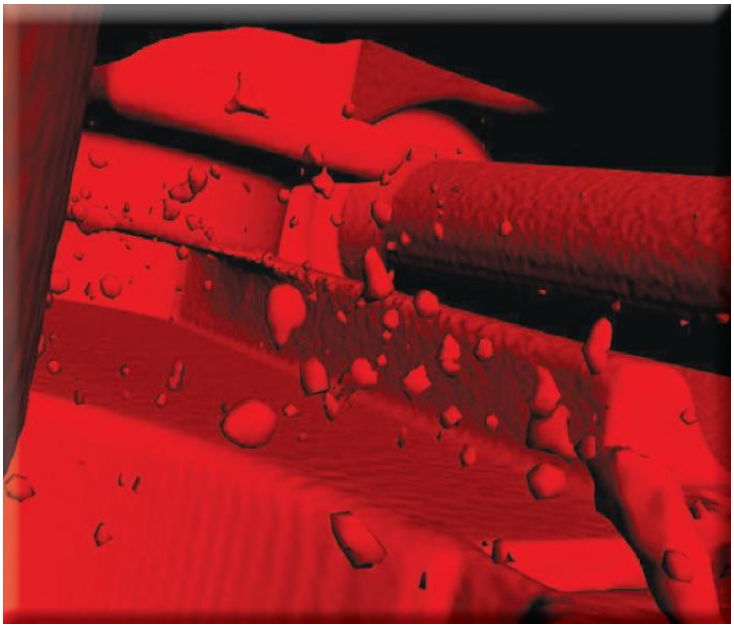
Najčešći zahtjevi za CT skeniranja su:

- Usporedba sa CAD modelom: Dimenzijska analiza
- Ispitivanje materijala: Najčešće za usporedbu dva ista proizvoda koja su izrađena različitim tehnologijama je CT skeniranje daje uvid unutarnju strukturu pa je moguće analizirati odstupanja
- Analiza sklopova: Na detalje sklopova se često ne obazire jer ih je teško promatrati. CT skeniranje omogućuje uvid šupljina, inkluzija, brtvi i podesnosti bez rastavljanja ili rezanja
- Povratno inženjerstvo



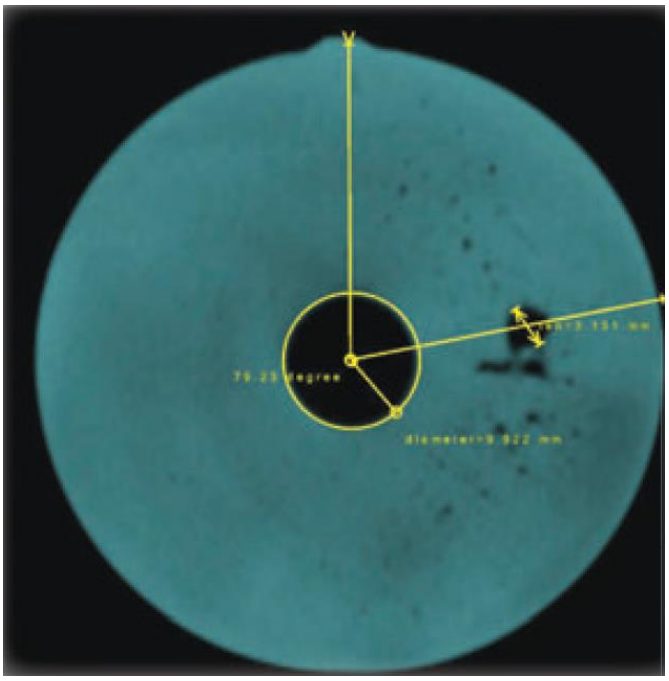
Slika 39. Dimenzijska usporedba sa 3D modelom [39]

Slika 39. prikazuje usporedbu CT rekonstruirane površine sa CAD modelom. Kako bi se ona mogla provesti, ta dva modela moraju biti poravnana. Sve dimenzijske razlike prikazane su u različitim bojama. Tolerancije u granicama od -0,300 mm do +0,300 mm su zelene boje. Žuta predstavlja područja gdje je izmjerena veća vrijednost od CAD modela, a plava manje vrijednosti.



