

# Utjecaj geometrije ticala na točnost rezultata mjerenja trokoordinatnog mjernog uređaja

---

**Balić, Luka**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:235:558263>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Balić Luka**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Katić Marko dipl. ing.

Student:

Balić Luka

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru izv. prof.dr.sc. Marko Katić na pomoći i korisnim savjetima pri izradi ovog rada. Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su mi pomagali i bili mi potpora kroz sve faze moga studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Balić** JMBAG: 0036473669

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj geometrije ticala na točnost rezultata mjerenja trokoordinatnog mjernog uređaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of stylus geometry on accuracy of results on coordinate measuring machine**

Opis zadatka:

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a koristi se trokoordinatni mjerni uređaj Ferranti Merlin 750 s dodirnim sustavom za akviziciju mjernih točaka, koji može prihvatiti širok raspon mjernih ticala. Iako se prije svakog mjerenja provodi umjeravanje promjera ticala, može se pretpostaviti da lokalna istrošenost mjerne površine ima utjecaj na točnost rezultata mjerenja. Stoga je u okviru ovog rada potrebno:

1. opisati princip rada trokoordinatnih mjernih uređaja s dodirnim sustavom za akviziciju mjernih točaka
2. predložiti mjerni postav kojim se može ispitati utjecaj odabranih ticala na točnost rezultata mjerenja
3. provesti mjerenja iz točke 2. i predstaviti rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Marko Katić

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	5
POPIS SLIKA .....	6
POPIS TABLICA .....	7
SAŽETAK .....	8
SUMMARY .....	9
1. UVOD .....	10
2. RAZVOJ TROKOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA .....	11
3. KONSTRUKCIJA KOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA .....	12
3.1 Mosna struktura.....	14
3.2 Pomična mostna struktura .....	14
3.3 Statična mosna struktura .....	15
3.4 Konzolna struktura .....	16
3.5 Horizontalna struktura.....	17
3.6 Portalna struktura .....	18
3.7 Mehanička struktura.....	20
3.8 Mjerni senzori .....	21
3.9 Ticala.....	24
4. NAČINI PROGRAMIRANJA I UPRAVLJANJA TROKOORDINATNIM MJERNIM UREĐAJIMA .....	25
5. POGREŠKE PRILIKOM MJERENJA KOD TROKOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA .....	28
5.1 Utjecaj geometrije ticala na točnost rezultata.....	29
5.2 Umjeravanje mjernog ticala .....	33
5.3 Etaloni .....	34
6 EKSPERIMENTALNI DIO.....	35
6.1 Postavljanje pokusa.....	35
6.2 Rezultati mjerenja .....	38
7. ZAKLJUČAK .....	46
LITERATURA .....	47
PRILOZI .....	48

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Trokoordinatni mjerni uređaj tvrtke Ferranti .....	11
<b>Slika 2.</b> Dijelovi koordinatnih mjernih uređaja .....	12
<b>Slika 3.</b> Podjela koordinatnih mjernih uređaja .....	13
<b>Slika 4.</b> Pomična i statična mostna struktura .....	14
<b>Slika 5.</b> Pomična mostna struktura .....	15
<b>Slika 6.</b> Primjer statične mostne strukture .....	16
<b>Slika 7.</b> Primjer konzolne strukture .....	17
<b>Slika 8.</b> Primjer horizontalne strukture .....	18
<b>Slika 9.</b> Mjerne sonde .....	22
<b>Slika 10.</b> Kontaktni i beskontaktni senzori .....	23
<b>Slika 11.</b> Idealno ticalo .....	29
<b>Slika 12.</b> Istrošeno ticalo .....	30
<b>Slika 13.</b> Dinamički promjer ticala .....	31
<b>Slika 14.</b> Odstupanje od sferičnosti .....	32
<b>Slika 15.</b> Kuglasti etalon .....	33
<b>Slika 16.</b> Etaloni .....	34
<b>Slika 17.</b> Dimenzije ticala .....	35
<b>Slika 18.</b> Ticala .....	36
<b>Slika 19.</b> Produžeci ticala .....	36
<b>Slika 20.</b> Orijentacija planparalelne mjerke .....	37
<b>Slika 21.</b> Povezanost dinamičkog promjera i odstupanja od sferičnosti .....	44
<b>Slika 22.</b> Maksimalne pogreške .....	44
<b>Slika 23.</b> Odstupanje od sferičnosti i standardna devijacija .....	45

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.</b> Tipovi sturktura .....	34
<b>Tablica 2.</b> Ticalo 50_10x8.....	3438
<b>Tablica 3.</b> Ticalo 50_10x6.....	38
<b>Tablica 4.</b> Ticalo 50_20x2.....	39
<b>Tablica 5.</b> Ticalo 50_20x1.....	39
<b>Tablica 6.</b> Ticalo 70_10x8.....	40
<b>Tablica 7.</b> Ticalo 70_10x6.....	40
<b>Tablica 8.</b> Ticalo 70_20x2.....	41
<b>Tablica 9.</b> Ticalo 70_20x1.....	41
<b>Tablica 10.</b> Prikaz rezultata.....	43



## **SAŽETAK**

Trokoordinatni mjerni strojevi - CMM (eng. coordinate-measuring machine) strojevi koriste se u različitim industrijama poput automobilske, zrakoplovne, medicinske, strojogradnje i mnogih drugih. Njihova primarna svrha je pružiti precizne i točne mjere koje se koriste za kontrolu kvalitete i analizu proizvoda. Ukoliko dođe do pogrešaka u mjerenju, sama kontrola proizvoda nije primjenjiva te nije moguće napraviti kvalitetnu analizu proizvoda.

Kako se mjerenja provode pomicanjem sonde duž predmetovih površina ili točkastim dodirivanjem određenih točaka, ukoliko dođe to trošenja vrha sonde ili mjerne površine doći će i do pogrešaka u samim mjerama.

U ovom radu su opisani principi rada trokoordinatnih mjernih uređaja s dodirnim sustavom za akviziciju mjernih točaka, predložen je mjerni postav kojim se može ispitati utjecaj odabranih ticala na točnost rezultata mjerenja te su prikazani prikupljeni podaci.

Ključne riječi: Trokoordinatni mjerni strojevi, geometrija glave ticala.

## **SUMMARY**

Coordinate-measuring machine (CMM) machines are used in various industries such as automotive, aerospace, medical, mechanical engineering, and many others. Their primary purpose is to provide precise and accurate measurements used for quality control and product analysis. If errors occur in the measurements, product control is not applicable, and it is not possible to perform a quality product analysis.

Measurements are carried out by moving the probe along the surfaces of the objects or by point contact with specific points. If there is wear on the probe tip or measuring surface, errors in measurements will occur.

This paper describes the principles of operation of three-coordinate measuring devices with a touch system for acquiring measurement points. A measurement setup is proposed to investigate the influence of selected styli on the accuracy of measurement results, and the collected data is presented.

Keywords: Coordinate-measuring machine , stylus tip geometry

## **1. UVOD**

Koordinatni mjerni strojevi (eng. Coordinate-measuring machine - CMM) su napredni alati koji se koriste u industriji za precizno mjerenje dimenzija, oblika i geometrije različitih predmeta. Oni omogućuju provjeru kvalitete proizvoda, ispitivanje tolerancija i osiguravanje usklađenosti s tehničkim specifikacijama.

Korištenjem CMM uređaja proizvođači mogu provjeriti usklađenost svojih proizvoda, identificirati proizvodne greške ili odstupanja te osigurati dosljednu kvalitetu tijekom proizvodnog procesa. Ovi uređaji doprinose poboljšanju performansi proizvoda, smanjenju otpada i povećanju zadovoljstva kupaca.

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, koordinatni mjerni uređaji su doživjeli značajan napredak u tehnologiji i funkcionalnostima. Moderni CMM uređaji opremljeni su visokokvalitetnim senzorima, naprednim softverom za upravljanje i analizu podataka te mogućnošću automatskog mjerenja.

Ključna prednost korištenja CMM uređaja je visoka preciznost i točnost mjerenja. Oni su u stanju detektirati i mjeriti najmanje varijacije u dimenzijama i oblicima predmeta, pružajući pouzdane rezultate. Osim toga, CMM uređaji omogućuju brzo i učinkovito mjerenje, čime se smanjuje vrijeme potrebno za inspekciju i kontrolu kvalitete.

## 2. RAZVOJ TROKOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA

Sve veće uvođenje automatizacije u postrojenja uzrokovalo je sve brži proces proizvodnje, a time je povećana potražnja za fleksibilnijim i bržim načinima provjere kvalitete izrađenih proizvoda. Proizvodnja na novim strojevima „numerički kontroliranim“ trajala je nekoliko minuta, dok se kontrola kvalitete, izvršavala ručno te je trajala i do nekoliko sati.

Dvokoordinatni mjerni uređaji izumljeni su 50-ih godina u sklopu tada jake vojne industrije. Prvi uređaj je razvila tvrtka Sheffield Corporation koji je bio YZ uređaj te je također korišten u vojnoj industriji.

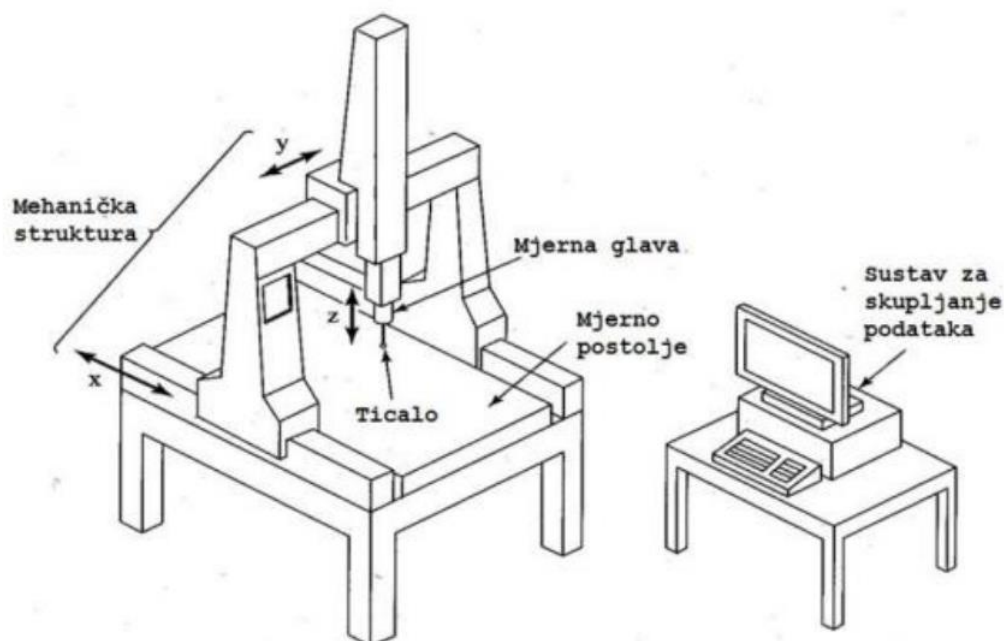
Prvi trokoordinatni mjerni uređaj (CMM) napravila je Škotska tvrtka Ferranti 1956. godine, također kako bi se vršila precizna kontrola proizvoda iz vojne industrije. Time se smatra početak trokoordinatnih mjernih uređaja koji se koriste i u današnje vrijeme.



**Slika 1.** Trokoordinatni mjerni uređaj tvrtke Ferranti [1]

### 3. KONSTRUKCIJA KOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA

Koordinatni mjerni uređaji sastavljeni su od mehaničke strukture, ticala, mjerne glave, mjernog postolja i sustava za prikupljanje podataka (Računala). Sastavni dijelovi prikazani su na slici 2.



