

# UTVRĐIVANJE MJERNIH POGREŠAKA TROKOORDINATNOG MJERNOG UREĐAJA

---

**Bivol, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:613759>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-10**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

# UTVRĐIVANJE MJERNIH POGREŠAKA TROKOORDINATNOG MJERNOG UREĐAJA

---

**Bivol, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:613759>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-14**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

DOMINIK BIVOL

**Utvrđivanje mjernih pogrešaka  
trokoordinatnog mjernog uređaja**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

DOMINIK BIVOL

**Utvrđivanje mjernih pogrešaka  
trokoordinatnog mjernog uređaja**

ZAVRŠNI RAD

Srđan Medić, Doc.dr.sc.

Karlovac, 2021.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad završio samostalno koristeći znanja i reference koje sam stekao tijekom školovanja.

Zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Srđan Medić što je prihvatio moju molbu za mentorstvo i vodio me kroz izradu završnog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom studiranja, te svim profesorima i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studiranja.

Dominik Bivol

Karlovac, 2021.

## **SAŽETAK**

U završnom radu obrađeno je provođenje mjerenja na trokordinatnom mjernom uređaju, te je praktičnom provedbom mjerenja utvrđena standardna devijacija stroja Nikon Altera 15.7.6. Također, u radu je opisan rad sa trokoordinatnim mjernim uređajem i to tolerancije oblika, kao i tolerancije položaja. Opisan je osnovni rad i korištenje trokoordinatnog mjernog uređaja, te je objašnjen programski paket istog. Osim toga objašnjena je i podjela trokoordinatnog mjernog uređaja uz osnovne karakteristike istih i konačno je donesen zaključak o cjelokupnom zadatku samog rada.

## **SUMMARY**

This paper deals with the implementation of measurements on a coordinate measuring machine (CMM). Using practical measuring, a standard deviation in the Nikon Altera 15.7.6. machine was determined. Furthermore, the paper/thesis goes through the basics of operating a CMM, gives a rundown of its program package and discusses shape and position tolerances. It also gives an overview of the three distinct CMM types with their respective characteristics. The paper ends with a conclusion on its' predefined task and subject.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MJERITELJSTVO .....	2
2.1 Povijest mjeriteljstva.....	2
2.2 Međunarodni sustav jedinica SI.....	3
2.3 Sposobnost mjerenja i umjeravanja (CMC).....	3
2.4 Hrvatski mjeriteljski institut HMI.....	4
2.5 Mjerna nesigurnost.....	5
3. TOLERANCIJE .....	6
3.1 Načini izvedbe tolerancije:.....	6
3.2 ISO tolerancije.....	7
4. KONTROLA KVALITETE .....	8
4.1 Statistička kontrola .....	9
4.2 Kvaliteta u užem smislu.....	10
4.3 Suvremena kontrola kvalitete .....	10
5. POVIJEST TROKOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA .....	11
6. KONSTRUKCIJA KOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA .....	12
6.1 Mostna struktura.....	13
6.2 Pomična mostna struktura.....	14
6.3 Statična mostna struktura.....	14
6.4 Stubna struktura.....	15
6.5 Horizontalna struktura .....	15
6.6 Struktura s postoljem.....	16
7. MJERNA TICALA.....	16
7.1 Mjerno ticalo u početku .....	16
7.2 Načini primjene ticala .....	17
7.3 Ticalo Renishaw PH20 .....	19
7.4 Mjerna glava Renishaw PH20 na Trokoordinatnom mjernom uređaju Nikon .....	20
7.4 Integrirana industrijska standardna sonda TP20 .....	20



8. NAČINI UPRAVLJANJA TROKOORDINATNIM MJERNIM UREĐAJEM .....	21
9. PROGRAMIRANJE TROKOORDINATNOG MJERNOG UREĐAJA .....	21
9.1 Online programiranje .....	21
10. PRAKTICNI DIO .....	22
10.1 Postupak mjerenja putem CMM managera: .....	23
10.1.1. Odabir mjernog ticala: .....	23
10.1.2. Kreiranje površine na koju se projiciraju dimenzije koje mjerimo .....	24
10.1.3. Mjerenje promjera i kružnosti za Ø17H8 .....	25
10.1.4. Prikaz jednog od reporta na mjernom uređaju Nikon Altera 15.7.6 .....	26
10.2 Usporedba mjerenja na mjernom uređaju Nikon Altera 15.7.6 i Tesa MicroHite 3D DCC .....	27
10.2.1. Izračun Standardne devijacije: .....	27
11. ZAKLJUČAK .....	31
LITERATURA .....	32

## POPIS SLIKA

Slika 1. H-profil Henria Tresce [1] .....	2
Slika 2. Direktan prikaz tolerancije.....	6
Slika 3. Prikaz ISO tolerancija [6] .....	7
Slika 4. Odnos kvalitete, potrošača, proizvođača i tržišta .....	8
Slika 5. Odnos kvalitete s obzirom na vrijeme .....	10
Slika 6. Moore No.3 Univerzalni TMU.....	11
Slika 7. Sastavni dijelovi koordinatnih mjernih uređaja [9] .....	12
Slika 8. Najučestaliji primjer konstrukcije TMU [9] .....	13
Slika 9. Shematski prikaz pomične (lijevo) i statične (desno) mostne strukture koordinatnog mjernog uređaja [9] .....	13
Slika 10. Pomična mostna struktura [9] .....	14
Slika 11. Shema stubne strukture[9].....	15
Slika 12. Horizontalna struktura.....	15
Slika 13. Struktura s postoljem .....	16
Slika 14. Prvo dodirno mjerno ticalo koje je izumio Sir David McMurtry 1972. godine [10] .....	17
Slika 15. Broj dodirnih točaka za različite oblike [11] .....	17
Slika 16. Slika graničenja komada u firmi .....	18
Slika 17. Ticalo tvrtke OMP .....	19
Slika 18. Dimenzije mjernog ticala Renishaw PH20 .....	20
Slika 19. Stalak za ticala tvrtke OMP .....	20
Slika 20. Sučelje softwera za upravljanje na trokoordinatnom uređaju za mjerenje ....	22
Slika 21. Odabir mjernog ticala.....	23
Slika 22. Odabir točaka u CMM Manager-u.....	24
Slika 23. Pomicanje ticala u CMM Manager-u.....	24
Slika 24. Mjerenje promjera i kružnosti za Ø17H8.....	25
Slika 25. Report na mjernom uređaju Nikon Altera 15.7.6.....	26
Slika 26. Formula za izračun standardne devijacije.....	27

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Promjer $\varnothing 7.3H8$ .....	28
Tablica 2. Promjer $\varnothing 7.3H8$ - Kružnost.....	28
Tablica 3. Promjer $\varnothing 17H8$ .....	29
Tablica 4. Promjer $\varnothing 17H8$ -kružnost .....	29
Tablica 5. Promjer $\varnothing 62h6$ .....	30
Tablica 6. Promjer $\varnothing 62h6$ -kružnost .....	30

## 1. UVOD

Instrumenti koji se koriste kako bi se složena tijela mjerila nazivaju se trokoordinatni mjerni uređaji (CMM- coordinate measuring machine). Rade na način da najprije mjere pojedine karakteristike objekta, a to se odnosi na geometrijske karakteristike- isčitavanje koordinata položaja (X,Y,Z). Dakle, trokoordinatni mjerni uređaj određuje koordinatu X,Y, Z položaja točaka, površina i crta.

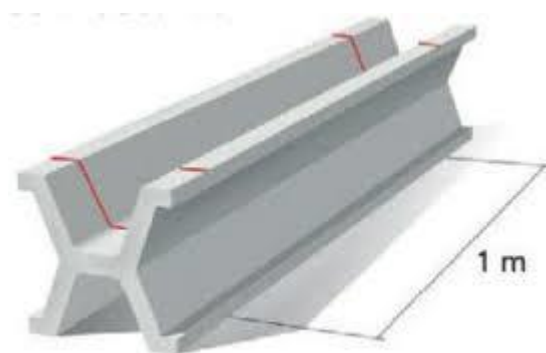
Glavni cilj ovog rada bio je prikazati usporednost mjerenja dvaju trokoordinatnih mjernih instrumenata. U ovom slučaju, koristili smo mjerni instrument Nikon Altera 15.7.6. i Tesa MicroHite 3D DCC. Na svakom od ovih mjernih instrumenata izmjerili smo isti mjerni komad 5 puta, te prema tome dobiti standardnu devijaciju, s ciljem da saznamo koji mjerni uređaj ima veće odstupanje u uzastopnim mjerenjima. S obzirom da je Nikon Altera 15.7.6. noviji i moderniji instrument, očekivanje je da će se u ovom testiranju pokazati kao instrument s manjim odstupanjem kod uzastopnih mjerenja.

## 2. MJERITELJSTVO

### 2.1 Povijest mjeriteljstva

Potreba za mjerenjem javlja se već u davnoj povijesti. Od samih začetaka ljudske civilizacije ljudi počinju raznim načinima sa mjerenjima, pa se navodi kako je u Noino doba korišten lakat za mjerenje dužina. Razlog njegovog korištenja bila je praktičnost i dostupnost, a sama sprava nije bila materijalizirana za mjerenje pa nije bilo straha od gubitaka. Osim lakta za mjerenje su se koristili, a u pojedinim područjima se neke koriste i danas razni drugi dijelovi tijela za mjerenje, kao što su primjerice palac, ruka ili stopa. U angloameričkim zemljama upotrebljava se mjerna jedinica inch što odgovara 25,4 mm odnosno prosjeku širine ljudskog palca. Ta je ista vrijednost jednaka i prosječnoj vrijednosti mjerenoj od početka vrha do prvog zgloba prstenjaka na ruci.