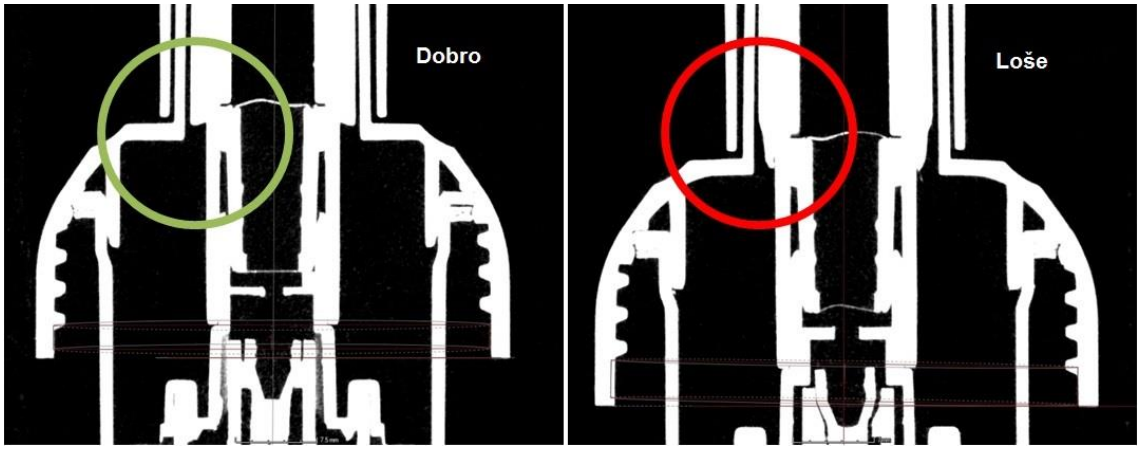
Slika 40. Ispitivanje materijala [39]

Slika 40. jasno prikazuje šupljine nastale lijevanjem unutar materijala.



Slika 41. Izrezani 3D volumen [39]

Slika 41. prikazuje mogućnost 2D mjerenja iz ravnine dobivene „presijecanjem“ volumena na željenom mjestu. To omogućava mjerenje duljine, promjera ili kuta u željenom presjeku bez uništavanja dijela rezanjem ili lomljenjem.



Slika 42. Analiza sklopa [51]

Slika 42. prikazuje dvije pumpe gdje jedna radi ispravno, a druga ne. CT skeniranje omogućuje analizu sklopa kako bi se pronašao nedostatak bez potrebe za rastavljanjem.

8. ANALIZA NAVEDIH SUSTAVA

Navedeni sustavi analizirat će s aspekata:

- mjerne nesigurnosti
- mjernog volumena
- brzine mjerenja
- rezolucije
- mogućnost on-line / off-line mjerenja

Mjerna nesigurnost je mjera sumnje u rezultat mjerenja. To je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji karakterizira rasipanje vrijednosti koja se može pripisati mjernoj veličini.

Mjerni volumen je vidno polje unutar kojeg se sa odabranim mjernim senzorom može ostvariti mjerenje.

Brzina mjerenja odnosi se na količinu točaka prikupljenu u jedinici vremena.

Rezolucija mjerenja je najmanji iznos varijable koju je moguće mjeriti.

On-line / off-line mjerenje predstavlja mogućnost mjerenja dok se dijelovi gibaju.

8.1. Utjecaji na mjernu nesigurnost

Mjerenja nisu savršena kako zbog djelovanja slučajnih utjecaja tako i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja. Mjerna nesigurnost je upravo posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja. Prilikom jednog mjerenja, okolina u kojoj se provodi mjerenje može biti vrlo značajna za rezultat mjerenja. Ako se mjerenje provodi u uvjetima promjenjive temperature, vlažnosti, pritiska i drugih faktora koji se mogu okarakterizirati kao parametri okoline, pouzdanost i ponovljivost rezultata će biti narušena, a samim time i točnost mjerenja.

Greške koje pridonose mjernoj nesigurnost mogu biti i prouzrokovane od strane operatera koji vrši mjerenje. U daljnjem tekstu bit će navedeni faktori koji utječu na rezultat mjerenja za pojedine metode.