**Slika 2.** Dijelovi koordinatnih mjernih uređaja [2]

Koordinatne mjerne uređaje možemo podijeliti na:

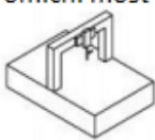
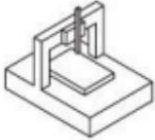
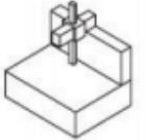
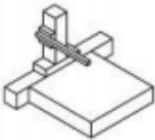
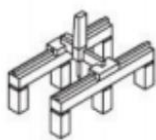
- Mosne
- Konzolne
- Horizontalne
- Strukture u obliku postolja

Mehanička struktura koordinatnih mjernih strojeva (CMM) sastoji se od osnovnih komponenti koje omogućuju precizno i točno mjerenje. Ove komponente uključuju:

- Baza: Baza je čvrsti temelj stroja koji osigurava stabilnost i krutost. Izrađena je od masivnih materijala poput lijevanog željeza ili čelika kako bi pružila potrebnu čvrstoću i minimalne vibracije.
- Stup: Stup se nalazi na bazi i vertikalno se podiže. To omogućuje pomicanje sonde ili mjernog sustava duž Z osi. Stup je također čvrst i stabilan kako bi se osigurala točnost mjerenja.

- **Most:** Most je horizontalna komponenta koja se kreće duž X osi. Na mostu je montiran nosač sonde ili mjernog sustava koji omogućuje kretanje duž Y osi. Most je obično konstruiran kako bi bio krut i osigurao stabilnost tijekom mjerenja.
- **Stol:** Stol je platforma na kojoj se postavlja radni komad koji se mjeri. Stol može biti pomičan ili fiksni, ovisno o dizajnu stroja. Pomični stol omogućuje precizno pozicioniranje radnog komada za mjerenje duž X, Y i Z osi.
- **Linearni vodilice:** Linearni vodilice su sustavi koji omogućuju glatko i precizno kretanje mosta, stupa i stola duž njihovih odgovarajućih osi. Vodilice su obično izrađene od visokokvalitetnih materijala s niskim trenjem kako bi se osigurala stabilnost i točnost kretanja.
- **Pogonski sustavi:** Pogonski sustavi koriste se za pokretanje i upravljanje kretanjem mosta, stupa i stola. Mogu uključivati električne motorne pogone, hidrauličke ili pneumatske sustave ovisno o zahtjevima i veličini stroja.

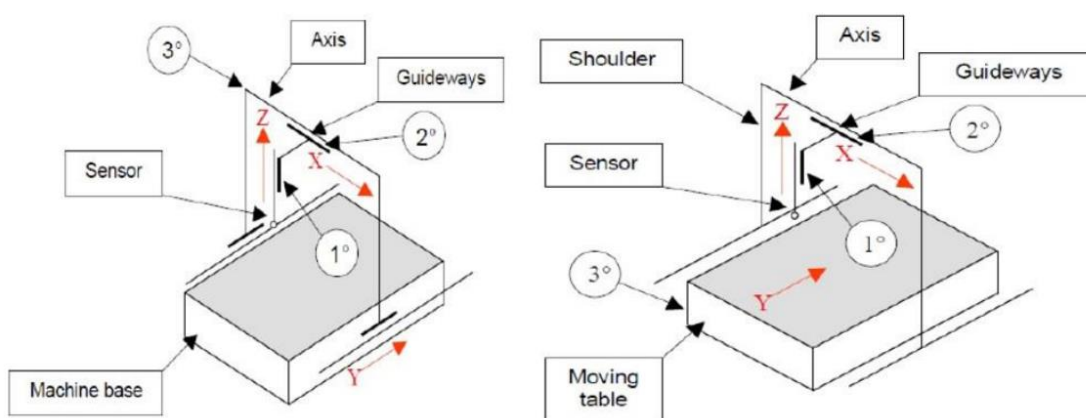
Mehanička struktura CMM strojeva je temeljni dio koji pruža stabilnost, krutost i precizno kretanje potrebno za točna mjerenja. Kvaliteta i konstrukcija ovih komponenti ključne su za postizanje visoke preciznosti i pouzdanosti u koordinatnom mjerenju.

	Pomični most	Izvedba s nosačem	Fiksni most	Horizontalna ruka	Pokretno postolje
Izvedba					
Točnost	X	X(Kalibracija ticala)			
Veliki dijelovi				X(karoserije automobila, veliki odljevci)	X(zrakoplovni dijelovi, velika vozila)

**Slika 3.** Podjela koordinatnih mjernih uređaja [3]

### 3.1 Mosna struktura

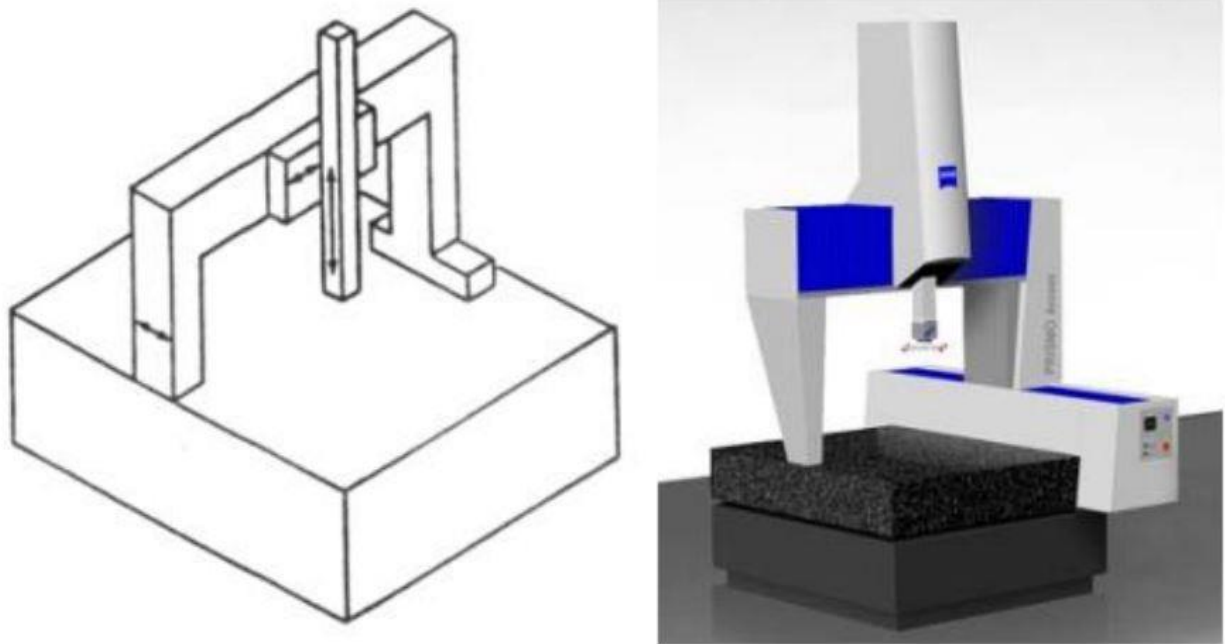
Najčešće korištena struktura. S obzirom na izvedbu gdje se ili giba mjerio postolje ili konstrukcija, može se podijeliti na statičnu i pomičnu strukturu. Pomična struktura je prikazana lijevo na slici 4. dok je statična desno. Mosna struktura pruža visoku stabilnost i čvrstoću, što je ključno za precizno mjerenje. Ova konstrukcija omogućuje da se opterećenje ravnomjerno raspodijeli na sve dijelove CMM uređaja, osiguravajući minimalnu fleksibilnost i nepotrebno savijanje tijekom mjerenja. To rezultira visokom točnošću i ponovljivošću mjerenja.



Slika 4. Pomična i statična mostna struktura [3]

### 3.2 Pomična mostna struktura

Pomična struktura je često zvana i pokretni most jer se pero (Z-os) pomiče uzduž X-osi. Problem ovakvog tehničkog rješenja je kako bi se osiguralo točnost mjerenja je potrebno da se oba bočna nosača pomiču duž X-osi potpuno skladno.



**Slika 5.** Pomična mostna struktura [3]

### 3.3 Statična mosna struktura

Ova vrsta mosne strukture karakterizira čvrsto spajanje mosta na postolje uređaja, što rezultira izuzetnom krutošću konstrukcije i eliminira probleme s nesinkroniziranim pokretima bočnih nosača. Takva struktura pruža najpreciznija mjerenja. Međutim, zbog potrebe za pomicanjem teškog radnog stola, brzina rada je nešto smanjena. Također, postoje ograničenja u težini radnog komada i potreba za dugim vodilicama kako bi se omogućilo kretanje dugog radnog stola. Značajna prednost ove strukture je centralno smješten pogon senzora, što znatno smanjuje pojavu Abbeove greške.





**Slika 6.** Primjer statične mostne strukture [4]

### 3.4 Konzolna struktura

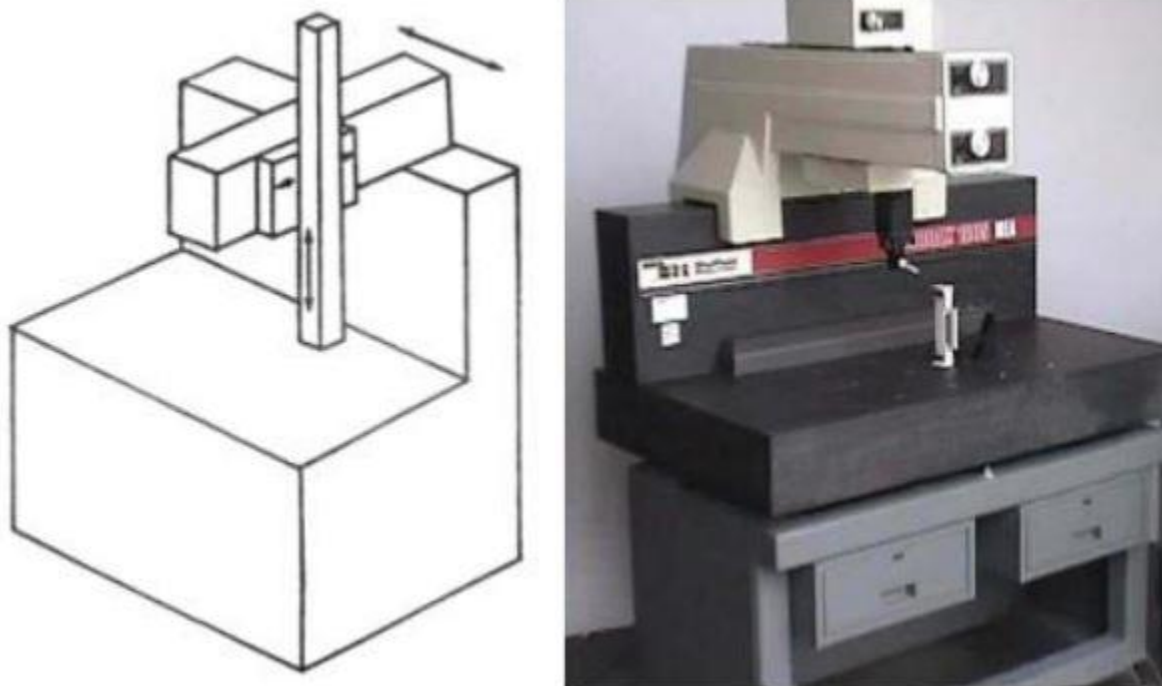
Konzolna struktura se često koristi za opća mjerenja i umjeravanje. U ovom obliku uređaja, pokretna konzola se kreće naprijed-nazad po nosaču, dok se sonda nalazi na nosaču na stupu koji se kreće gore-dolje.