Na Međunarodnoj komisiji 1872. određena je definicija mjetra. Odlučeno je kako će pramjera metra biti legura koja je bila 90-postotno od platine, a 10-postotno od iridija te kako će se metar definirati kao mjerenje udaljenosti između dvije linije koje su ugravirane i to između njihovog središta. Kako bi se osigurala maksimalna krutost za datu količinu materijala tako određena mjera je bila H poprečnog presjeka. Takav je presjek omogućio i da se definiraju linije koje će biti najviše moguće zaštićene od oštećenja koja mogu biti prouzrokovana i nastati na dotičnom materijalu. Za osmišljavanje pramjere zaslužan je francuski inženjer i profesor na Nacionalnom konzervatoriju umjetnosti i zanata u Parizu Henri Tresca koji je ujedno bio i poznat po teoriji koji je osmislio, a bila je to teorija plastičnosti. [1]



Slika 1. H-profil Henria Tresce [1]

## **2.2 Međunarodni sustav jedinica SI**

U Republici Hrvatskoj implementirane su i koriste se zakonite mjerne jedinice. One su definirane U Narodnim novinama br. 163/03 od 1. listopada 2003. te propisane i uređene u zakonu poznatom kao 'Zakon o mjeriteljstvu' i 'Pravilnik o mjernim jedinicama' NN 2/07 te hrvatskim normama HRN ISO 1000 i HRN ISO 31).

Jedinice Međunarodnog sustava jedinica SI definirane su i podijeljene u nekoliko skupina. Te su skupine:” osnovne jedinice, jedinice koje su izvedene sa posebnim nazivima i znakovima te jedinice bez posebnih naziva i znakova. “[12]

Iznimno od navedenih dopuštene su i decimalne jedinice koje se tvore na način da se dodaju decimalni predmetci te složene izvedene jedinice.

## **2.3 Sposobnost mjerenja i umjeravanja (CMC)**

Da bi se poboljšali odnosi u svijetu mjeriteljstva potpisani su sporazumi koji definiraju međusobno priznavanje. Svaki laboratorij ima kao cilj ustvrditi sposobnost mjerenja i umjeravanja CMC te iskazati isto.

U dokumentu “Calibration and Measurement Capabilities in the context of the CIPM MRA” (CIPM MRAD-04, Version 2) opisana je izrada CMC dokumenta, cijeli proces, a dokument se može preuzeti na službenim web stranicama BIMP-a ([www.bipm.org](http://www.bipm.org))

Međusobnim uspoređivanjem došlo se do rezultata koji su bili dokaz za objavu CMC-a na bazi nacionalnih i odabranih mjeriteljskih instituta. Za svako su područje definirani Savjetodavni odbori unutar same Međunarodne komisije za utege i mjere (CIPM) i kroz njih se dolazi do ključnih usporedbi.

Na razinama regija provode se ključne usporedbe koje se nazivaju RMO usporedbe (Regional Metrology Organization). U mjerenjima koja su usporedne prirode sudjeluju članovi mjeriteljskih organizacija unutar regija kao i drugi laboratoriji. Da bi se povezale RMO i CIPM ključne usporedbe definirani su laboratoriji koji služe upravo za to povezivanje rezultata RMO ključnih usporedbi sa CIPM ključnim usporedbama. Kako bi se objavile CMC vrijednosti moraju postojati rezultati ključnih usporedbi, koji su nužan uvjet. Ti se rezultati nalaze u bazi koja je podržana od strane Međunarodnog ureda za utege i mjere The BIPM key comparison database KCDB i može se pronaći na web stranici ([kcdb.bipm.org](http://kcdb.bipm.org)). [2]

## **2.4 Hrvatski mjeriteljski institut HMI**

HMI u svom djelovanju ima sljedeće zadatke:

1. Uskladiti rad nacionalnih mjernih laboratorija te definirati državne etalone kao i obavljati upravne i stručne poslove istih.
2. Razvijati nacionalni sustav temeljnog mjeriteljstva kroz planiranje, provođenje i organiziranje poslova .
3. Umjeravati etalone i mjerile te osigurati slijedivost mjerenja u Republici Hrvatskoj.
4. Osigurati slijedljivost etalona sa međunarodnim etalonima te održavati državne etalone.
5. Istraživati područje temeljnog mjeriteljstva te ujedno donijeti razvoj unutar njega.
6. Po potrebi uspostavljati nacionalne umjerne laboratorije u okviru HMI-a te obavljati poslove u njihovom opsegu djelovanja.
7. Obavljati poslove usklađivanja i nadzora nacionalnih umjernih laboratorija koji su izvan HMI-a.
8. Izvršavanje poslova koji su definirani članstvom u međunarodnih mjeriteljskim organizacijama za temeljno mjeriteljstvo te predstavljanje Republike Hrvatske u okviru istoga [3]

## 2.5 Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost definirana je kao parametar rasipanja vrijednosti koje se mogu pripisati mjernoj veličini uz određenu vjerojatnost. Ona zapravo odražava nedostatak znanja o dotičnoj mjernoj veličini. Mjerni rezultat zapravo odražava procjenu vrijednosti mjerne veličine budući da su ispravke sustavnih djelovanja podložne pogreškama kao i zbog postojanja nesigurnosti.

Izvori nesigurnosti u mjerenju mogu biti različiti:

1. Pojava nesigurnosti uzrokovana nepotpunim određivanjem mjerne veličine.
2. Pojava uzoraka koji ne predstavljaju točno određenu mjernu veličinu jer su nereprezentativno uzorkovani.
3. Loše mjerenje uvjeta okoliša ili pak nedovoljno poznavanje utjecaja okoliša na mjerenje.
4. Subjektivno očitavanje analognih instrumenata.
5. Razlučivanje instrumenata.
6. Netočnost mjernih etalona i refenci tvari.
7. Netočne konstante ili drugi parametri koji se upotrebljavaju u algoritmu, a dobiveni su iz vanjskih izvora.
8. Mjerna metoda ili postupak proizašao iz približnih određenja i pretpostavki.
9. Različiti rezultati dobiveni ponovljenim mjerenjima u istim uvjetima odnosno njihova promjena.

Mjerna se nesigurnost procjenjuje zbog nesavršenosti mjerenja i radi nedvosmislenosti iskazivanja i uspoređivanja mjernih rezultata koji su dobiveni u različitim ispitnim laboratorijima. Također, mjerna se nesigurnost procjenjuje da bi se rezultati uspoređivali sa zadanim tolerancijama ili specifikacijom proizvođača. [4], [5]



### 3. TOLERANCIJE

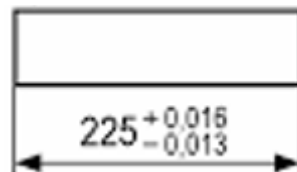
Za svaku se dimenziju prilikom izrade dogode neka odstupanja. Stoga je potrebno prilikom određivanja točnosti propisati i dozvoljenu grešku. Tolerancija je odudaranje odnosno odstupanje neke dimenzije od njene zadane vrijednosti.

“Tolerancija je dopušteno odstupanje od nazivne (nominalne) izmjere nekoga strojnog dijela. Ovisi o točnosti koju se izradbom želi postići i o veličini izmjere, a određuje ju konstruktor. Izražava se standardnom jedinicom tolerancije (međunarodnom jedinicom tolerancije, tolerancijskim koeficijentom). Tolerancije su uređene međunarodnim normama ISO, a za praktičnu primjenu i pravilan rad strojnih dijelova posebno su važne kod dijelova u međusobnom dosjedu (npr. osovina i ležaj). Tolerancijama se osigurava i dovoljna točnost, koja je nužna za zamjenljivost doknadnih dijelova i za montažu bez doradâ.” [13]

Postoje tolerancije vanjske i unutarnje mjere. Pod tolerancije vanjske mjere spadaju primjerice promjer osovine, širina klina i slično, dok pod tolerancije unutarnje mjere spadaju promjer rupe, širina utora klin itd.

#### 3.1 Načini izvedbe tolerancije:

Direktan upis tolerancije jest kao vrijednost odstupanja uz kotu.

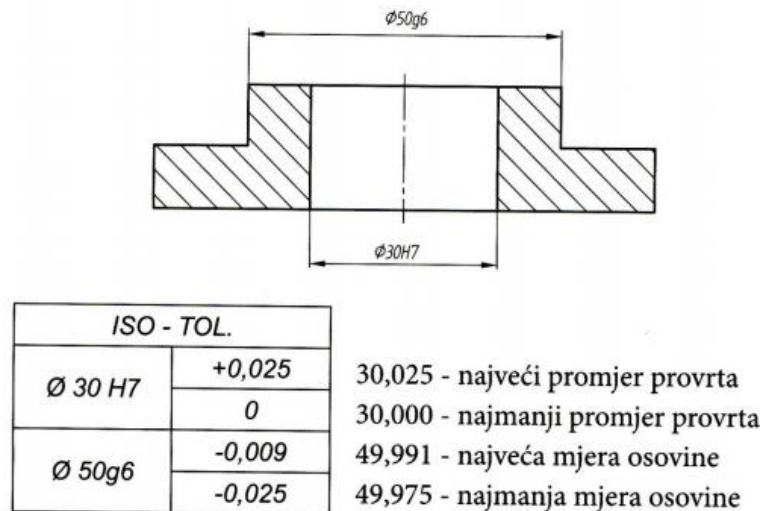


Slika 2. Direktni prikaz tolerancije

Dakle predmet ne smije biti manje mjere od 224, 987 ili veće od 225,016. Tolerancijsko polje T ili širina tolerancije jest razlika između tih granica.