Utjecaji na mjernu nesigurnost pri mjerenju 3D mjernim rukama:

- Točnost kutnih enkodera
- Utjecaj temperature
- Pomaci mjerne baze
- Ponovljivost mjerenja

Utjecaji na mjernu nesigurnost pri fotogrametrijskom mjerenju:

- Nesavršenost optičkog sustava kamere:
- Rezolucija detektora
- Debljina fotogrametrijske oznake
- Nejednolikost osvjetljenja
- Iskustvo operatera

Utjecaji na mjernu nesigurnost kod projekcijskih skenera:

- Nesavršenost optičkog sustava kamere
- Rezolucija detektora
- Vidljivost značajki utora
- Refleksivnost mjerene površine

Utjecaji na mjernu nesigurnost kod laserskih uređaja:

- Atmosferski uvjeti (indeks loma zraka)
- Pomaci mjerne baze

Utjecaji na mjernu nesigurnost kod računalne rendgenske tomografije:

- Homogenost materijala
- Veličina žarišne točke
- Istrošenost izvora zračenja
- Detekcija rubova

Kod metoda mjerenja koje koriste kameru za određivanje koordinata točaka kao što je slučaj kod fotogrametrijskih metoda i projekcijskih skenera, na rezultat mjerenja može utjecati nesavršenost optičkog sustava kamere. Kako bi rezultati mjerenja bi točniji, potrebno je kalibrirati kamere. Kalibracija se obavlja usporedbom slike dobivene iz kamere s poznatom scenom. Također kod takvih sustava rezolucija može utjecati na mjernu nesigurnost ako kamera ne može mjeriti toliko niske vrijednosti pa zbog zaokruživanja rezultata na veću vrijednost nastaju pogreške. Refleksivnost površine kod projekcijskih skenera može stvarati probleme ako se projicira bijelo svijetlo, no kod modernih projekcijskih sustava plavo svjetlo ima mogućnost filtriranja drugih izvora svjetla. Značajke utora stvaraju probleme kod projekcijskih sustava jer kamera i projektor nisu na istoj osi pa je u nekim slučajevima nemoguće uhvatiti bočne stjenke cilindra. Zbog toga se onda najčešće koristi neka dodatna metoda, kontaktna, za mjerenje takvih oblika. Kod fotogrametrijskih metoda iskustvo operatera ima značajnu ulogu jer potrebno je znati procijeniti iz kojih kutova fotografirati objekt zbog moguće pojave nejednolikog osvjetljenja, ali i zbog potrebnog broja snimki jer ako je točka snimljena sa više pozicija njen položaj će biti bolje definiran. Kamera sa većom rezolucijom i manji objekt snimanja daju veću točnost.

Kod 3D mjernih ruku na rezultat mjerenja najviše utječe temperatura i točnost kutnih enkodera. Ako skale na enkoderima za mjerenje kutova zakreta nisu dovoljno točne, doći će do pogrešnog očitanja mjerene vrijednosti. Kako se u svakom zglobu ruke nalazi jedna staklena pločica, više netočnih pločica će dodatno povisiti kutno odstupanje. Također kod mjernih ruku promjena temperature utječe na mjernu nesigurnost. Zbog toga mjerne ruke bi trebale biti što kraće, kako bi manje bile i mehaničke pogreške zbog promjene temperature koja izravno utječe na njihovu duljinu.

Na točnost laserskih mjerenja velik značaj imaju atmosferski uvjeti. Čak i mala promjena temperature, tlaka ili vlažnosti će utjecati na promjenu valne duljine laserske zrake, ali i lom laserske zrake prolaskom kroz atmosferu. Postolje na kojem se nalazi izvor laserskog svjetla tijekom cijelog procesa mjerenja mora biti dobro stabilno i dobro uležišteno.

Kod CT uređaja na rezultat mjerenja utječe veličina žarišne točke i rezolucija detektora. Kako se svaki detektor sastoji od sitnih elemenata, slika koja se dobiva imat će onoliko piksela ovisno o rezoluciji detektora što može stvarati probleme kod mjerenja rubova Također je bitno naglasiti da ako je snaga izvora zračenja veća, to će zrake lakše prodirati kroz materijal i apsorbirano zračenje će biti manje što će rezultirati svjetlijom slikom koju daje detektor.

8.2. Usporedba mjernih sustava

Sljedeća tablica prikazuje usporedbu navedenih sustava za mjerenje, prema određenim kriterijima.