Ova struktura omogućuje postavljanje relativno teških predmeta, a otvorene strane omogućuju dobar pristup radnom komadu, što rezultira brzim vremenima mjerenja.

Međutim, nedostatak konzolne strukture je savijanje konzole, što može značajno utjecati na rezultate mjerenja. Da bi se ispravile ove greške, koristi se softver za korekciju. Softver prilagođava izmjerene vrijednosti kako bi se kompenzirao utjecaj savijanja konzole i osigurala točnost mjerenja.

Važno je primijetiti da korekcija softverom može pomoći u smanjenju utjecaja savijanja konzole, ali optimalna preciznost zahtijeva redovito održavanje, umjeravanje i provjeru stanja konzolne strukture.

Konzolni uređaji su popularni zbog svoje sposobnosti rukovanja s teškim dijelovima i brzine mjerenja, ali pravilno rukovanje i održavanje su ključni za postizanje pouzdanih rezultata mjerenja.



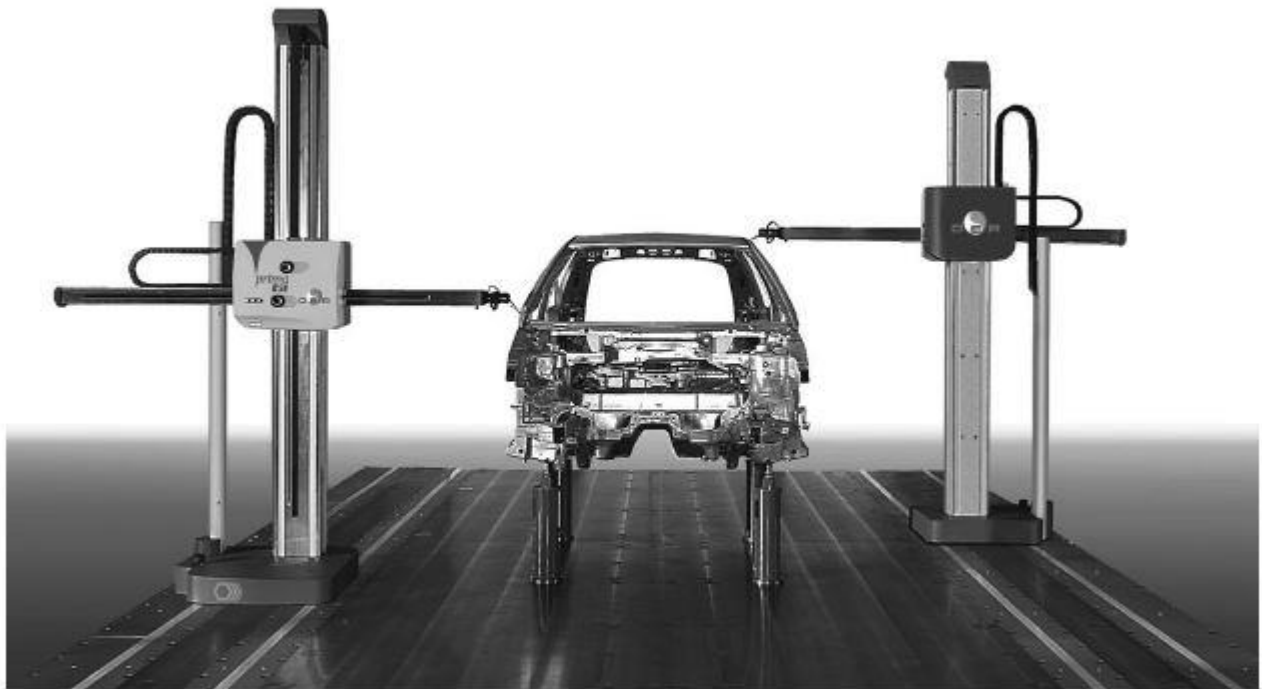
**Slika 7.** Primjer konzolne strukture [3]

### 3.5 Horizontalna struktura

Kao što proizlazi iz samog imena, horizontalna struktura je napravljena za mjerenja koja se obavljaju u horizontalnom smjeru. Postoje različite varijacije ove strukture, ovisno o pokretnom stolu, broju ruku itd. Horizontalna struktura se često koristi u auto-industriji.

Prednost svih vrsta horizontalnih strojeva s horizontalnom rukom je izvrsna dostupnost svim stranama dijela. Visoke brzine mjerenja su tipične za ovu konfiguraciju. Glavni nedostatak je ograničena točnost, što je uzrokovano dizajnom s konzolom što rezultira niskom dinamičkom krutosti i relativno velikom pogreškom Abbeovog odstupanja.

Abbeovo odstupanje, također poznato kao Abbeova pogreška ili Abbeov princip, predstavlja odstupanje u mjerenju koje može nastati kod koordinatnih mjernih uređaja (CMM). Ovo odstupanje se javlja kao razlika između stvarne izmjerene pozicije sonde i željene pozicije, zbog varijacija u poravnanju osi CMM uređaja.



**Slika 8.** Primjer horizontalne strukture [5]

### 3.6 Portalna struktura

Vrlo korisna za mjerenje velikih dijelova, čak i za objekte volumena većih od  $10 \text{ m}^3$ . Ova vrsta strukture omogućava operateru da bude blizu prostora koje ispituje. Postolje se sastoji od dva čvrsta nosača koji su masivni i pomoću kojih se sustav za pomiče duž osi X, Y i Z. Kako bi se spriječilo savijanje prilikom mjerenja horizontalna os je izrađena od lakšeg materijala u usporedbi s ostatkom mjernog uređaja. Točnost mjerenja je poprilično dobra, čak i kod dijelova velikih volumena. Međutim, ako se zahtijeva visoka točnost, troškovi se povećavaju zbog potrebe za specijalnim temeljima i pogonskim sustavima.

Kako i kod svih strojeva tako i kod CMM strojeva izbor samog stroja ovisi o predmetu kojeg mjerimo, ali i o preciznosti i fleksibilnosti samog stroja. U tablici 1. su prikazani sažeti opisi navedenih struktura.

Tip TMU	Preciznost	Fleksibilnost	Najbolje za mjerenje:
Mostna struktura	Visoka	Umjerena	Predmeti srednje veličine, traži se visoka preciznost
Konzolna struktura	Najviša	Niska	Mali predmeti koji traže veliku preciznost
Horizontalna struktura	Niska	Visoka	Veliki predmeti, zahtijeva se niska preciznost
Portalna struktura	Visoka	Umjerena	Veliki predmeti, zahtijeva se visoka preciznost

Tablica 1. Tipovi struktura [3]

### 3.7 Mehanička struktura

Osnovni strukturni dijelovi mjernog uređaja uključuju radni stol, stupove uređaja, klizače i nosač sonde. Ovi dijelovi čine kostur ili bazu mjernog uređaja, i njihove karakteristike imaju utjecaj na cjelokupni uređaj.

Kako bi se postigle idealne karakteristike strukturnih dijelova, važno je ispuniti sljedeće zahtjeve:

- Dimenzijska stabilnost: Materijal treba imati sposobnost održavanja točnih dimenzija čak i pri promjenama temperature. Granit je često odabran materijal za izradu radnog stola i drugih strukturnih dijelove zbog svoje visoke dimenzijske stabilnosti pri konstantnoj temperaturi.
- Beskonačna krutost: Krutost je važna karakteristika koja osigurava stabilnost i preciznost mjerenja. Odabir materijala i dizajn strukturnih dijelova trebaju osigurati visoku krutost kako bi se minimizirale deformacije prilikom mjerenja.
- Mala težina: Manja težina doprinosi boljim dinamičkim karakteristikama mjernog uređaja. Primjenom odgovarajućih metoda proračuna i konstrukcije, može se postići optimalan odnos krutosti i težine.
- Visok kapacitet prigušenja (amortizacija): Mjerni uređaj treba imati sposobnost prigušivanja vibracija kako bi se osigurala točnost mjerenja. Prigušivanje vibracija pomaže u smanjenju utjecaja vanjskih smetnji na rezultate mjerenja.

Važno je imati razumijevanje traženih karakteristika i njihovog utjecaja pri odabiru odgovarajućeg materijala za strukturne dijelove kako bi se postigla najbolja performansa mjernog uređaja.

### 3.8 Mjerni senzori

Mjerni senzori (sonde) su ključni dijelovi koordinatnih mjernih strojeva (CMM) i koriste se za mjerenje površina i geometrijskih karakteristika predmeta koji se ispituje. Ove sonde se pričvršćuju na nosače na CMM stroju i koriste se za bilježenje točaka na površini predmeta.

Postoje različite vrste mjernih senzora koje se koriste u CMM strojevima, uključujući:

**Ticala:** Ticala su najčešći oblik mjernih sonda i koriste se za mjerenje točaka na površini predmeta. Ona dolaze u različitim oblicima, veličinama i materijalima, uključujući kuglasta, konusna, cilindrična ticala i druge specijalizirane oblike.

**Skenirajući senzori:** Skenirajući senzori omogućuju brzo skeniranje površina predmeta kako bi se dobila kompletna trodimenzionalna slika. One se koriste za skeniranje krivulja, površina i kompleksnih geometrija, te mogu pružiti detaljnije informacije o obliku predmeta.

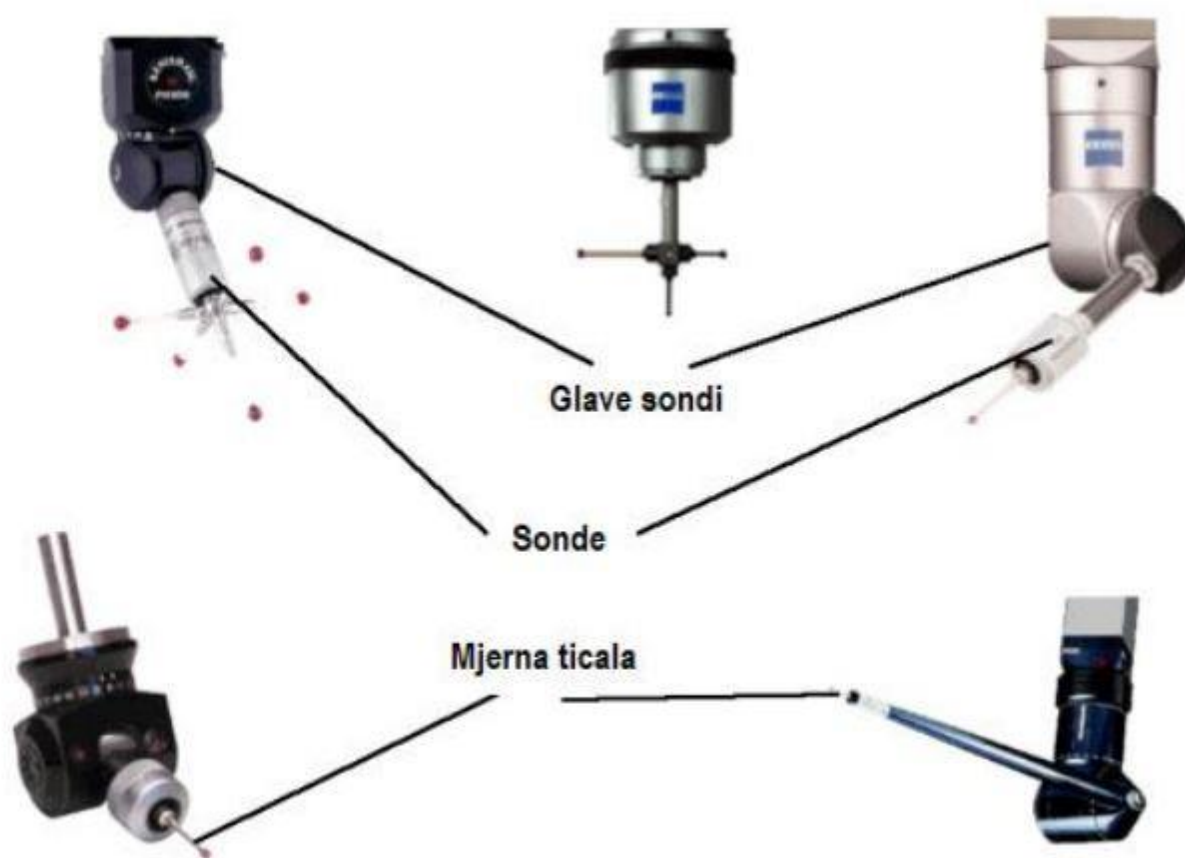
**Optički senzori:** Optički senzori koriste princip optičke detekcije kako bi bilježile točke na površini predmeta. Ove sonde su korisne za mjerenje transparentnih ili osjetljivih materijala te imaju visoku brzinu skeniranja.