### 3.2 ISO tolerancije

“U tehnici se najčešće koristi standardizirani sustav tolerancija prema ISO 286. To je šifrirani način označavanja tolerancije: Šifra se piše uz kotu nazivne mjere i sastoji se iz jednog slova i brojke.” [6]



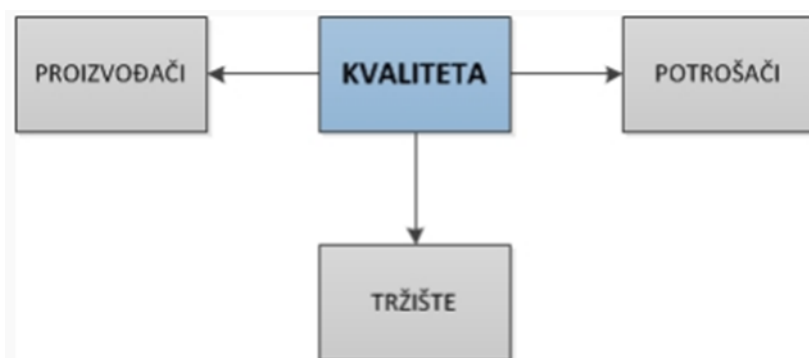
Slika 3. Prikaz ISO tolerancija [6]

Početak (položaj) tolerantnog polja označen je sa slovom; sa velikim slovom označene su unutrašnje mjere (npr. H7), a sa malim slovom označene su vanjske mjere (osovine). Brojem je označena širina tolerancijskog polja. [6]

## 4. KONTROLA KVALITETE

Sama riječ kvaliteta latinskog je podrijetla, a u slobodnom prijevodu riječ „qualitas“ iz koje vuče korijen prevela bi se sa takav. Samu kvalitetu je teško i opsežno za definirati budući da postoji više različitih pogleda sa kojih se kvaliteta može promatrati. Iz perspektive potrošača povezuje se najčešće sa cijenom ili korisnošću, ali to je ovisno i relativno budući da je povezano sa onime što potrošač traži. Iz druge perspektive, one proizvođača- kvaliteta je povezana sa izradom proizvoda u svrhu što boljeg zadovoljstva potrošača, ali i što manjih gubitaka i škarta. Sumarno bi kvaliteta označavala vrijednost neke stvari te kompatibilnost sa zahtjevom ili normom. Opća definicija glasi: „ Kvaliteta je mjera ili pokazatelj koji pokazuje obujam, odnosno iznos uporabne vrijednosti nekog proizvoda ili usluge za zadovoljenje točno određene potrebe na određenom mjestu i u osređenom trenutku, onda kada se taj proizvod i usluga kroz društveni proces razmjene potvrđuju kao roba.“ [3] Prema ISO 9000:2000 kvaliteta je „stupanj do koje skup svojstvenih karakteristika ispunjava zahtjeve“. Ono što je zajedničko svim definicijama jest da je cilj zadovoljenje potreba kupca.

Na slici 4. je prikazan odnos kvalitete i potrošača, proizvođača i tržišta:



Slika 4. Odnos kvalitete, potrošača, proizvođača i tržišta

Opća definicija glasi: "Kvaliteta je mjera ili pokazatelj koji pokazuje obujam, odnosno iznos uporabne vrijednosti nekog proizvoda ili usluge za zadovoljenje točno određene potrebe na određenom mjestu i u određenom trenutku, onda kada se taj proizvod i usluga kroz društveni proces razmjene potvrđuju kao roba".

Prema službenoj definiciji normi ISO 9000:2000 kvaliteta je granica ispunjenja zahtjeva i neminovna je u proizvodnji gdje je cilj povećati efikasnost cjelokupnog procesa.

Kontrola kvalitete provodi se kroz tri mogućnosti: bez kontrole, 100%-tna kontrola ili statistička kontrola.

Proizvodnja bez kontrole provodi se gotovo nikada ili vrlo rijetko i to u procesima kod kojih su obavljene verifikacija i validacija elemenata proizvodnje i gdje je tehnologija u samom procesu visoko sofisticirana. I tada se kontrola provodi od strane strojeva u vidu nekog minimalnog oblika kontrole. 100%-tna je kontrola ona koja se provodi u svrhu provjeravanja zadovoljenja zahtjeva samog proizvoda. Ovakav oblik kontrole ima mnoge nedostatke od kojih su neki da je skupa te može biti pogrešno shvaćena budući da to nije kontrola apsolutno svih značajki već samo onih određenih, a isto tako može rezultirati prihvaćanjem škart, kao i neprihvatanjem dobrih dijelova. To se najčešće događa zbog toga što monotonija ponavljanja operacija može dovesti do pogrešaka, a isto tako i zbog toga što interpretacije specifikacija mogu biti subjektivne pa neki zadovoljavajući dijelovi neopravdano prelaze u škart.

100%se kontrola ne koristi u slučajevima ispitivanja, a u slučajevima opasnosti od uništenja ili oštećenja imovine ona je nužna.

#### **4.1 Statistička kontrola**

Statistička kontrola ima za cilj osigurati kvalitetu proizvoda, procesa i usluga, a sastavljena je od metoda i postupaka kojima se prikupljaju, analiziraju i tumače podatci. U ovakvoj vrsti kontrole koriste se statističke tehnike i uzimaju se uzorci određenih veličina koji „garantiraju pouzdanost“ zaključka o skupu budući da su veličine koje su uzimane zapravo funkcije veličine isporuke te su kao takve reprezentativne kao uzorak.

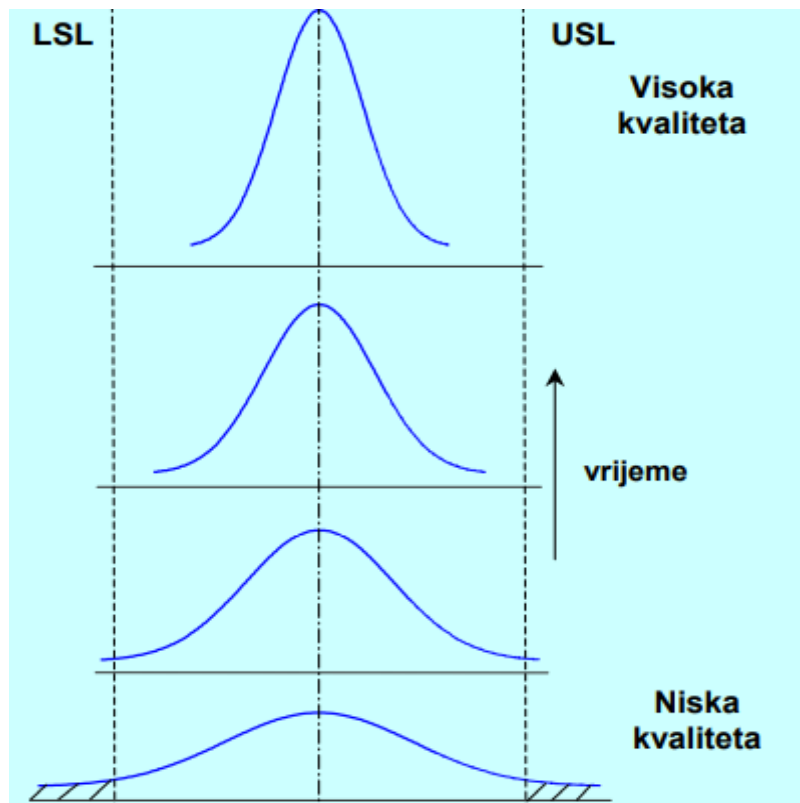
Nadzor kvalitete iliti kontrola niz je djelatnosti kojima se preispituje kvaliteta, a prema ISO 9000 definirana je kao : „upravljanje kvalitetom usredotočenom na ostvarivanje potrebne razine kvalitete.“[8]

U današnjem se svijetu o kvaliteti često govori u kontekstu zadovoljstva kupca koji najčešće određuje kvalitetu s obzirom na rokove, cijenu i cjelokupnom dojmu isporuke i njemu vidljivih elemenata povezanih sa naručenim proizvodom. [8]

## 4.2 Kvaliteta u užem smislu

Kada govorimo o kvaliteti u širem smislu, tu se podrazumijeva kvaliteta ocijenjena od strane kupca i to u direktnoj poveznici sa njegovim zadovoljstvom i cjelokupnim dojmom dok se o kvaliteti u užem smislu govori o ispunjavanju tehničkih zahtjeva. Osnovna mjera koja je u direktnoj poveznici sa poboljšanjem kvalitete jest rasipanje značajke procesa, a cilj je njezino stalno smanjenje. [7]

Smanjenjem rasipanja kvaliteta raste.



Slika 5. Odnos kvalitete s obzirom na vrijeme

## 4.3 Suvremena kontrola kvalitete

$\sigma$  je u statistici mjera rasipanja stoga se može nazvati i mjerom kvalitete. Cilj je cjelokupne proizvodnje smanjenje rasipanja i povećanje kvalitete koje se postiže mjerenjima i analizom podataka tijekom cjelokupnog procesa.