Tablica 1. Usporedba mjernih sustava

	Višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaj	**Mjerne ruke**	**Fotogrametrija**	**Projekcijski skeneri**	**Laserski interferometar**	**Laser tracker**	**Računalna rendgenska tomografija**
Detekcija površine	Kontaktna/ Beskontaktna	Kontaktna	Beskontaktna	Beskontaktna	Beskontaktna	Kontaktna	Beskontaktna
Vođenje	Ručno/ automatizirano	Ručno	Ručno/ automatizirano	Automatizirano	Ručno	Ručno	Automatizirano
Prenosivost	Fiksni uređaj	Prenosivi uređaj	Prenosivi uređaj	Prenosivi uređaj	Prenosivi uređaj	Prenosivi uređaj	Fiksni uređaj
Kontrola	Off-line	Off-line	On-line i Off-line	Off-line i On-line	Off-line	On-line i Off-line	Off-line i On-line
Mjerni volumen	≤ 1 m^3	R= 0,5 m do R= 2 m	~30 m^3	~1 m^3	≤ 20 m	100 m x 360° x 270°	≤ 1 m^3
Brzina mjerenja	Srednja	Niska	Jedna kamera: niska; Više kamera: srednja do visoka	Jedna kamera: niska; Više kamera: srednja	Srednja	Visoka u jednoj točci (on-line mjerenje), niska pri mjerenju geometrije	Niska
Rezolucija	Ovisi o senzoru; ticalo ~ 1 μm	~50 μm do 100 μm	10 μm do 100 μm	30 μm do 100 μm	~10 nm	~20 μm	1 μm

Iz prethodne tablice vidljivo je da svaki mjerni sustav ima neka ograničenja.

S aspekta mjernog volumena laser tracker omogućuje mjerenja najvećih objekata. Zbog toga njihova primjena je najčešća u zrakoplovnoj industriji za poravnavanje krila aviona tijekom montaže i za namještanje te kontrolu velikih strojnih dijelova. Fotogrametrijske metode su također pogodne za mjerenje većih objekata. On što im omogućava takva mjerenja je prvenstveno prenosivost. Uređaji koji imaju manji mjerni volumen omogućuju točnija mjerenja. Za najtočnija mjerenja se koriste laserski interferometri zato je njihova primjena najčešće pri izradi alata za visoko precizne strojeve.

Najbrža mjerenja daju fotogrametrijske metode ako se koristi robotizirani sustav sa dvije kamere. Ručno snimanje jednom kamerom je dosta sporo jer operater mora kružiti oko objekta i iz različitih kutova slikati. Mjerenja laser trackerom također mogu biti brza ako se ne mjeri geometrija već specifične točke premještanjem retrorefleksivne mete. Najsporija su CT mjerenja koja mogu potrajati po nekoliko sati, ali jedino ona daju uvid u unutarnju strukturu materijala. Brzina višesenzornih trokoordinatnih mjernih uređaja prvenstveno ovisi o odabranom senzoru s kojim se mjeri kao što je slučaj i kod mjernih ruku koje mogu koristiti različite senzore. Ako su to kontaktni senzori mjerenje je dosta sporo. Za dobivanje 3D modela dijela zbog usporedbe sa izvornim CAD modelom najpraktičnije je korištenje projekcijskih skenera jer omogućuju prikupljanje stotina tisuća točaka u sekundi.

Što se tiče on line kontrole tu se mogu primijeniti fotogrametrijske metode, projekcijski skeneri, laser trackeri i CT skeniranje. U slučaju ispitivanja materijala mogu se primijeniti samo CT uređaji. Projekcijski skeneri i fotogrametrijske metode se koriste na proizvodnim trakama za kontrolu vanjske geometrije. Projekcijski skeneri se mogu poput CT rotirati na pokretnom postolju oko trake.

Minimalni bočni razmak između točaka ili najmanju detekciju razlike visina površinskih slojeva i rubova moguće je izmjeriti laserskim interferometrom. Nakon laserskog interferometra po pitanju rezolucije slijede CMM sa kontaktnim senzorom i CT uređaj kod kojeg točnost može varirati ovisno o raznim faktorima. Kod projekcijskih skenera rezolucija ovisi od same kamere i količini projiciranih piksela na površinu objekta.