**Laserski senzori:** Laserski senzori koriste laserski snop za precizno mjerenje udaljenosti i oblika površine predmeta. One su posebno korisne za mjerenje profila i kontura složenih oblika.

Mjerni senzori su važan dio CMM strojeva jer omogućavaju prikupljanje podataka o dimenzijama, obliku i geometriji predmeta koji se ispituje. Odabir odgovarajućeg senzora ovisi o zahtjevima mjerenja, materijalu predmeta i željenim rezultatima.

Mjerne sonde (prikazano na slici 9.) se sastoje od:

- glava sonde,
- sonda
- mjerno ticalo (jedno ili više njih).



**Slika 9.** Mjerne sonde

Primarna podjela sondi je na kontaktne i beskontaktno, no u novije vrijeme mogu biti i kombinirane. Kod kontaktnih metoda, ticalo se koristi za mjerenje. Prekidni način mjerenja kod kontaktnih metoda je gdje ticalo fizički dodiruje površinu mjernog komada i zatim se vraća i premješta na novu lokaciju te ponavlja isti postupak kako bi se izmjerile sve točke koje su potrebne. Drugi način je skenirajući način gdje se ticalo kontinuirano pomiče duž površine mjernog komada i prikuplja podatke dok je u fizičkom dodiru s površinom.

Beskontaktno metode ne uključuju fizički kontakt s mjernim komadom. Postoji širok raspon beskontaktnih tehnologija koje koriste kamere za dobivanje optičkih slika. Laseri koriste optiku i senzore koji snimaju odbijene laserske zrake s površine komada. Postoje i tehnologije koje se temelje na rezonanci ili spektralnoj analizi svjetlosti kako bi se odredila udaljenost između površine mjernog komada i senzora.

Višesenzorni mjerni uređaji kombiniraju kontaktnu i beskontaktnu metodu na istom uređaju. U većini slučajeva, na takvim uređajima se nalazi kontaktna sonda s ticalom, laserski senzor i video senzor, što omogućuje različite načine mjerenja ovisno o potrebama i karakteristikama predmeta koji se ispituje.



**Slika 10.** Kontaktni i beskontaktni senzori



### 3.9 Ticala

Ticalo je "vrh" koji je pričvršćen na senzor kontaktnog koordinatnog mjernog stroja koji dolazi u fizički kontakt s komponentom koja se mjeri. Signal koji se generira aktiviranjem sonde, bilo pomakom ili unosom korisnika, omogućuje izvođenje mjerenja. Vrsta i karakteristike dijelova koji se provjeravaju uglavnom će odrediti vrstu i veličinu ticala koji se koristi. Maksimalna krutost vrata i geometrijska točnost vrha ticala od vitalnog su značaja za kvalitetna mjerenja.

Performanse CMM mjerne opreme i rezultati inspekcije mogu se biti narušeni ukoliko se koristi ticalo s lošom kuglastom zaobljenošću, lošim položajem kuglice, lošim prijanjanjem navoja ili lošim dizajnom koji dopušta prekomjerno savijanje tijekom mjerenja. Većinu tih čimbenika teško je ili gotovo nemoguće uočiti golim okom. Redovita kontrola i zamjena ticala koji se koriste vrlo je važna. Iako su ovi proizvodi vrlo izdržljivi, imaju svoj vijek trajanja i trebaju se zamijeniti nakon dugotrajne uporabe ili nakon pada, udara ili nepravilnog rukovanja.

Ticala se sastoje od:

- Mjerna kugla – dio koji dolazi u dodir sa mjernim komadom. Potrebno je da je izrađena od materijala koji je otporan na trošenje. Često je izrađena od rubina.
- Odašiljač – prenosi mjerne informacije (sile) do senzora. Često se izrađuje od čelika, keramike ili plastike ojačane vlaknima, jer je potrebno da materijal posjeduje visoku krutost i malu toplinsku provodljivost.
- Opruga – kontrola mjerne sile.
- Senzori za procjenu mjernih informacija – mjeri smjer i pomak prilikom kontakta.
- Sučelje s mjernim uređajem – prenosi informacije prema upravljačkoj jedinici.

#### 4. NAČINI PROGRAMIRANJA I UPRAVLJANJA TROKOORDINATNIM MJERNIM UREĐAJIMA

Postoji nekoliko načina programiranja, koji se mogu podijeliti na:

- Off-line (neizravno) programiranje:

U ovom načinu programiranja, programiranje se izvodi izvan samog mjernog uređaja. Korisnici mogu koristiti poseban softver za programiranje CMM uređaja na računalu kako bi izradili i optimizirali programe za mjerenje. Nakon toga, programi se prenose na sam uređaj za izvođenje mjerenja.

- Online (izravno) programiranje:

Ovaj način programiranja omogućuje korisnicima da programiraju mjerenja izravno na samom CMM uređaju. Korisnici mogu koristiti touch screen sučelje uređaja kako bi unijeli i uređivali mjerni program, a zatim ga izvršili na licu mjesta.

Ovi načini programiranja pružaju fleksibilnost i mogućnost prilagodbe programiranja prema potrebama i preferencijama korisnika te svaki od njih ima svoju primjenu. Off-line programiranje omogućuje napredno planiranje i optimizaciju mjernih programa, dok online programiranje omogućuje brzo i praktično programiranje na samom uređaju.

##### **Neizravno programiranje (Off-line)**

Off-line programiranje CMM (Coordinate Measuring Machine) strojeva je proces izrade mjernih programa izvan samog stroja, koristeći poseban softver za programiranje. Sami mjerni uređaj i upravljačko računalo nisu međusobno povezan, te se kod neizravnog programiranja mjerenja se izvršavaju na simulaciji. Kod off-line programiranja, korisnici mogu unijeti geometrijske podatke, tolerancije, mjerni plan i druge parametre u softver za programiranje na računalu. Također, mogu koristiti CAD (Computer-Aided Design) modele predmeta koje žele izmjeriti kako bi precizno definirali mjernu strategiju.

Prednosti off-line programiranja su:

- Planiranje – korisnici mogu detaljno isplanirati mjerni postupak i napraviti određene optimizacije prije samog izvođenja mjerenja
- Povećana produktivnost – Off-line programiranje omogućuje korisnicima da istovremeno izrađuju programe za više CMM strojeva, što povećava produktivnost i smanjuje vrijeme potrebno za programiranje.
- Simulacije: Softver za programiranje omogućuje simulaciju mjernog programa, što omogućuje provjeru ispravnosti i identifikaciju mogućih problema prije stvarnog izvođenja mjerenja.

### **Izravno programiranje (On-line)**

U ovom tipu programiranja upravljačko računalo i mjerni uređaj su međusobno povezani. Proces izrade programa se radi izravno na mjernom predmetu bez korištenja simulacija. Koristeći interaktivno sučelje stroja, poput touch screena ili korisničke konzole, korisnici mogu izravno unijeti i uređivati mjerni program na CMM stroju, bez potrebe za korištenjem vanjskog računalnog softvera.

Prednosti izravnog programiranja su:

- Interakcija: Korisnici mogu izravno interaktivno programirati mjerenja na stroju, bez potrebe za prenošenjem programa s računala na stroj. To omogućuje brže i praktičnije programiranje.
- Prilagodbe: Tijekom programiranja, korisnici mogu provjeravati i prilagođavati mjernu strategiju i parametre na temelju stvarnih uvjeta mjerenja. To omogućuje fleksibilnost i mogućnost optimizacije programa za bolje rezultate.
- Jednostavnost: Online programiranje omogućuje intuitivno i jednostavno sučelje na samom stroju, što olakšava korisnicima izradu mjernih programa bez potrebe za dubokim poznavanjem programskog jezika ili složenog softvera.
- Reakcija na promjene: Ako se tijekom mjerenja otkriju promjene ili potreba za prilagodbama, korisnici mogu odmah izmijeniti program na stroju, bez potrebe za povratkom na računalni softver.

## **Upravljanje trokoordinatnim mjernim strojevima**

Postoje različiti načini upravljanja trokoordinatnih mjernih strojeva, no sve ih možemo svrstati u 4 kategorije:

- Ručno upravljanje - operater koristi ručne upravljačke elemente, poput ručica ili gumba, kako bi fizički upravljao kretanjem sonde i mjernog stola. Ovaj način omogućuje korisniku veću kontrolu nad pokretima i prilagodljivost tijekom mjerenja. Zapisivanje informacija i dalje operator računa ručno.
- Ručno potpomognutom računalom za obradu podataka – mjerno ticalo se također pomiče fizički, ali računalo pohranjuje i uspoređuje podatke.
- Motorno upravljanje potpomognutom računalom – pomoću upravljačkih elemenata električni motor pomiče ticalo po koordinatnim osima. Također računalo pohranjuje podatke koji služe za daljnju obradu
- Direktno upravljanje računalom – ovaj način upravljanja je jako sličan upravljanju CNC strojeva za obradu. Mjerno ticalo se pomiče pomoću računalnog programa. Predmet se samo postavi u mjerni prostor, te se pokretanjem programa mjerenja automatski izvršava

## 5. POGREŠKE PRILIKOM MJERENJA KOD TROKOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA

Glavni izvori pogrešaka u mjerenju koordinatnih mjernih uređaja klasificiraju kao:

- Hardverske greške CMM stroj-a
- Pogreške kod mjerenog radnog komada
- Ljudske greške
- Softverske greške
- Vanjski faktori

### Hardverske greške

Izvori pogrešaka u hardveru uključuju pogreške koje su povezane s komponentama CMM strojeva, poput motora, ležajeva i strukturnih elemenata, kao i parametara procesa mjerenja, poput brzine mjerenja.

### Pogreške kod mjerenog radnog komada

Pogreške kod mjernog radnog komada uključuju pogrešku oblika (geometrijske pogreške poput ravnosti, cilindričnosti, pozicijske i pogreške ekscentričnosti), pogrešku povezanu s površinskom teksturom, pogrešku pri stezanju, pogrešku poravnanja, elastičnu deformaciju i pitanja pristupačnosti.

### Ljudske greške

Greške uzrokovane ljudskim faktorom u postupku mjerenja. To uključuje korištenje neadekvatnih mjernih točaka ili nestručno rukovanje prilikom mjerenja

### Softverske greške

Greške koje proizlaze iz problema sa softverom. Ukoliko softver ima grešku u algoritmima koji prerađuju podatke ili prilikom interpretacije i prikaza.