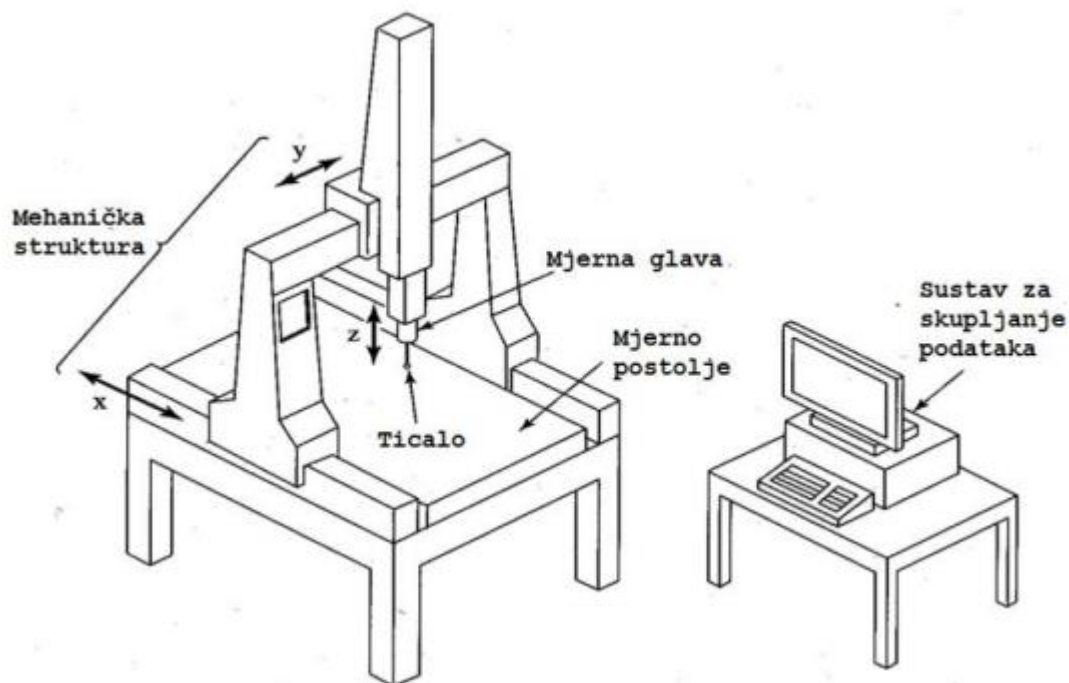
## 5. POVIJEST TROKOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA

Tijekom 50-ih godina u okviru vojne industrije izumljeni su dvokoordinatni mjerni uređaji, a tijekom 60-ih godina već je počeo razvoj trokoordinatnih mjernih uređaja. Prvi je 2-osni uređaj za mjerenje razvila Sheffield Corporation i bio je to YZ uređaj, korišten u vojnoj industriji. Univerzalni TMU, Trokoordinatni mjerni uređaj, poznat kao Moore No.3 izumljen je 1957. [9]



Slika 6. Moore No.3 Univerzalni TMU

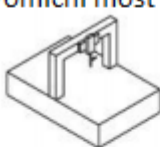
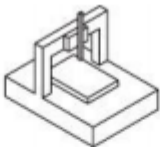
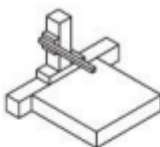
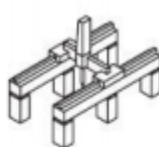
## 6. KONSTRUKCIJA KOORDINATNIH MJERNIH UREĐAJA



Slika 7. Sastavni dijelovi koordinatnih mjernih uređaja [9]

Ovisno o primjeni koordinatnih mjernih strojeva primjenjuje se princip izrade: kad je potrebna velika preciznost koriste se ekonomska rješenja, a kad je potrebna točnost tehnološka rješenja.

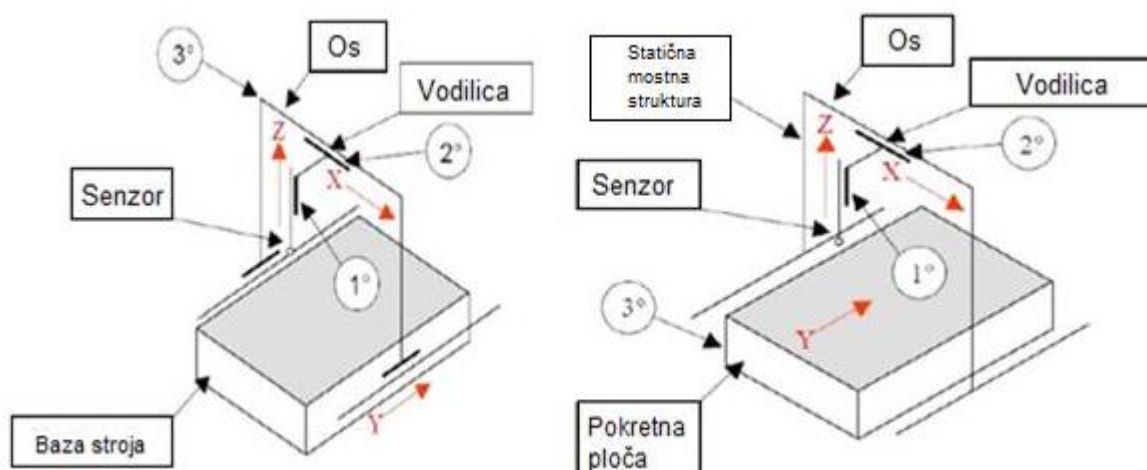
Osnovna podjela koordinatnih mjernih uređaja je na: mostne, stubne, horizontalne i strukture u obliku postolja.

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

Slika 8. Najučestaliji primjer konstrukcije TMU [9]

### 6.1 Mostna struktura

Najčešće korištene strukture za TUM su pomična mostna čija je podjela na statičnu i pomičnu te konzolna.

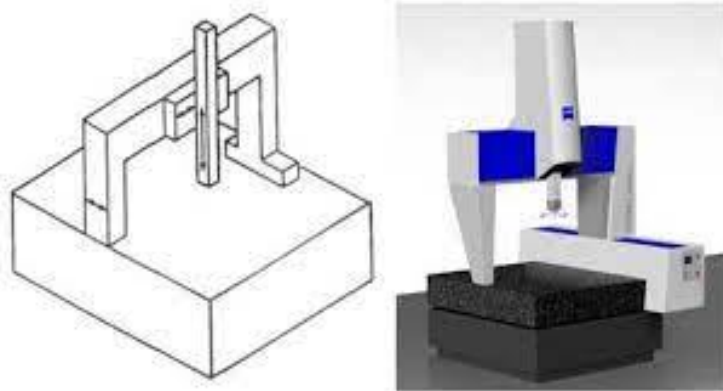


Slika 9. Shematski prikaz pomične (lijevo) i statične (desno) mostne strukture koordinatnog mjernog uređaja [9]



## 6.2 Pomična mostna struktura

Stabilnost na radnoj površini osigurava baza koja je izrađena od keramike. U svrhu minimizacije trenja pokretni dijelovi nalaze se na zračnom jastuku što rezultira malim silama koje pomiču stupove. Negativna strana pomične mostne strukture je da je postavljanje iluminacijskih sustava koji procesuiraju odašiljanje slike otežano. Bočni bi se stupovi u radu trebali pomicati ujednačeno duž X- osi što otežava izradu takvih nosača. [9]



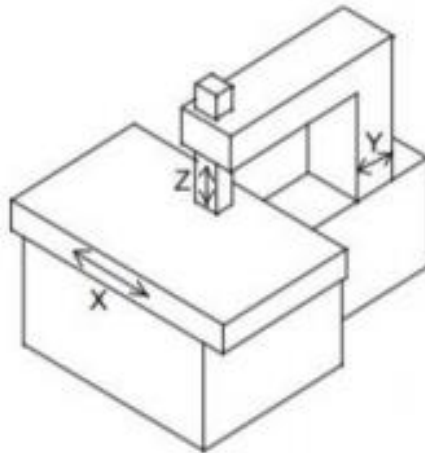
Slika 10. Pomična mostna struktura [9]

## 6.3 Statična mostna struktura

Nedostatak pomične strukture kod statičnih je struktura otklonjen fiksiranim mostom koji je spojen na uređaj. Budući da se mjerni uređaj i mjerni objekt pomiču, ovakva izrada daje nepreciznija mjerenja, ali se dobiva na vremenu. Statična se mostna struktura koristi najčešće za optičko i višesenzorsko koordinatno mjerenje.

## 6.4 Stubna struktura

Za mjerenje dijelova većih od postolja koji se mogu postaviti na otvorenu stranu koristi se stubna struktura koja je namijenjena za manje ili srednje strojeve. Na slici 11. nalazi se shema stubne strukture, a s obzirom da se radi o stroju manje ili srednje veličine, ističe se velikom preciznošću.



Slika 11. Shema stubne strukture [9]

## 6.5 Horizontalna struktura

Horizontalni tip koordinatnog mjernog uređaja građen je od horizontalne ruke. Ovakav se tip, kao što mu ime kaže, kreće samo u horizontalnom smjeru. Druga je os pokretni mjerni stroj. Horizontalni mjerni ređaji koriste se za izradu velikih komada, primjerice karoserija budući da im je prednost velik radni prostor.

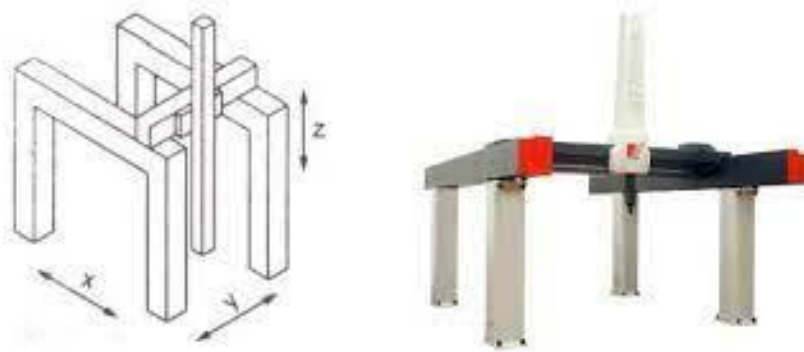
Preciznost zadovoljava potrebe mjerenja, ali nije precizna kao mjerni uređaji manjih dimenzija.



Slika 12. Horizontalna struktura

## 6.6 Struktura s postoljem

Struktura s postoljem koristi se kada je potrebno precizno mjerenje i uska tolerancija te za izradu komada koji su velikog volumena, većeg od 10 m<sup>3</sup>.