Mjerne ruke i fotogrametrijske metode su najpraktičnije za prenošenje. Mjerne ruke su također najfleksibilnije zbog sposobnosti mjerenja iz različitih perspektiva i lakoćom mjerenja raznih konstrukcijskih oblika.

Oblik i veličina objekta te tražena točnost temelj su za odabir mjernog sustava. Prethodna tablica može poslužiti u praksi pri odabiru prikladne metode za mjerenje određenih dijelova. Kroz sljedeća dva primjera prikazat će se postupak odabira metode mjerenja. Slika 43. prikazuje glavu cilindra za koje je potrebno provesti mjerenja, pa će se na temelju tablice i objašnjenih izvedbi uređaja izabrati odgovarajuća metoda.



Slika 43. Glava cilindra [52]

Kako volumen glave cilindra nije prevelik, manji je od 1 m^3, u obzir prema mjernom volumenu pogodne su sve metode. No ipak laser tracker i laserski interferometar se ne koriste za ovakva mjerenja pa ostaju četiri alternative. Mjerne ruke se mogu koristiti, ali se neće koristiti zbog toga što je njihova karakteristika prenosivost i koriste se većinom u slučajevima gdje se mjerni komad ne može donijeti na radni stol stroja već se onda 3D mjerne ruke donose na mjesto mjerenja, a i mjerna rezolucija im nije dovoljno velika. Fotogrametrijske metode se najčešće koriste za mjerenje deformacija većih komada tako da i one otpadaju. Na kraju ostaju tri mogućnosti. To su višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaj, projekcijski skener i računalna rendgenska tomografija. Zbog složenog oblika dijela najbolji izbor su CT skeniranje i višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaj, tako da projekcijski skener otpada jer

višesenzroni uređaji također imaju mogućnost skeniranja, a sa projekcijskim skenerom kao samostalnim uređajem se ne može izmjeriti unutrašnjost cilindara i provrta. Ako se traži kompletno mjerenje uključujući unutarnju strukturu onda je jedina mogućnost korištenje CT skenera. Ako nije potrebno ispitati unutarnju strukturu materijala, najbolje rješenje uz visoku točnost je korištenje višesenzornog trokoordinatnog mjernog uređaja kod kojeg jedan senzor nadopunjuje nemogućnosti drugoga pa je moguće provesti kompletnu izmjeru i dobivanje 3D modela koji dalje poslužiti za usporedbu sa izvornim CAD modelom ili za potrebe povratnog inženjeringa. Također s aspekta brzine mjerenja produktivnost korištenja višesenzornog uređaja je veća. Međutim, ako je potrebno provesti mjerenje izravno u proizvodnji, odnosno on-line kontrolu, takav zahtjev može zadovoljiti samo CT skener.



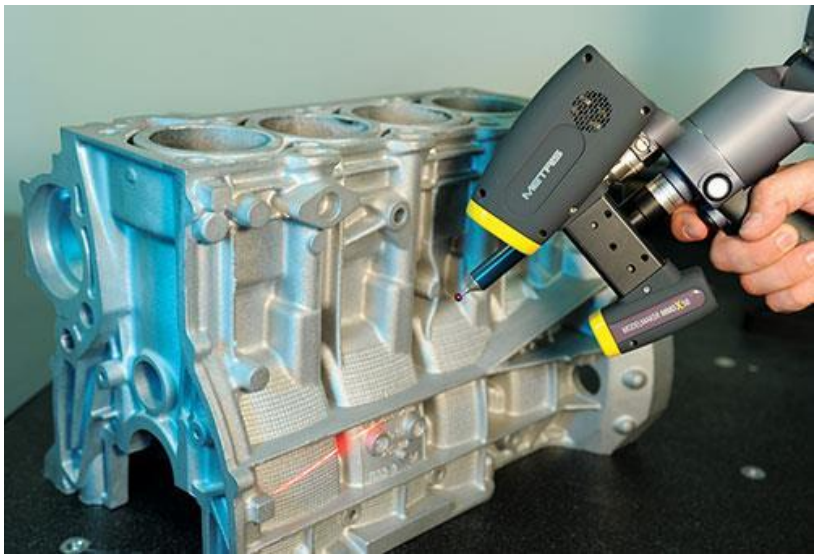
Slika 44. Turbina [53]