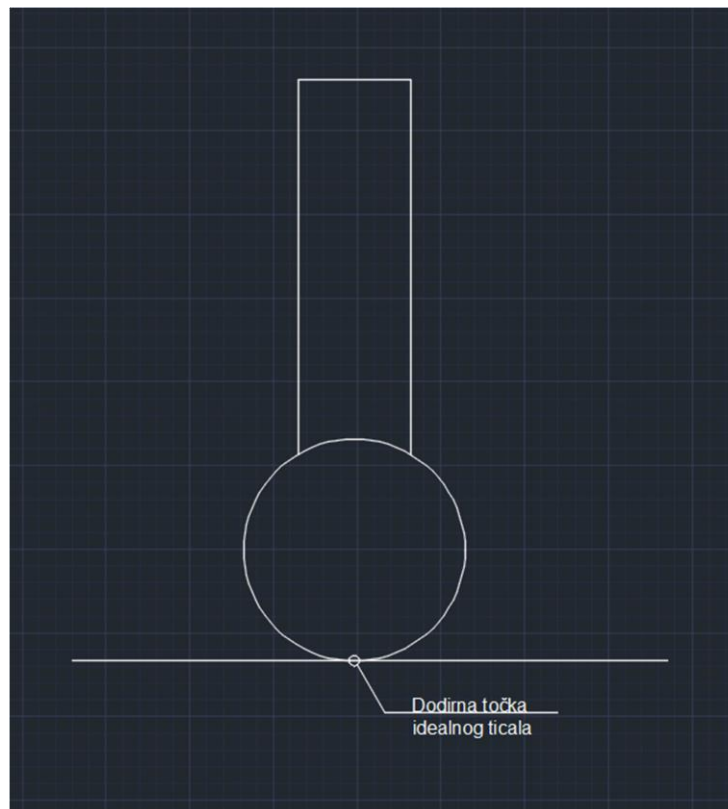
### Vanjski faktori

Vanjski faktori uključuje razne greške. To mogu biti promjene u atmosferskim uvjetima kao što su vlaga i temperatura prostorije, nečistoća zraka ili čak vibracije okolnih strojeva.

## 5.1 Utjecaj geometrije ticala na točnost rezultata

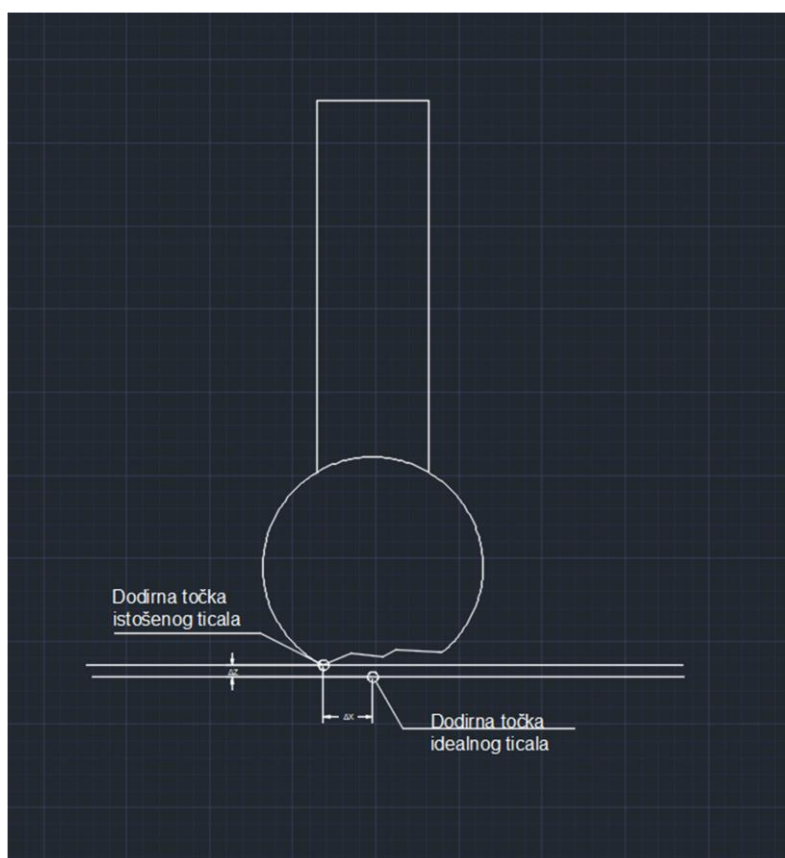
Geometrija ticala može značajno utjecati na točnost mjerenja. Na slici 11. prikazano je kako ticalo idealnog oblika dodiruje površinu u samo jednoj točki te se ta točka nalazi u središtu samog ticala. Naravno takvo ticalo u stvarno nije moguće jer će uvijek postojati odstupanja koja nastaju zbog nesavršenosti izrade ticala, trošenja ticala ali i raznih faktora kao što su promjena temperature i vlage okoliša. Kako bi se umanjile pogreške u mjerenjima koristimo sljedeće metode:

- Umjeravanje
- Redovito održavanje
- Obuka operatera
- Definiranje protokola mjerenja



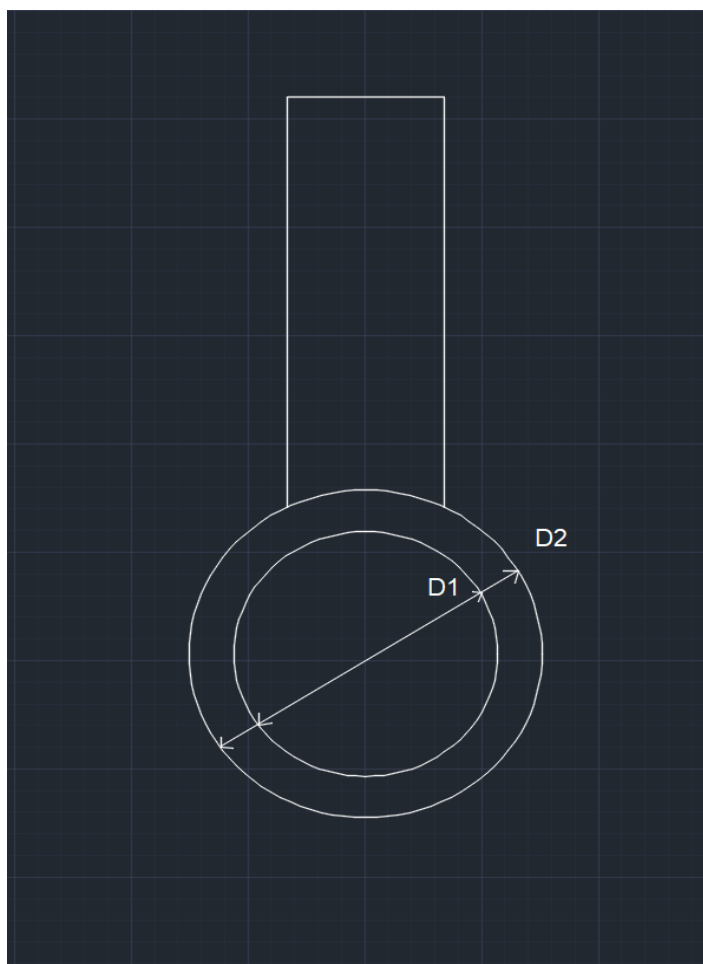
**Slika 11.** Idealno ticalo

Na slici 12. prikazano je ticalo kojemu je vrh istrošen. Ticalo također dodiruje mjerno tijelo u samo jednoj točki, ali ta točka se više ne nalazi na središtu ticala. Vidljivo je da će se ticalom takve geometrije ostvariti pogreška mjerenja i u smjeru X osi ali i u smjeru Z osi, s vrijednostima  $\Delta X$  i  $\Delta Z$ . Nadalje s obzirom da ticalo više nije sfernog oblika, ukoliko mjerna površina nije idealno ravna može doći do pomicanja dodirne točke između predmeta i ticala. Kod takvog slučaja nam umjeravanje neće potpuno pomoći za dobivanje točnog rezultata, jer prilikom takvog mjerenja nismo sigurni u kojoj točki će se ticalo i površina dodirivati.



**Slika 12.** Istrošeno ticalo

Dinamički promjer (na slici 13. prikazan sa D1) je najčešće korišten u kontekstu procjene točnosti i pouzdanosti mjerenja. To je promjer koji se izračunava u dinamičkim uvjetima kada se ticalo kreće, uzimajući u obzir sve faktore koji mogu utjecati na mjerenje, poput vibracija, ubrzanja, i brzine kretanja. Dinamički promjer dobivamo prilikom umjeravanja i on nam govori koliki se promjer stvarno koristi prilikom računanja koordinata prilikom mjerenja. On je u većini slučajeva manji on nominalnog (na slici 13. prikazan sa D2) promjera ticala (zbog trošenja ticala i zbog toga što je prilikom dodira ticala ipak potreban mali otklon kako bi se dodir registrirao). No teoretski bi mogao biti veći od nominalnog zbog utjecaja tlaka, temperature i vibracija okolnih strojeva.

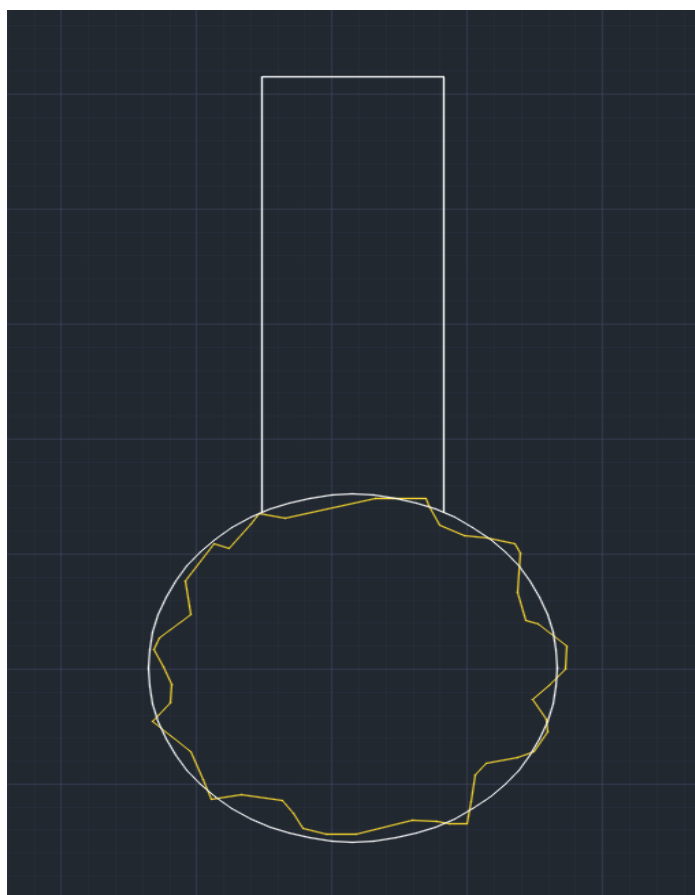


**Slika 13.** Dinamički promjer ticala



Na slici 14. žutom bojom je prikazano kako ticalo u većini slučajeva odstupa od sferičnosti. Taj podatak nam je jako bitan prilikom umjeravanja da bi znali u kakvom je stanju ticalo. Ukoliko je odstupanje jako veliko ticalo više nije za upotrebu te će nam program u većini slučajeva prilikom umjeravanja to i napomenuti.