Slika 13. Struktura s postoljem

## 7. MJERNA TICALA

Mjerna ticala su dijelovi koji povezuju koordinatni mjerni uređaj i mjerni predmet te tako čine najbitnije elemente, a odgovorni su za točnost samog mjerenja. Mjerna ticala su dakle poveznica predmeta sa koordinatnim sustavom stroja pri čemu kontakt sa površinom može biti registriran analognim ili kontaktnim principom. U primjeni su najčešće dvosmjerne i trosmjerne glave. [10]

### 7.1 Mjerno ticalo u početku

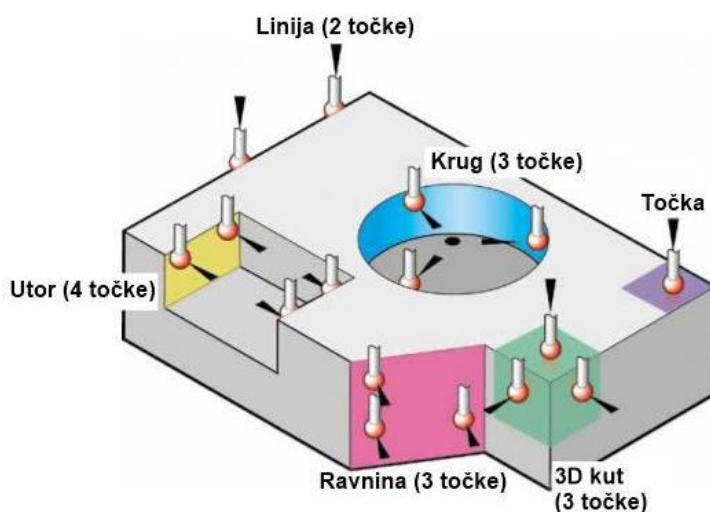
Prije izuma dodirnog ticala koje je izumljeno zahvaljujući Davidu McMurtryju 1972. korištena su kruta ticala konusnog oblika. U takvom načinu rada ticala su dovođena ručno u kontakt sa materijalom koji se mjeri što je rezultiralo mnogim grešakama, a cijeli je proces bio izrazito spor. Izumom dodirnog ticala potaknut je razvoj trokoordinatnih mjernih uređaja što će dovesti do brzih i preciznijih mjerenja istima. [10]



Slika 14. Prvo dodirno mjerno ticalo koje je izumio Sir David McMurtry 1972. godine [10]

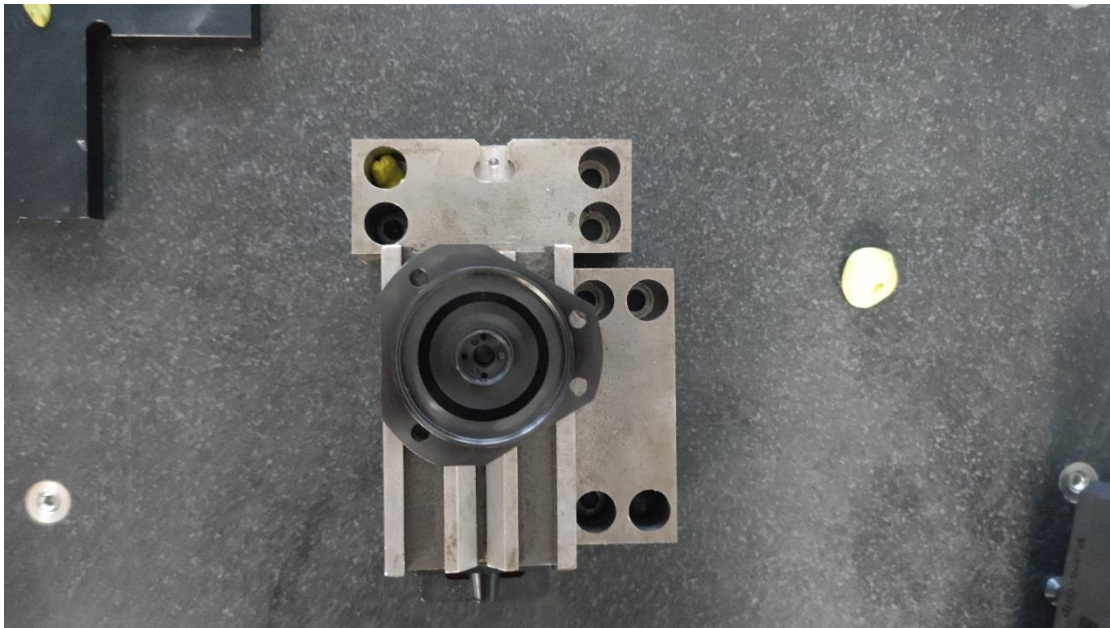
## 7.2 Načini primjene ticala

Prilikom doticaja ticala i materijala koji se mjeri koriste se mjerne sonde. Te su sonde najčešće dodirna ticala zbog uporabe prekidača koji se aktiviraju tijekom kontakta. Sonda za vrijeme kontakta signalizira koordinate određene pozicije te nakon što očita danu koordinatu prelazi na sljedeću lokaciju. Zadanu koordinatu sonda preko softwerea šalje računalu. Za pojedine oblike propisan je minimalan broj točaka sa očitanim koordinatama što je prikazano na slici 15. [11]



Slika 15. Broj dodirnih točaka za različite oblike [11]

Položaj komada koji mjerimo na stroju uvijek gledamo da bude specifičan, te da se neki drugi takav komad iz različite serije može staviti na zapamćenu poziciju, kako bi mogli uzastopno ponavljati mjerenje komada približno istih dimenzija. Na slici (broj slike) vidljivo je kako smo mjerni komad graničili na same rubove magneta, a sam magnet graničen je na metalnom kutniku koji je fiksiran na radnoj površini mjernog uređaja. Opisana tehnika nam pomaže u ponavljanju mjerenja komada sličnih dimenzija.



Slika 16. Slika graničenja komada u firmi

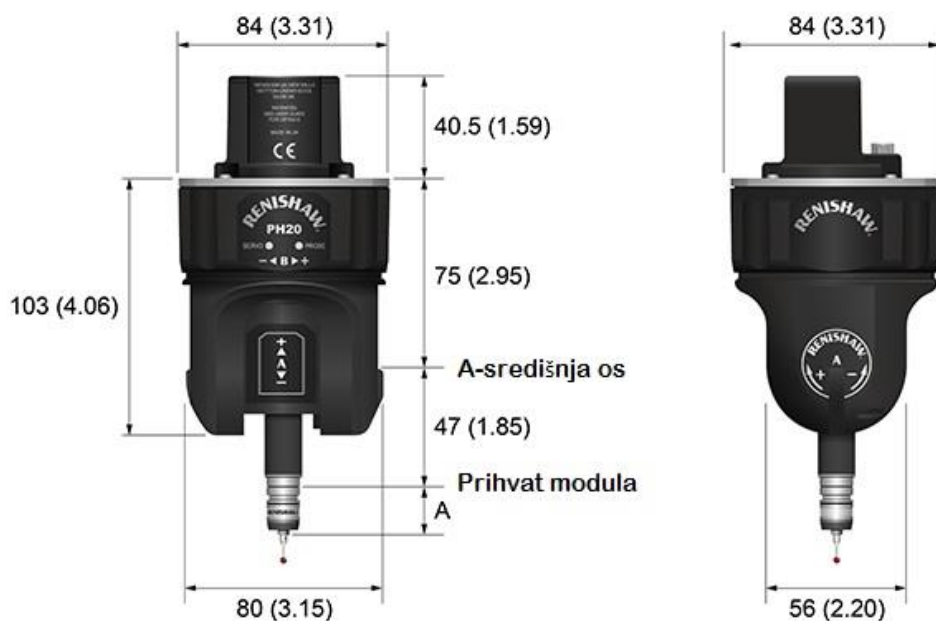
### 7.3 Ticalo Renishaw PH20

Jedinstvena tehnika „pretpostavljene kalibracije“ razvijena za PH20 određuje orijentaciju glave i položaj sonde u jednoj operaciji, dopuštajući naknadno mjerenje pod bilo kojim kutom glave. Daljnji moduli zahtijevaju samo nekoliko dodira na kalibracijskoj sferi prije uporabe (poboljšane mjeriteljske performanse dostupne su ako je potrebno kalibriranjem vrha sonde u orijentaciji značajke).



Slika 17. Ticalo tvrtke OMP

## 7.4 Mjerna glava Renishaw PH20 na Trokoordinatnom mjernom uređaju Nikon



Slika 18. Dimenzije mjernog ticala Renishaw PH20

### 7.4 Integrirana industrijska standardna sonda TP20

Korisnici glave sonde PH20 odmah će imati pristup rasponu provjerenih modula sonde TP20, pružajući širok izbor sila okidanja, mogućnosti osjetljivosti smjera i proširenja kako bi zadovoljili zahtjeve primjene. Odvojivi moduli pružaju zaštitu od sudara i mogu se automatski promijeniti pomoću stalka za promjenu TCR20.



Slika 19. Stalak za ticala tvrtke OMP

## **8. NAČINI UPRAVLJANJA TROKOORDINATNIM MJERNIM UREĐAJEM**

Načini upravljanja trokoordinatnim mjernim uređajem mogu se svrstati u 4 kategorije, a to su: ručno upravljanje, ručno upravljanje potpomognuto računalom za obradu podataka, motorno upravljanje potpomognuto računalom za obradu podataka i direktno upravljanje računalom. Ručno upravljanje izvodi se tako da se ticalo ručno pomiče duž koordinatnih osi od strane operatera koji ujedno i vrši izračune dok su dimenzije zapisane digitalno. Motorno upravljanje izvodi se da je ticalo duž koordinatnih osi upravljano sa električnim motorima putem upravljačke palice od strane operatera dok su podaci prikupljeni i obrađivani računalom. Direktno upravljanje izvodi se pomoću programa te je mjerni objekt postavljen na postolje od strane operatera dok program vrši mjerenja i dobivaju se izračuni, što je slično upravljanju CNC strojeva. Ovakvim se načinom uz CAD model određuje položaj objekta koji je mjereno u volumenu mjernog uređaja.