Slika 44. prikazuje Peltonovu turbinu. Odmah je uočljivo zbog veličine turbine da višesenzorni trokoordinatni mjerni uređaj i CT skener ne dolaze u obzir zbog malog mjernog volumena. Laserski interferometri ne koriste se za ovakva mjerenja, osim ako se ne traži iznimno precizno pozicioniranje i podešavanje. Laser trackeri također nisu pogodni zbog kompliciranih oblika jer je potrebno retrorefleksivnu metu premještati sa jednog mjesta na

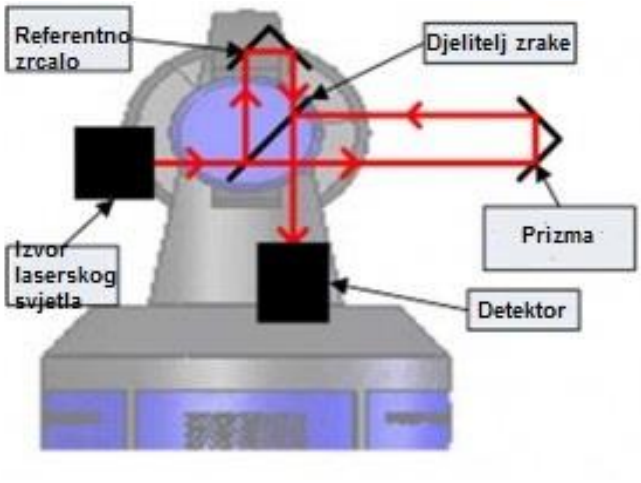
drugo. 3D mjerne se mogu koristiti u ovakvim slučajevima ako su opremljene laserskim skenerima, ali zbog toga što je kod turbina izuzetno bitna pravilnost geometrije rotora i njegova uravnoteženost zbog eliminiranja pojeve vibracija, ne bi dale dovoljnu točnost mjerenih podataka. Ostale su dvije mogućnosti. Fotogrametrijska metoda i projekcijski skener. Kako su oba uređaja prenosiva moguća je njihova kombinacija za digitalizaciju objekta. Fotogrametrijska metoda se koristi za računanje prostornog položaja referentnih točaka, a oblik turbinskih lopatica između tih točaka dobiva se projekcijskim skenerom gdje se uzorak svjetla projicira na lopatice i snima se sa kamerama. Preklapanje snimaka u zajednički koordinatni sustav provodi se korištenjem referentnih točaka izmjerenim fotogrametrijskom metodom i dobiva se 3D model koji se može koristiti za razna mjerenja.

8.3. Mogućnost sinergije više mjernih sustava

Ubrzani razvoj mjernih tehnika omogućio je takve sustave koji istovremeno koriste više mjernih metoda za mjerenja. Neke od mogućnosti sinergije sustava su već navedeni u tekstu. Kombinacija mjerne ruke opremljene laserskim skenerom prikazana na je slici 45., gdje laserski skener omogućava brzo prikupljanje milijuna točaka koji formiraju 3D model dok se ticalom mjere točke koje određuju prostorni položaj dijela, a također i za mjerenje nekih oblika koje laser ne može skenirati kao što su stjenke provrta.



Slika 45. Mjerna ruka + lasersko skeniranje [54]



Slika 46. Laser tracker + kutni enkoder [55]

Slika 43. prikazuje laser tracker koji je također je kombinacija dva sustava mjerenja veličina. Laserska interferencija služi za mjerenje udaljenosti, dok kutni enkoderi služe za mjerenje kutova.

ATOS sustav *Compact Scan* za 3D mjerenje i kontrolu je kombinacija projekcijskog skenera, fotogrametrijske kamere i kontaktnog mjerenja. Takav sustav pruža skeniranja neovisno o okolišnom osvjetljenju, visoko kvalitetne podatke mjerenja i brzu digitalizaciju objekta. Kontaktno ticalo je preko oznaka na sebi optički povezano sa fotogrametrijskim sustavom i omogućuje brza mjerenja teško dostupnih područja za optičke metode. Sljedeća slika prikazuje takav sustav.