Odstupanje od sferičnosti može biti zbog raznih faktora ali najveći faktor je istrošenost ticala zbog ponavljanja mjerenja u istim točkama.



**Slika 14.** Odstupanje od sferičnosti

## 5.2 Umjeravanje mjernog ticala

Kako bi se smanjile greške tokom mjerenja tj. povećala točnost prije mjerenja provodi se umjeravanje mjernog ticala. Umjeravanje ticala se izvodi na referentnom kuglastom etalonu te pomoću nje određujemo novi dinamički promjer glave ticala te nove koordinate centra glave u odnosu na koordinatni sustav cijelog uređaja. Vrlo je bitno da je kuglasti etalon dobro montiran te nije oštećen ili kontaminiran prašinom ili drugom prljavštinom jer će to direktno utjecati na umjeravanje.

Točni koraci umjeravanja mjernog ticala ovise od uređaja do uređaja te se opisani u uputstvu za rad strojem. Obično ih je moguće izvoditi ručno ili automatski.

Kod automatskog umjeravanja uređaj sam mjeri određen broj točaka na etalona, dok kod ručnog umjeravanja je potrebno ticalo u manualnom modu izmjeriti traženi broj točaka.



**Slika 15.** Kuglasti etalon

### 5.3 Etaloni

Kako ćemo u eksperimentalnom dijelu koristiti etalonska sferu za umjeravanje te planparalelnu graničnu mjerku, u nastavku ćemo ukratko navesti funkcije etalona.

Etalon je standard ili sustav koji se koristi za definiranje, ostvarenje, čuvanje ili obnavljanje jedinica mjere određene veličine. Postoje različite vrste etalona:

**Međunarodni etalon:** Priznat na međunarodnoj razini kao osnova za određivanje vrijednosti drugih etalona iste veličine.

**Državni etalon:** Priznat unutar određene države kao osnova za definiranje vrijednosti drugih etalona određene veličine.

**Primarni etalon:** Najviši standard u mjeriteljskoj kvaliteti za određenu veličinu, čija se vrijednost potvrđuje neovisno, bez usporedbe s drugim etalonima iste vrste.

**Sekundarni etalon:** Etalon čija se vrijednost određuje usporedbom s primarnim etalom iste veličine.

Svaka vrsta etalona ima svoju specifičnu ulogu u osiguravanju preciznosti i pouzdanosti mjerenja, bilo na globalnoj, nacionalnoj ili lokalnoj razini.



Slika 16. Etaloni [7]

## 6 EKSPERIMENTALNI DIO

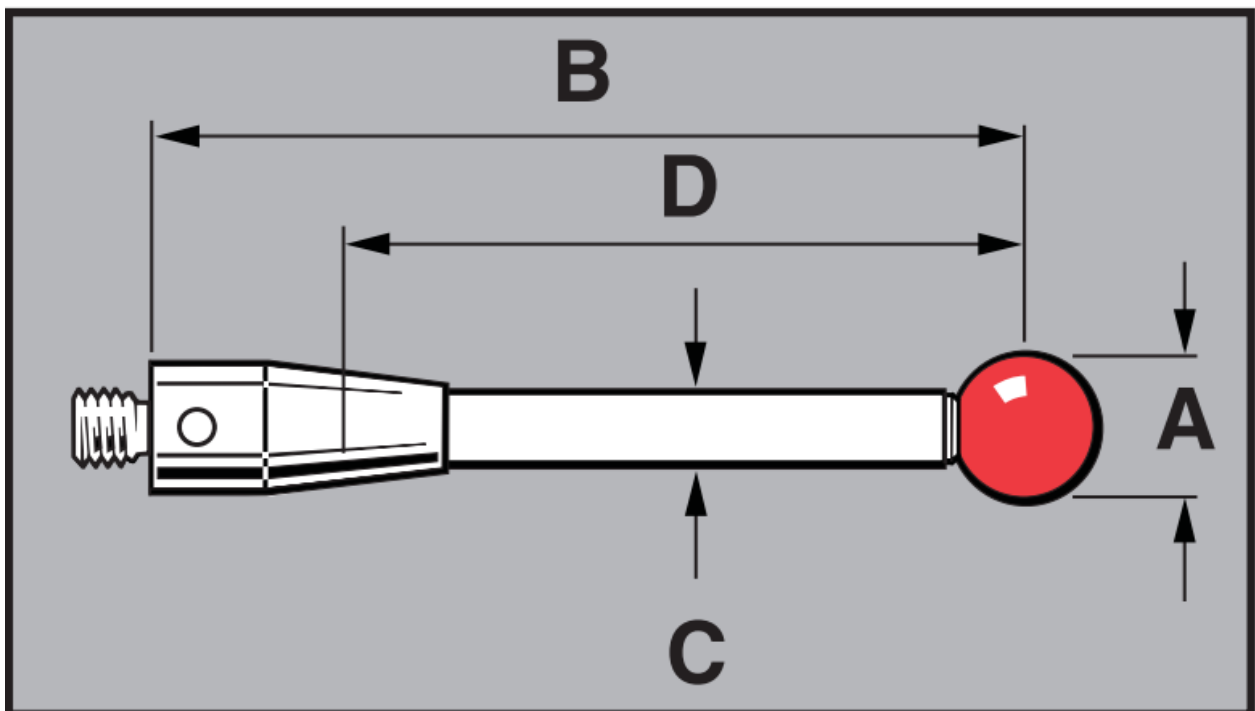
### 6.1 Postavljanje pokusa

Kako bi ispitali utjecaj istrošenosti ticala na rezultate mjerenja koristiti ćemo različita ticala koja su već bila korištena te je svako ticalo drugačije istrošeno.

S obzirom da je iz serijskog broja ticala teško zaključiti o kojem ticalu se radi kako bi na intuitivniji način od serijskog broja ticala mogli govoriti o određenom ticalu, označavati ćemo ih kao E–BxA.

Dimenzije su prikazane na slici 17.










- Slovo A nam označava promjer ticala u mm
- Sa B se označava duljina tijela ticala
- C je oznaka za promjer vrata ticala, to je suženi dio ticala koji se koristi prilikom mjerenja (nećemo je koristiti prilikom označavanja)
- D nam je duljina vrata ticala (nećemo je koristiti prilikom označavanja)
- E nam predstavlja duljinu produžetka ticala



Slika 17. Dimenzije ticala [8]





Na slici 18 i 19 su prikazan modeli ticala i produžetaka iz kataloga tvrtke Renishaw.

### Ruby ball styli (stainless steel stems)

Ball material	Part number								
Ruby	A-5000-7806	A-5000-7802	A-5000-7807	A-5000-7803	A-5000-3604	A-5000-4154	A-5000-4155	A-5000-4156	A-5000-4158
Silicon nitride	A-5004-0210	A-5004-1918	A-5003-6120	A-5004-1920	A-5003-2138	A-5003-9524	A-5004-1921	A-5004-0237	A-5004-1922
Zirconia	A-5003-7757	A-5004-0165	A-5003-7723	A-5004-2913	A-5004-2914	A-5003-7261	A-5003-2186	A-5004-2203	A-5004-2915
<b>A</b> Ball dia. mm (in.)	1.0 (0.04)	1.5 (0.06)	2.0 (0.08)	2.5 (0.10)	3.0 (0.12)	4.0 (0.16)	5.0 (0.20)	6.0 (0.24)	8.0 (0.32)
<b>B</b> Length mm (in.)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	11.0 (0.44)
<b>C</b> Stem dia. mm (in.)	0.7 (0.028)	0.7 (0.028)	1.0 (0.04)	1.0 (0.04)	1.5 (0.06)	1.5 (0.06)	2.5 (0.10)	2.5 (0.10)	2.5 (0.10)
<b>D</b> EWL* mm (in.)	4.5 (0.18)	4.5 (0.18)	6.0 (0.24)	6.5 (0.25)	7.0 (0.28)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	10.0 (0.40)	11.0 (0.44)
Mass grammes	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.7	0.9	1.5
<b>10 mm range</b>									

Slika 18. Ticala [8]

### Stylus extensions (carbon fibre)

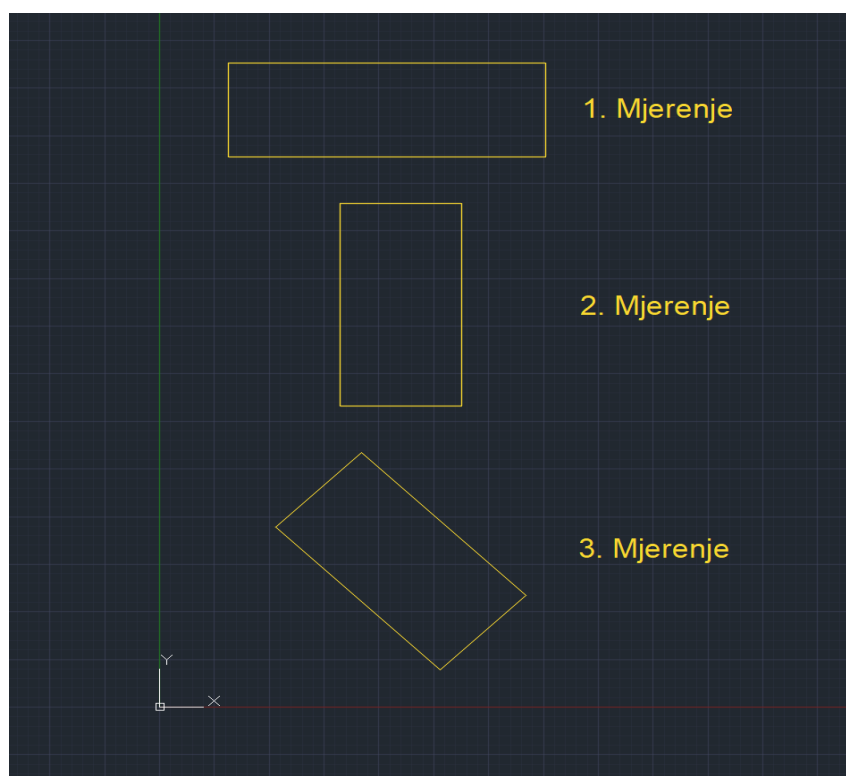
Part number	A-5003-2280	A-5003-2281	A-5003-2282	A-5003-228
Length mm (in.)	40.0 (1.58)	50.0 (1.97)	70.0 (2.76)	90.0 (3.55)
Stem dia. mm (in.)	3.0 (0.12)	3.0 (0.12)	3.0 (0.12)	3.0 (0.12)
Outer dia. mm (in.)	3.5 (0.14)	3.5 (0.14)	3.5 (0.14)	3.5 (0.14)
Mass grammes	0.9	1.0	1.3	1.5
				

Slika 19. Produžeci ticala [8]

Ticala koja ćemo koristiti prilikom mjerenja su

- 50-10x8
- 50-10x6
- 50-20x2
- 50-10x1
- 70-10x8
- 70-10x6
- 70-20x2
- 70-20x1

Sva mjerenja ćemo napraviti na planparalelnoj graničnoj mjerki od 80 mm koju ćemo postaviti prvo u smjeru X – osi , nakon toga Y – osi te na kraju pod  $45^\circ$ .



**Slika 20.** Orijehtacija planparalelne mjerke

Za svako mjerenje ćemo napraviti 10 točaka s jedne strane planparalelne mjerke i 10 točaka s druge strane kako bi dobili udaljenost između ravnina. I za svaku orijentaciju planparalelne mjerke mjerenje ćemo ponoviti 10 puta i prije svakog mjerenja ćemo izvršiti umjeravanje ticala. I to ćemo naravno ponoviti za svako ticalo.