## **9. PROGRAMIRANJE TROKOORDINATNOG MJERNOG UREĐAJA**

Programiranje trokoordinatnog mjernog uređaja može biti izravno (online) i neizravno (offline).

### **9.1 Online programiranje**

U online programiranju mjerni je objekt postavljen sa upravljačkom palicom kojom se mjereno ticalo dovodi u kontakt sa objektom, a mjerni uređaj i računalo su povezani software-om. Program se izvršava ručnim načinom rada (manual mode), automatskim načinom rada (automatic mode) ili programskim načinom rada (programming mode).

U ručnom načinu rada, koje se najčešće koristi kod jednokratnih ispitivanja, operater upravlja s mjernim uređajem putem upravljačke palice, dok računalo ispisuje podatke. U manual mode-u programa operater uzima mjerne točke, a program ih ispisuje. Kada je u mjerenjima potrebno više točaka započinje programski način rada budući da bi operatorsko pokretanje bilo presporo. U takvom načinu rada točke se uzimaju na mjestima koje je operater odredio dok se kod automatskog načina rada točke uzimaju na mjestima koja će po procjeni programa dati najtočnije rezultate. [11]

### **9.2. Off- line programiranje**

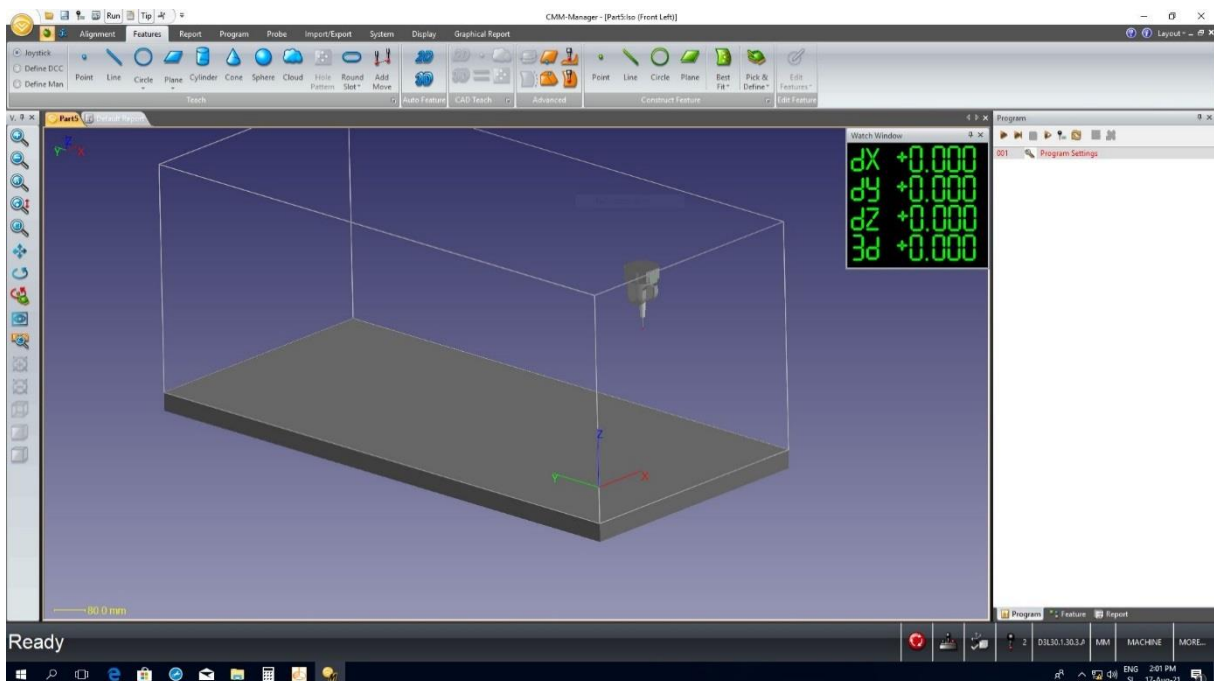
Off-line je programiranje naredbama identično kao online programiranje. Mjerenje se u offline programiranju izvršava na simulaciji koje je podržano od strane današnjih programa koji prikazuju i simulaciju mjernog postolja i mjernog ticala. U ovom načinu



programiranja mjerni uređaj i računalo nisu međusobno povezani. Ukoliko se želi izvršiti stvarno mjerenje program se može prebaciti u online način i izvršiti kao online programiranje. Postupak off- line programiranja se izvodi na način da se najprije otvori novi program u offline načinu rada, zatim se otvori CAD model u simulacijskom prozoru te se mjerenje izvodi simultativno i određuje se stvarna pozicija mjernog objekta u volumenu mjernog uređaja.

## 10. PRAKTICNI DIO

Sučelje softwera za upravljanje na trokoordinatnom uređaju za mjerenje.



Slika 20. Sučelje softwera za upravljanje na trokoordinatnom uređaju za mjerenje

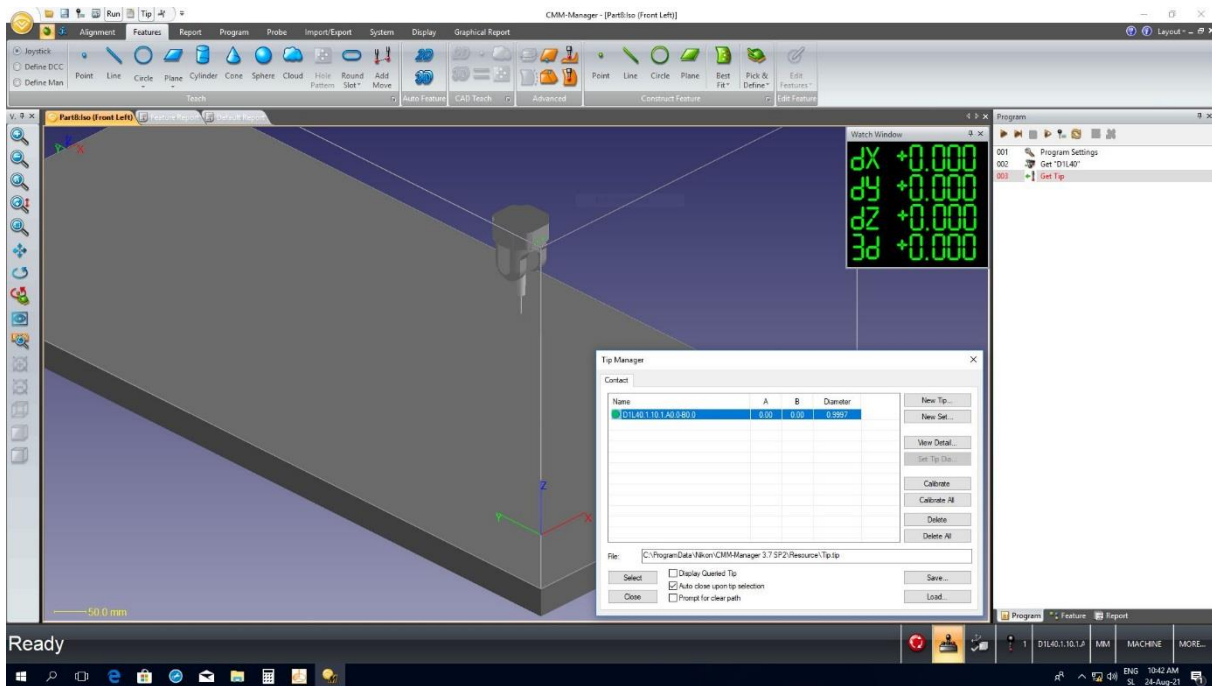
### CMM-Manager

Objektno orijentirano sučelje omogućuje jednostavno stvaranje programa bez složenog programskog jezika temeljenog na tekstu. CMM-Manager također nudi fleksibilne, ali jednostavne funkcije, uključujući upravljanje grafičkom konfiguracijom sonde, automatsku kalibraciju vrha, skeniranje presjeka i grupno mjerenje značajki. Pojednostavite svoje mjeriteljske zadatke putem našeg intuitivnog, ali moćnog softwera dostupnog za bilo koju CMM, prijenosnu ruku ili mjerni uređaj.