Slika 47. Projekcija uzorka + fotogrametrija + kontaktno mjerenje [56]

Kombinacija CMM uređaja sa kontaktnim senzorom i optičkim senzorom omogućava 2D i 3D mjerenja značajki dijelova u istom koordinatnom sustavu. Senzori se mogu koristiti pojedinačno ili u međusobnoj interakciji. Optički senzor omogućuje pregled površinske teksture, rubova i drugih značajki koje su premale ili osjetljive da bi se mjerile sa kontaktnim senzorom. S druge strane, kontaktni senzor može poslužiti kod mjerenja cilindričnih utora i provrta jer svaka optička metoda mjerenja ima svoje limite. Sljedeća slike prikazuje jedan takav sustav.



Slika 48. CMM + optički senzor [57]

9. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada je opisati izvedbe i definirati područje primjene za moderne trokoordinatne mjerne sustave, analizirati navedene sustave s aspekta mjerne nesigurnosti, mjernog volumena, brzine mjerenja, rezolucije i mogućnosti on-line / off-line mjerenja te na kraju dati osvrt na mogućnosti sinergije više mjernih sustava.

Prikazani su razni primjeri njihovog korištenja za različita područja primjene. Postoje sustavi koji omogućuju prikupljanje velikog broja podataka mjerenja u kratkom vremenu i takvi sustavi su pogodni za dobivanje trodimenzionalnih modela i mjerenja složene geometrije. U slučaju mjerenja velikih objekata kao što je to najčešće primjer u brodogradnji fiksni uređaji se ne mogu primjenjivati, pa do izražaja dolaze uređaji sa karakteristikom prenosivosti. Navedeni sustavi pokrivaju gotovo sve zahtjeve mjerenja koji se pred njih mogu staviti. U slučajevima gdje je potrebno mjeriti unutarnju strukturu materijala i analizu sklopova bez njihovog lomljenja i rastavljanja u obzir dolaze samo radiografske metode.

Koji će se sustav i metoda mjerenja koristiti za specifični zadatak ovisi o karakteristikama zahtjeva uzimajući u obzir veličinu objekta, traženu rezoluciju i točnost, zahtjev na mjernu nesigurnost, vrijeme potrebno za obavljanje zadatka i naposljetku i ukupne troškove mjerenja.

LITERATURA

[1] http://www.cmm-retrofits.net/wp-content/uploads/2011/06/Renishaw-REVO-5-Axis-CMM-Probe.jpg

[2] http://www.hexagonmetrology.asia/media/datapool/images/Hexagon_Metrology/CMM-V_435x390_rdax_90.jpg

[3] http://www.qualitymag.com/articles/91767-trends-in-multi-sensor-measurement

[4] Verwys, W. : ABCs of Multisensor Measurement, Quality measurement, 2004.

[5] http://www.baumgartner-mechanik.ch/uploads/pics/dea_global.jpg

[6] http://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/multisensor-technology.html

[7] http://www.nikonmetrology.com/var/ezwebin_site/storage/images/media/images/xc65dx-acr3-rack/241798-1-eng-GB/XC65Dx-ACR3-rack.jpg

[8] http://nikonmetrology.com/var/ezwebin_site/storage/images/media/images/hn-6060-multi-sensors/230823-1-eng-GB/HN-6060-multi-sensors.jpg

[9] http://www.bridmet.co.uk/sites/bridmet.lightflows.co.uk/files/images/FARO_Quantum_01.jpg

[10] http://www.sze.hu/~szenasy/Szenzorok%20%E9s%20aktu%E1torok/FARO/04ref707-xxx--en-3d-measurement-arm-technology_whitepaper%5B1%5D.pdf

[11] http://www.fabricatingandmetalworking.com/wp-content/uploads/2014/01/image002.jpg

[12] http://www.nikonmetrology.com/var/ezwebin_site/storage/images/media/images/dual-use-of-lc60dx/240863-1-eng-GB/Dual-use-of-LC60Dx.jpg

[13] http://www.mmsonline.com/articles/photogrammetry-collects-precision-3d-data-in-unlikely-places

[14] Barreto, R. : Using DLP Development kits for Optical metrology systems, 2011.