## 6.2 Rezultati mjerenja

	Umjeravanje ticala	50_10x8	Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm	X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	7,9922	0,0037	0,000	0,000	0,000
2	7,9926	0,0038	0,000	-0,001	0,001
3	7,9947	0,0023	0,000	-0,001	0,000
4	7,9923	0,0054	0,000	0,000	0,000
5	7,9904	0,0047	0,002	0,000	0,000
6	7,9901	0,0044	0,000	-0,001	0,001
7	7,9903	0,0031	0,001	-0,002	0,000
8	7,9904	0,0037	0,000	0,000	0,000
9	7,9925	0,0031	0,000	-0,001	0,001
10	7,9935	0,0034	0,000	-0,001	0,001

Tablica 2 Ticalo 50\_10x8

	Umjeravanje ticala	50_10x6	Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm	X os,	Y os, mm	45 deg, mm
1	5,9892	0,0039	0,002	0,003	0,003
2	5,9885	0,0037	0,000	0,003	0,001
3	5,9895	0,0043	0,001	0,004	0,002
4	5,9893	0,0042	0,000	0,003	0,003
5	5,9884	0,0042	0,001	0,004	0,003
6	5,9895	0,0045	0,000	0,005	0,003
7	5,9891	0,0047	0,001	0,003	0,004
8	5,9897	0,0038	0,001	0,004	0,003
9	5,9881	0,0047	0,000	0,003	0,002
10	5,9885	0,0046	0,002	0,002	0,002

Tablica 3 Ticalo 50\_10x6

	Umjeravanje ticala	50_20x2		Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm		X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	1,9836	0,0059		0,003	0,001	0,000
2	1,9856	0,0049		0,001	0,001	0,000
3	1,9866	0,0058		0,000	-0,001	-0,002
4	1,9869	0,0049		0,000	0,000	-0,001
5	1,9859	0,0052		0,001	0,000	-0,002
6	1,9856	0,0048		0,002	0,000	-0,002
7	1,9854	0,0056		0,001	-0,001	-0,002
8	1,9856	0,0050		0,000	-0,002	-0,003
9	1,9864	0,0054		0,002	-0,001	-0,002
10	1,9854	0,0056		0,000	0,000	-0,002

Tablica 4 Ticalo 50\_20x2

	Umjeravanje ticala	50_20x1		Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm		X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	0,9624	0,0098		0,003	0,003	0,004
2	0,9640	0,0088		0,002	0,004	0,004
3	0,9641	0,0121		0,000	0,002	0,005
4	0,9646	0,0089		0,002	0,004	0,003
5	0,9630	0,0095		0,001	0,003	0,003
6	0,9639	0,0087		0,000	0,002	0,003
7	0,9643	0,0097		0,002	0,003	0,003
8	0,9652	0,0110		0,000	0,003	0,003
9	0,9653	0,0092		0,000	0,001	0,004
10	0,9654	0,0102		0,000	0,002	0,003

Tablica 5 Ticalo 50\_20x1



	Umjeravanje ticala	70_10x8		Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm		X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	7,9771	0,0126		0,002	0,002	0,002
2	7,9763	0,0093		0,001	0,000	-0,001
3	7,9758	0,0133		0,001	0,001	0,000
4	7,9814	0,0103		0,001	0,000	0,000
5	7,9805	0,0091		0,002	0,000	0,002
6	7,9802	0,0101		0,002	0,000	0,001
7	7,9784	0,0065		0,000	0,002	0,000
8	7,9789	0,0077		0,000	0,003	0,002
9	7,9801	0,0082		0,002	0,001	0,002
10	7,9808	0,0092		0,001	0,000	0,000

Tablica 6 Ticalo 70\_10x8

	Umjeravanje ticala	70_10x6		Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm		X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	5,9767	0,0087		0,000	0,001	-0,001
2	5,9778	0,0066		0,000	0,001	0,002
3	5,9784	0,0080		0,000	0,004	0,000
4	5,9779	0,0075		0,000	0,002	0,001
5	5,9772	0,0068		-0,001	0,001	-0,002
6	5,9763	0,0098		-0,001	0,002	-0,001
7	5,9775	0,0072		-0,001	0,004	-0,001
8	5,9769	0,0084		-0,001	0,004	0,000
9	5,9772	0,0074		0,000	0,003	0,001
10	5,9768	0,0091		0,001	0,000	-0,001

Tablica 7 Ticalo 70\_10x6

	Umjeravanje ticala	70_20x2		Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm		X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	1,9642	0,0150		-0,002	-0,001	0,000
2	1,9657	0,0118		-0,003	0,000	-0,001
3	1,9652	0,0140		-0,004	-0,001	-0,002
4	1,9659	0,0132		-0,002	-0,001	-0,002
5	1,9648	0,0122		-0,002	-0,002	0,000
6	1,9635	0,0153		-0,001	0,000	-0,002
7	1,9637	0,0152		-0,003	0,000	0,000
8	1,9630	0,0143		-0,005	-0,001	-0,002
9	1,9494	0,0228		-0,002	0,000	0,000
10	1,9482	0,0185		-0,001	-0,002	0,000

Tablica 8 Ticalo 70\_20x2

	Umjeravanje ticala	70_20x1		Planparalelna granična mjerka 80 mm		
	Din. Promjer, mm	Odstupanje od sferičnosti, mm		X os, mm	Y os, mm	45 deg, mm
1	0,9532	0,0184		-0,003	0,000	-0,002
2	0,9554	0,0165		-0,003	0,000	-0,001
3	0,9523	0,0159		-0,002	-0,001	0,000
4	0,9527	0,0162		-0,005	-0,001	-0,002
5	0,9492	0,0179		-0,002	-0,002	0,000
6	0,9510	0,0169		-0,001	0,000	-0,001
7	0,9502	0,0172		-0,003	0,000	0,000
8	0,9465	0,0195		-0,006	-0,001	-0,003
9	0,9480	0,0192		-0,004	-0,002	0,000
10	0,9490	0,0187		-0,002	0,000	-0,002

Tablica 9 Ticalo 70\_20x1

Kako smo za svaku orijentaciju radili 10 umjeravanja, kako bi imali referentnu vrijednost dinamičkog promjera računamo aritmetičku sredinu:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

Također isto računamo i aritmetičku sredinu odstupanja od sferičnosti S

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$$

Nakon toga računamo aritmetičku sredinu rezultata mjerenja orijentacije u X osi, Y osi i pod 45°

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Kako bi smo pronašli najveće odstupanje koristimo formulu za maksimalnu apsolutnu vrijednost u koju umjesto aritmetičke sredine stavljamo poznatu vrijednost dužine planparalelne mjerke (80). No kako smo umjesto apsolutnih vrijednosti prilikom zapisivanja rezultata koristili odstupanja uvrstiti ćemo 0 kao početnu točku.

$$Z = 0 \pm \Delta x$$

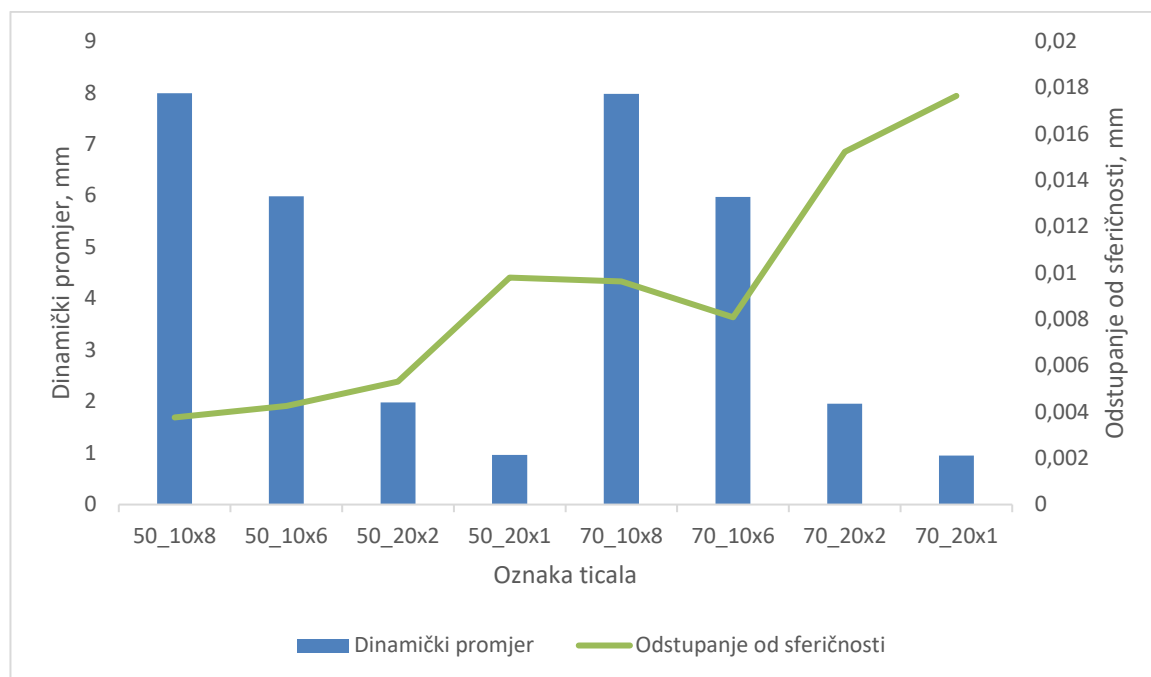
I kako bi mogli promatrati raspršenost mjerenja što nam je vrlo bitno za točnost računamo standardnu devijaciju prema formuli

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

	50_10x8	50_10x6	50_20x2	50_20x1	70_10x8	70_10x6	70_20x2	70_20x1
$\bar{D}$ , mm	7,9919	5,98898	1,9857	0,964222	7,97895	5,97727	1,96136	0,95075
$\bar{S}$ , mm	0,00376	0,00426	0,00531	0,00979	0,00963	0,008078	0,01523	0,01764
$X_X$ , mm	0,0003	0,0008	0,001	0,001	0,0012	-0,0003	-0,0025	-0,0031
$X_Y$ , mm	-0,0007	0,0034	-0,0003	0,0027	0,0009	0,0022	-0,0008	-0,0007
$X_{45}$ , mm	0,0004	0,0026	-0,0016	0,0035	0,0008	-0,0002	-0,001	-0,0011
$Z_X$ , mm	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001	0,005	0,006
$Z_Y$ , mm	0,002	0,005	0,002	0,004	0,003	0,004	0,002	0,002
$Z_{45}$ , mm	0,001	0,004	0,003	0,005	0,002	0,002	0,002	0,003
$\sigma_x$ , mm	0,00067	0,00078	0,00105	0,00115	0,00078	0,00067	0,00126	0,00152
$\sigma_y$ , mm	0,00067	0,00084	0,00094	0,00094	0,00110	0,00147	0,00078	0,00078
$\sigma_{45}$ , mm	0,00051	0,00084	0,00096	0,00070	0,00113	0,00122	0,001	0,00110