## 10.1 Postupak mjerenja putem CMM managera:

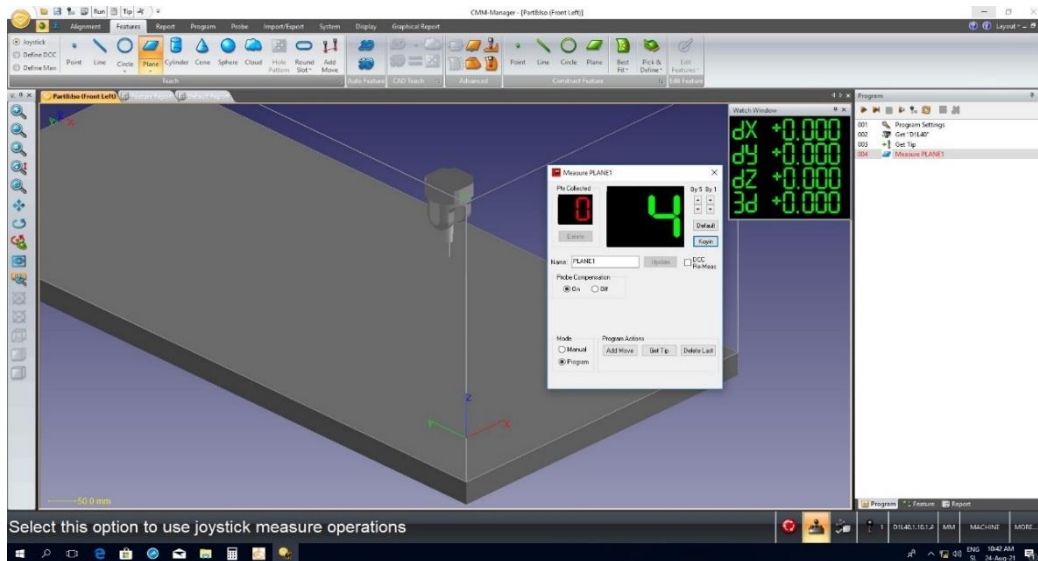
### 10.1.1. Odabir mjernog ticala:

Nakon otvaranja programa CMM Manager i povezivanja sa serverom, potrebno je odabrati određeno ticalo prije samog mjerenja. U primjeru na slici, odabrali smo ticalo D3L40, pod kutom A=0 i B=0. Naziv samog ticala formira mjeritelj. Naziv D3L40 govori nam da je promjer mjernog ticala 3mm, a dužina od modula do vrha ticala 40mm.



Slika 21. Odabir mjernog ticala

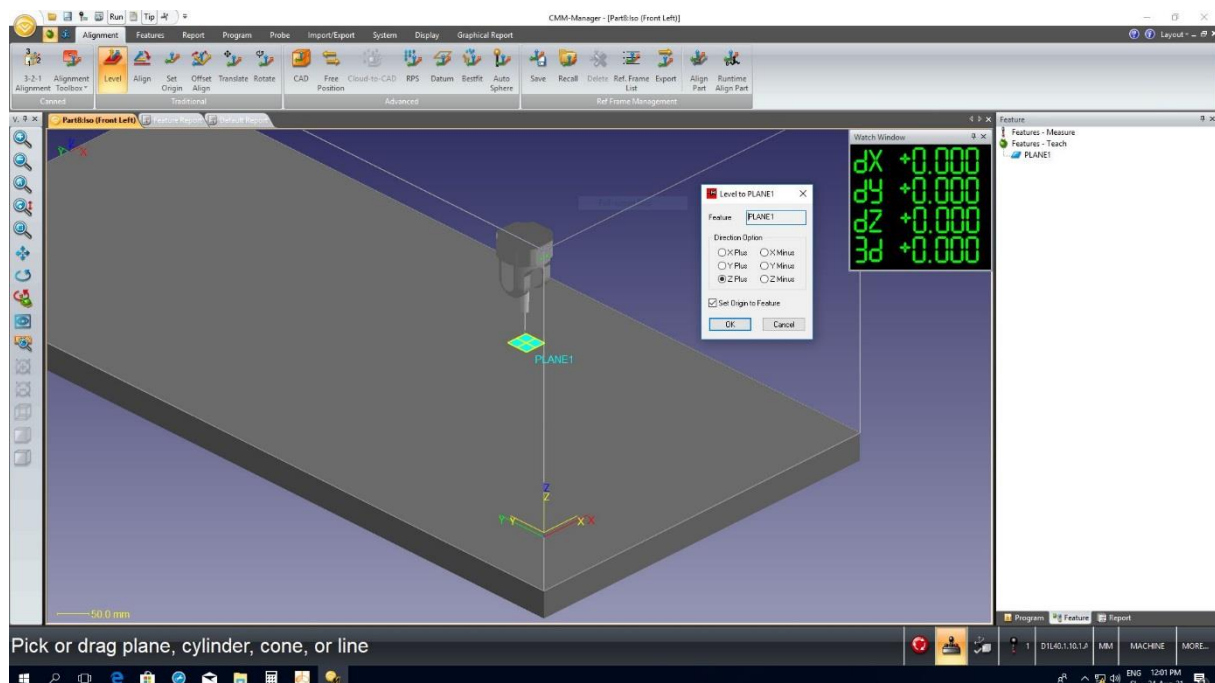
## 10.1.2. Kreiranje površine na koju se projiciraju dimenzije koje mjerimo



Slika 22. Odabir točaka u CMM Manager-u

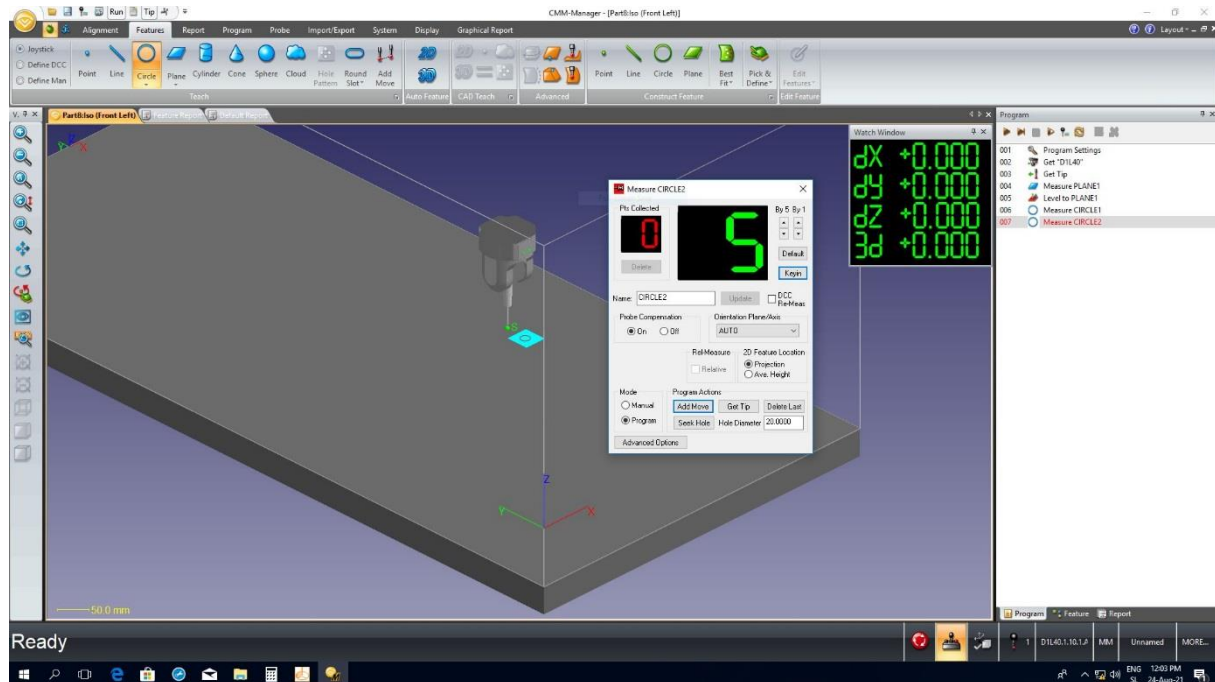
U prikazanom sučelju programa CMM Manager odabiremo PLANE, te nam se otvori izbornik u kojem biramo koliko ćemo točaka odabrati na određenoj površini. U primjeru sa slike vidljivo je da smo odabrali 4 točke, koje ćemo odrediti pomoću upravljačkog joysticka.

Nakon odabira svih željenih točki, odmičemo ticalo u poziciju koja će biti početna točka za mjerenje sljedeće dimenzije.



Slika 23. Pomicanje ticala u CMM Manager-u

### 10.1.3. Mjerenje promjera i kružnosti za Ø17H8



Slika 24. Mjerenje promjera i kružnosti za Ø17H8

Prilikom mjerenja kružnice, potrebno je odabrati minimalno 3 točke. U primjeru sa slike, odabrali smo 5 točaka, kako bi mogli dobiti preciznije mjerenje dimenzije i kružnosti.

Odnosno, što više točaka odaberemo, to će mjerenje biti preciznije. Isti postupak ponavljamo za mjerenje promjera Ø7.3H8 i Ø62n6

Nakon određivanja, odnosno mjerenja svih dimenzija, potrebno je odabrati Report u sučelju softwera. Report je naredba koja nam omogućuje da za svaku odabranu poziciju možemo saznati koliko iznosi njezina dimenzija.

Kao što je u primjeru sa slike prikazano, odredili smo sve pozicije na predmetu koji mjerimo, te smo kreirali program koji možemo ponavljati više puta. Nakon toga potrebno je pokrenuti program i izmjeriti mjerni komad u automatskom modu. Prilikom završetka mjerenja, program nam automatski prikazuje report, odnosno rezultate mjerenja za određenu poziciju.