[15] http://shapefidelity.com/wp-content/uploads/2014/05/compressor-housing.jpg

[16] http://www.topomatika.hr/Applications/gajeta.htm

[17] http://www.capture3d.com/index.php/3d-metrology-solutions/photogrammetry/atos-plus.html

[18] http://www.qualitydigest.com/may06/articles/01_article.shtml

[19] http://www.wsdot.wa.gov/Mapsdata/Photogrammetry/ImageFiles/Wall%20Deformation Lg.JPG

[20] Wolf, K.; Roller, D.; Schafer, D. : An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology, 2000.

[21] Page, D.; Koschan, A.; Voisin, S.; Ali, N.; Abidi, M.: 3D CAD model generation of mechanical parts using coded-pattern projection and laser triangulation systems, 2005.

[22] http://www.webexhibits.org/pigments/i/intro/3d/zoom/SLwork1_L.png

[23] http://www.exactmetrology.com/3d-scanning-technology/blue-light-scanning

[24] http://www.hgsitebuilder.com/files/writeable/uploads/hostgator882754/image/cai_1.jpg

[25] http://www.designworldonline.com/ethernet-powerlink-helps-scanners-go-where-none-have-gone-before/

[26] http://zebicon.com/uploads/tx_royalslider/Scanbox_4105_141-001.jpg

[27] http://en.wikipedia.org/wiki/Laser

[28] Zaimović-Uzonović, N.: Mjerna tehnika, Zenica, 2006.

[29] http://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854

[30] http://www.explainthatstuff.com/howinterferometerswork.html

[31] http://www.henschke-geraetebau.de/pics/interferenz.jpg

[32] Chapman, M.A.V.; Ferguson-Kelly, R.; Holloway, A.; Lee, W.: Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw

[33] http://www.renishaw.com/media/thumbnails/512/580a49891726440e917b0245e964f095.jpg

[34] http://www.muelaner.com/wp-content/uploads/2013/07/Angular-Interferometer.jpg

[35] https://farm5.staticflickr.com/4046/4323615858_e4a5bd7631.jpg

[36] http://www.oasisalignment.com/blog/laser-trackers-3d-precision-measurement/

[37] http://www.tctmagazine.com/downloads/1608/download/Faro%202.jpg?cb=c60671a348657907731a315cbf48bf5b

[38] http://www.apitechnical.com/wp-content/uploads/2012/09/SMR_mounted.png

[39] Noel, J.: Advantages of CT in 3D Scanning of Industrial Parts

[40] Garrett, W. R.; Splettstosser, H. R.; Titus, D. E.: Radiography in Modern Industry

[41] http://mynasadata.larc.nasa.gov/images/EM_Spectrum3-new.jpg

[42] http://photos1.blogger.com/blogger/2836/1845/1600/X-ray_Tube.jpg

[43] Cantatore, A.; Muller, P.: Indroduction to computed tomography, 2011

[44] http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_computed_tomography

[45] http://www.cnde.iastate.edu/sites/default/files/resize/xray/simct/xray%20equip%20graphic-600x482.png

[46] Christoph, R.; Joachim Neumann, H.: X-ray Tomography in Industrial Metrology, 2011.

[47] http://www.mdtmag.com/sites/mdtmag.com/files/legacyimages/MDT/Articles/2010/07/principle_1.JPG

[48] http://topmetrology.ro/produse/92-thickbox_default/nikon-xt-h-225-industrial-ct-scanning.jpg

[49] http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged%5Bsource%5D=default&tx_contagged%5Buid%5D=4727&cHash=52d8c3e73e42fa33d41bdcd1d1790443

[50] http://www.microvista.de/inline-ct/

[51] http://threedpro.server289.com/wp-content/uploads/assembly004.jpg

[52] http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/10/reconstructed-cylinder-head-3d-printing-voxeljet-porsche.jpg

[53] http://img.tjskl.org.cn/nimg/9a/28/eff4e902d15b01134cc703e3f2db-0x0-1/kaplan_turbine_kaplan_turbine_runner_kaplan_runner_hydro_kaplan_turbine.jpg

[54] http://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/resources/images/cdn/cms/MMS_0313_RT_Advances1.jpg

[55] http://www.muelaner.com/length-measurement/

[56] http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-compact-scan.html

[57] http://www.mmsonline.com/articles/multi-sensor-cmm-eases-micro-measuring

PRILOZI

I. CD-R disc