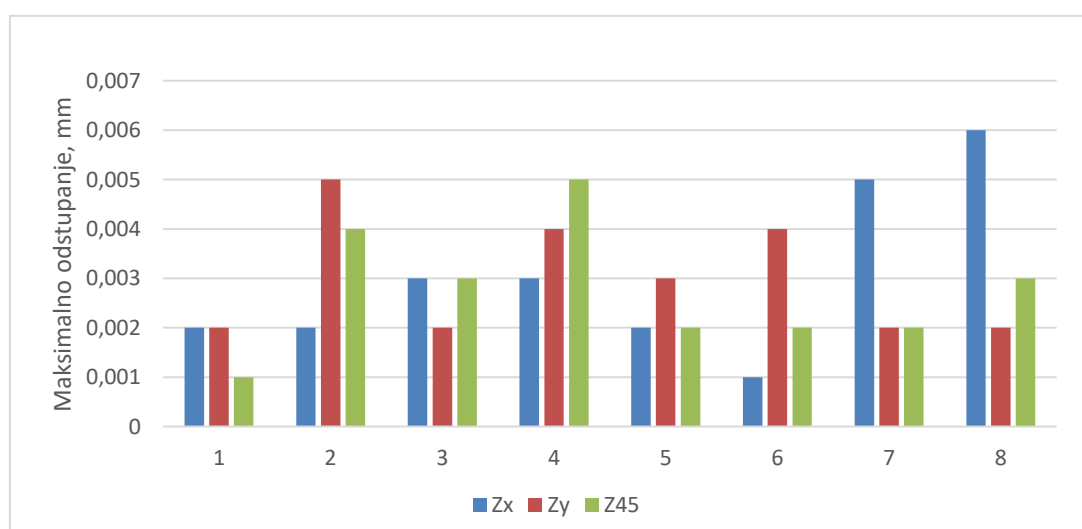
Tablica 10 Prikaz rezultata

Na slici 21. su grafički prikazani rezultati mjerenja dinamičkog promjera i odstupanja od sferičnosti. Vidljivo je da su dinamički promjer i odstupanje od sferičnosti obrnuto proporcionalno povezani. Ukoliko jedan raste drugi pada i obrnuto. To ima i smisla jer ukoliko nam se dinamički promjer smanjuje zbog trošenja ticala, povećavati će nam se odstupanje od sferičnosti. U idealnim uvjetima odstupanje od sferičnosti se ne bi mijenjalo ukoliko bi se ticalo potpuno jednako trošilo sa svih strana, ali to u praksi nije moguće.



**Slika 21.** Povezanost dinamičkog promjera i odstupanja od sferičnosti

Također vidljivo je da su maksimalna odstupanja za ticala različita za određene smjerove mjerenja. Kod nekih ticala je maksimalno odstupanje kod mjerenja u X osi, kod nekih kod mjerenja u Y osi, a kod nekih pod  $45^\circ$ . Takav rezultat mjerenja je posljedica različite istrošenosti ticala u različitim smjerovima, ali također može biti i posljedica raznih drugih faktora. S obzirom da se nije radilo u idealnim uvjetima, razlika u temperaturi, vlazi ali i vibracije okolnih strojeva mogle su pridonijeti odstupanju rezultata.



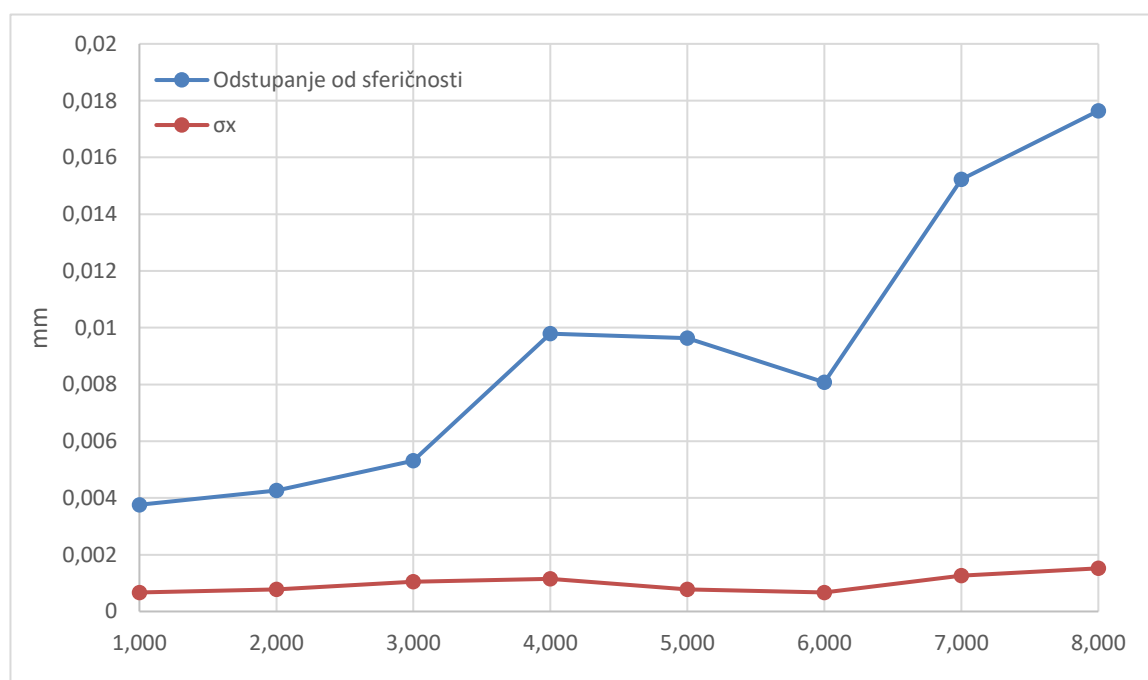
**Slika 22.** Maksimalne pogreške

U sljedećem koraku ćemo vidjeti utjecaj odstupanja od sferičnosti na standardnu devijaciju.

Na slici 23. je grafički prikazano odstupanje od sferičnosti i standardna devijacija za mjerenja izvedena u X osi.

Odmah je vidljivo da grafikon standardne devijacije prati rast i pad grafikona odstupanja od sferičnosti, što ukazuje na njihovu proporcionalnu povezanost. Kako odstupanje od sferičnosti raste tako i standardna devijacija raste.

To nam ukazuje da ukoliko je veće odstupanje od sferičnosti veće je i rasipanje rezultata te mjerenja postaju manje točna. Naravno umjeravanje kod kojega koristi što više točaka smanjujemo to odstupanje ali ga nikada ne možemo anulirati.



Slika 23. Odstupanje od sferičnosti i standardna devijacija

## 7. ZAKLJUČAK

Prije svega bitno je napomenuti da se rezultati mjerenja kod kojih je odrađeno nalaze u granicama točnosti stroja. Za FERRANTI Merlin 750 koji se koristio za mjerenja u ovom radu proširena mjerna nesigurnost iznosi  $U=4 \mu\text{m}$  te su sve srednje vrijednosti mjerenja unutar tih granica.

Iz rezultata je vidljivo da su dinamički promjer i odstupanja od sferičnosti povezani, tj da se trošenjem ticala smanjuje dinamički promjer a povećava odstupanje od sferičnosti.

Također je vidljivo da odstupanje od sferičnosti negativno utječe na točnost mjerenja time što dobivamo veće rasipanje rezultata.

Mjerenja nisu odrađena u strogo kontroliranim uvjetima te su vanjski utjecaji pridonijeli pogreškama tokom mjerenja.

Kako bi mogli što više anulirati takve pogreške i fokusirati na greške nastale zbog geometrije ticala trebalo bi stvoriti atmosferu sa što manje vanjskih promjena tokom mjerenja. To bi mogli postići u laboratorijskoj čistoj sobi koja ima predviđenu potrebnu filtraciju zraka te regulaciju vlage i temperature.

## LITERATURA

- [1] <https://www.wenzelamerica.com/renishaw-an-eyewitness-account-of-a-metrology-game-changer/> (pristupljeno 20.06.2024)
- [2] A. Kunšt: Off-line programiranje mjernog robota, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [3] N. Zaimović-Uzunović, S. Lemeš, D. Denjo, A. Softić: Proizvodna mjerenja, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 2009.
- [4] M. Roš: Mjerenje dimenzija gotovog proizvoda pomoću trokoordinatnog mjernog uređaja, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2018.
- [5] <https://www.machinetools.com/en/models/type/coordinate-measuring-machines> (pristupljeno 22.06.2023)
- [6] <https://www.verisurf.com/blog/article/portable-cmm-arm-accessories/> (pristupljeno 22.06.2024)
- [7] <https://dzm.gov.hr/temeljno-mjeriteljstvo/180> (pristupljeno 22.06.2024)
- [8] <https://www.renishaw.com/en/renishaw-enhancing-efficiency-in-manufacturing-and-healthcare--1030> (pristupljeno 23.06.2024)
- [11] F. Bednjanec: Procjena kvalitete mjernog sustava, Završni rad, FSB, Zagreb, 2014.
- [12] M. Jakšić: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [13] D. Ivšac: Usporedba 3D mjernih postupaka u kontroli kvalitete, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2014
- [14] S. N. Spitz, "Dimensional Inspection Planning for Coordinate Measuring Machines", PhD thesis, University of Southern California, Department of Computer Science, 1999.



## **PRILOZI**

- I. CD-R disk
- II. Programski kod

## Prilog 2- Programski kod

---

```
DMISMN/'Start Template',05.2
FILNAM/'Start Template',05.2
DV(0)=DMESWV/'16,1,0,184'
UNITS/MM,ANGDEC
DECPL/ALL,DEFAULT
V(0)=VFORM/ALL,PLOT
DISPLY/TERM,V(0),STOR,DMIS,V(0)
SNSET/APPRCH,5
SNSET/CLRSRF,15
SNSET/DEPTH,0
D(0)=DATSET/MCS
MODE/MAN
T(CORTOL_X1)=TOL/CORTOL,XAXIS,-0.1,0.1
T(CORTOL_Y1)=TOL/CORTOL,YAXIS,-0.1,0.1
T(CORTOL_Z1)=TOL/CORTOL,ZAXIS,-0.1,0.1
T(DIAM_1)=TOL/DIAM,-0.1,0.1
$$ Sensor definition added by template
RECALL/SA(50_10x8.1.11.8.A0.0-B0.0)
SNSLCT/SA(50_10x8.1.11.8.A0.0-B0.0)
$$<MEAS_PLANE name = "PLN001">
MODE/MAN
F(PLN001)=FEAT/PLANE,CART,509.939,-31.909,3.187,0.007,-1,0
MEAS/PLANE,F(PLN001),10
PTMEAS/CART,495.306,-32.005,6.22,0.007,-1,0
PTMEAS/CART,502.8,-31.956,6.218,0.007,-1,0
```

---

PTMEAS/CART,508.521,-31.918,6.211,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,514.385,-31.879,6.204,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,524.467,-31.813,6.191,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,524.455,-31.814,0.696,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,513.921,-31.884,0.686,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,508.325,-31.921,0.678,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,502.66,-31.958,0.669,0.007,-1,0  
PTMEAS/CART,496.944,-31.996,0.663,0.007,-1,0  
ENDMES  
\$\$<\MEAS\_PLANE = PLN001>  
\$\$<MEAS\_PLANE name = "PLN002">  
MODE/MAN  
F(PLN002)=FEAT/PLANE,CART,509.046,48.086,3.102,-0.007,1,-0  
MEAS/PLANE,F(PLN002),10  
PTMEAS/CART,494.315,47.99,5.342,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,500.874,48.033,5.337,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,507.689,48.078,5.336,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,515.245,48.128,5.328,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,521.894,48.172,5.318,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,521.887,48.17,0.894,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,515.209,48.126,0.887,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,508.132,48.079,0.881,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,499.013,48.019,0.877,-0.007,1,-0  
PTMEAS/CART,505.943,48.065,0.867,-0.007,1,-0  
ENDMES  
\$\$<\MEAS\_PLANE = PLN002>  
T(0)=TOL/DISTB,NOMINL,0,-0.1,0.1,PT2PT,AVG  
OUTPUT/FA(PLN001),FA(PLN002),TA(0)

PAUSE

ENDFIL

---