#### 10.1.4. Prikaz jednog od reporta na mjernom uređaju Nikon Altera 15.7.6

#1 Tolerance Report						
Feature	CIRCLE1					
Type	CIRCLE					
SubType	INNER					
Note	Fi17H8- Kružnost					
	Nom	Act	Dev	LoTol	UpTol	OutTol
CIR			0.0016		0.0100	

#2 Tolerance Report						
Feature	CIRCLE1					
Type	CIRCLE					
SubType	INNER					
Note	Fi17H8					
	Nom	Act	Dev	LoTol	UpTol	OutTol
DIA	17.0000	17.0009	0.0009	0.0000	0.0270	

#3 Tolerance Report						
Feature	CIRCLE2					
Type	CIRCLE					
SubType	INNER					
Note	Fi7.3H8					
	Nom	Act	Dev	LoTol	UpTol	OutTol
DIA	7.3000	7.3258	0.0258	0.0000	0.0220	0.0038

#4 Tolerance Report						
Feature	CIRCLE2					
Type	CIRCLE					
SubType	INNER					
Note	Fi7.3H8- Kružnost					
	Nom	Act	Dev	LoTol	UpTol	OutTol
CIR			0.0013		0.0100	

#5 Tolerance Report						
Feature	CIRCLE3					
Type	CIRCLE					
SubType	OUTER					
Note	Fi62h6					
	Nom	Act	Dev	LoTol	UpTol	OutTol
DIA	62.0000	61.9888	-0.0112	-0.0190	0.0000	

#6 Tolerance Report						
Feature	CIRCLE3					
Type	CIRCLE					
SubType	OUTER					
Note	Fi62h6- Kružnost					
	Nom	Act	Dev	LoTol	UpTol	OutTol
CIR			0.0005		0.0100	

Slika 25. Report na mjernom uređaju Nikon Altera 15.7.6

## 10.2 Usporedba mjerenja na mjernom uređaju Nikon Altera 15.7.6 i Tesa MicroHite 3D DCC

Usporedbu mjerenja na određenim uređajima pokazat ćemo na principu izračuna standardne devijacije i aritmetičke sredine izmjerenih dimenzija na istom mjernom komadu. Na svakom mjernom uređaju isti smo mjerni komad mjerili 5 puta.

### 10.2.1. Izračun Standardne devijacije:

Standardno odstupanje procijenjeno je temeljem podataka iz kontrolne karte i naziva se standardno odstupanje iz uzoraka ili unutrašnje standardno odstupanje (within subgroups or internal standard deviation). Raznovrsne kontrolne karte se koriste za otkrivanje varijacija u procesu te za utvrđivanje iznosa standardnog odstupanja procesa. Ako se u postupku procjene standardnog odstupanja koriste svi podaci iz uzoraka kontrolne karte dobiva se tzv. ukupno standardno odstupanje (engl. overall standard deviation) temeljem kojeg se računa indeks stvarne sposobnosti procesa (engl. Performance Process).

Formula za izračun standardne devijacije:

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

Slika 26. Formula za izračun standardne devijacije

Koristeći ovu formulu za izračun standardne devijacije primijenili smo na svaku izmjerenu mjeru. (7.3H8,62h6,17H8, te njihove kružnosti)

Tablica dobivenih mjera i odnos standardne devijacije:

Mjera $\varnothing 7.3H8$		
Nikon Altera 15.7.6.		Tesa MicroHite 3D DCC
Mjerenje		
1	7.3258	7.3316
2	7.3260	7.3321
3	7.3267	7.3299
4	7.3262	7.3299
5	7.3269	7.3297
Standradna devijacija:		Standradna devijacija:
0.00046583259		0.00112160599
Aritmetička sredina:		Aritmetička sredina:
7.32632		7.33064

Tablica 1. Promjer  $\varnothing 7.3H8$

Mjera $\varnothing 7.3H8$ - Kružnost		
Nikon Altera 15.7.6.		Tesa MicroHite 3D DCC
Mjerenje		
1	0.0013	0.0052
2	0.0007	0.0049
3	0.0010	0.0087
4	0.0008	0.0068
5	0.0006	0.0071
Standradna devijacija:		Standradna devijacija:
0.00027748874		0.001543696
Aritmetička sredina:		Aritmetička sredina:
0.008799		0.00654

Tablica 2. Promjer  $\varnothing 7.3H8$ - Kružnost

Mjera Ø17H8		
Nikon Altera 15.7.6.		Tesa MicroHite 3D DCC
Mjerenje		
1	17.0009	17.0087
2	17.0005	17.0102
3	17.0006	17.0099
4	17.0003	17.0095
5	16.9999	17.0099
Standradna devijacija:		Standradna devijacija:
0.0003714835		0.000581378
Aritmetička sredina:		Aritmetička sredina:
17.0004399		17.009634

Tablica 3. Promjer Ø17H8

Mjera Ø17H8-Kružnost		
Nikon Altera 15.7.6.		Tesa MicroHite 3D DCC
Mjerenje		
1	0.0016	0.0056
2	0.0014	0.0044
3	0.0012	0.0041
4	0.0013	0.0040
5	0.0014	0.0043
Standradna devijacija:		Standradna devijacija:
0.0001483239		0.0006457554
Aritmetička sredina:		Aritmetička sredina:
0.00138		0.00448

Tablica 4. Promjer Ø17H8-kružnost



Mjera Ø62h6		
Nikon Altera 15.7.6.		Tesa MicroHite 3D DCC
Mjerenje		
1	61.9888	61.9820
2	61.9889	61.9817
3	61.9894	61.9822
4	61.9896	61.9821
5	61.9898	61.9823
Standradna devijacija:		Standradna devijacija:
0.000435889		0.0002302173
Aritmetička sredina:		Aritmetička sredina:
61.9893		61.98206

Tablica 5. Promjer Ø62h6

Mjera Ø62h6-Kružnost		
Nikon Altera 15.7.6.		Tesa MicroHite 3D DCC
Mjerenje		
1	0.0005	0.0016
2	0.0007	0.0008
3	0.0011	0.0010
4	0.0003	0.0015
5	0.0004	0.0011
Standradna devijacija:		Standradna devijacija:
0.000316227766		0.000339165
Aritmetička sredina:		Aritmetička sredina:
0.0006		0.0012

Tablica 6. Promjer Ø62h6-kružnost

## 11. ZAKLJUČAK

Velika prednost trokoordinatnih mjernih uređaja je mogućnost automatskog ponavljanja mjerenja bez reprogramiranja nekog mjernog komada. S obzirom da smo mjerenje ponavljali 5 puta na svakom od mjernih instrumenata, ova činjenica nam je olakšala mjerenja, te smo zbog toga samo jednom trebali napraviti program za pojedini mjerni uređaj. Na oba mjerna instrumenta smo stavili isti mjerni komad, te ponavljali mjerenje 5 puta, s ciljem da dobijemo izračun standardne devijacije svakog stroja. Formula za izračun standardne devijacije je glavni faktor u ostvarivanju cilja završnog rada. Nakon što smo ponovili sva mjerenja, te rezultate uvrstili u formulu, ostvarili smo željeni cilj. Možemo zaključiti da je u velikoj većini mjerenja standardna devijacija znatno manja kod mjernog instrumenta Nikon Altera 15.7.6. u odnosu na mjerni instrument Tesa MicroHite 3D DCC. Prema tome ispada da je Nikon Altera 15.7.6. pouzdaniji mjerni instrument, što se tiče odstupanja u uzastopnim mjerenjima. Također, iz dobivenih rezultata mjerenja možemo zaključiti da Nikon Altera 15.7.6. ima bolju ponovljivost u odnosu na mjerni instrument Tesa MicroHite 3D DCC. Realno gledano, s obzirom da je Nikon Altera 15.7.6. moderniji i noviji mjerni instrument, očekivali smo da će se pokazati kao precizniji i pouzdaniji mjerni uređaj.

## LITERATURA

- [1] Runje, B.: Katedra za mjerenje i kontrolu, Predavanja iz Mjeriteljstvo, Zagreb, 2013. ([https://bib.irb.hr/datoteka/764202.Predavanja\\_MJERITELJSTVO.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/764202.Predavanja_MJERITELJSTVO.pdf)), pristupljeno: 8.9.2021.
- [2] Bureau International des Poids et Mesures, The international organization established by the Metre Convention, The home of the International System of Units (SI). (<https://www.bipm.org/en/home>), pristupljeno: 8.9.2021.
- [3] Zvizdić, D., Grgec Bermanec, L.: HMI – Znanstveno i/ili temeljno mjeriteljstvo, ([https://www.bib.irb.hr/625352/download/625352.HMI\\_za\\_HMD\\_clanak.pdf](https://www.bib.irb.hr/625352/download/625352.HMI_za_HMD_clanak.pdf)), pristupljeno: 8.9.2021.
- [4] Međunarodni sustav jedinica (SI), Međunarodni ured za utege i mjere, 8. izdanje 2006. godine. (<https://dzm.gov.hr/UserDocImages/Zakonsko%20mjeriteljstvo/Publikacije/medjunarodni-sustav-jedinica.pdf>), pristupljeno: 8.9.2021.
- [5] JCGM 200:2008 Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), Državni zavod za mjeriteljstvo.
- [6] Perić, Z.: Osnove strojarstva, Tolerancije i dosjedi, Veleučilište u Rijeci, Prometni odjel. 2012. ([https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/os\\_7\\_tolerancije.pdf](https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/os_7_tolerancije.pdf)), pristupljeno: 8.9.2021.
- [7] Svijet kvalitete, 2012. (<http://www.svijet-kvalitete.com/index.php/kvaliteta>), pristupljeno: 8.9.2021.
- [8] Kondić, Ž.: Statistička kontrola kvalitete, Varaždin, 2012.
- [9] Kunšt, A.: Off-line programiranje mjernog robota. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015. (<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:913202>), pristupljeno: 8.9.2021.
- [10] Roš, M.: Mjerenje dimenzija gotovog proizvoda pomoću trokoordinatnog mjernog uređaja. Završni rad, Sveučilište Sjever, 2018. (<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:208554>), pristupljeno: 8.9.2021.

[11] Gojmerac, M.: UTVRĐIVANJE MJERNIH POGREŠAKA TROKOORDINATNOG MJERNOG UREĐAJA. Specijalistički diplomski stručni, Veleučilište u Karlovcu, 2020. (<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:775924>), pristupljeno: 8.9.2021.

[12] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Me%C4%91unarodni\\_sustav\\_mjernih\\_jedinica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Me%C4%91unarodni_sustav_mjernih_jedinica)], pristupljeno 26.10.2021.

[13] tolerancija. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=61629> pristupljeno 24.10.2021.