

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Tjaša POLAJŽER

**PRIMERJAVA OPTIČNE BREZDOTIČNE METODE
MERJENJA DIMENZIJ INDUSTRIJSKIH
IZDELKOV NA 3D KOORDINATNEM MERILNEM
STROJU Z DOTIČNO METODO**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, september 2023

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**PRIMERJAVA OPTIČNE BREZDOTIČNE METODE
MERJENJA DIMENZIJ INDUSTRIJSKIH
IZDELKOV NA 3D KOORDINATNEM MERILNEM
STROJU Z DOTIČNO METODO**

Diplomsko delo

Študentka: Tjaša POLAJŽER
Študijski program: Tehnologija polimerov
Mentor: doc. dr. Matija HRIBERŠEK
Delovni mentor: Marko MODIC, univ. dipl. inž. Fiz.

Slovenj Gradec, september 2023

IZJAVA

Podpisana Polajžer Tjaša izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršne koli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Svojemu mentorju doc. dr. Matiji Hriberšku se zahvaljujem za strokovno pomoč in koristne napotke pri izdelavi diplomskega dela.

Iskrena zahvala univ. dipl. inž. fizike Marku Modicu za nesebično deljenje znanja ter neprecenljive učne izkušnje, ki ste mi jih omogočili. Vaše mentorstvo je obogatilo moje znanje in pomagalo oblikovati to delo. Zahvaljujem se tudi ostalim zaposlenim v podjetju Hexagon, ki so me sprejeli medse in mi omogočili izdelavo tega dela. Hvala za vso deljeno znanje in podporo.

Iskreno bi se zahvalila tudi svoji družini, zlasti mami in očetu, ki sta mi študij omogočila in me podpirala z neizmerno ljubeznijo skozi vse vzpone in padce. Prav tako bi se rada zahvalila Maticu za neprecenljivo moralno podporo, ljubezen in vso pomoč med študijem in izdelavo diplomskega dela.

POVZETEK

Primerjava optične brezdotične metode merjenja dimenzij industrijskih izdelkov na 3D koordinatnem merilnem stroju z dotično metodo

V diplomskem delu bomo analizirali in primerjali rezultate, ki jih bomo pridobili z dotično in brezdotično metodo merjenja na 3D koordinatnem merilnem stroju. Naš cilj je določiti prednosti in slabosti obeh metod in podati smernice za njihovo optimalno uporabo v aplikacijah. V prvem delu bomo predstavili teoretični uvod v 3D koordinatne merilne stroje ter osnovne principe dotičnega in brezdotičnega merjenja in njihove značilnosti. Nato bomo opisali eksperimentalne metode, ki jih bomo uporabili pri izvedbi meritev. Predstavili bomo postopek merjenja s pomočjo dotične metode, kjer se tipalo fizično dotika merjenca, ter postopek merjenja z brezdotično metodo, ki temelji na uporabi optičnih sistemov za zajem podatkov. Po zaključku meritev bomo analizirali pridobljene rezultate. Upoštevali bomo merilno negotovost, hitrost, zanesljivost in praktične uporabnosti obeh metod. Na podlagi primerjave rezultatov bomo izpostavili prednosti in slabosti obeh metod.

Ključne besede:

Metrologija, 3D koordinatni merilni stroj, dotična metoda merjenja, brezdotična metoda merjenja, dimenzijsko merjenje.

SUMMARY

Comparison of the non-contact optical method of measuring the dimensions of industrial products on a 3D coordinate measuring machine with the contact method

In this thesis, we will analyse and compare the results obtained from contact and non-contact measuring methods on a 3D coordinate measuring machine. Our goal is to determine the advantages and disadvantages of both methods and provide guidelines for their optimal application. The first part of thesis will present a theoretical introduction to 3D coordinate measuring machines and the basic principles of contact and non-contact measurement, including their characteristics. We will then describe the experimental methods that will be used for conducting the measurements. We will explain the process of measurement using contact method, where the probe physically touches the object being measured, as well as the process of measurement using the non-contact method, which relies on optical systems for data capture. After completing the measurements, we will analyse the obtained results, considering measurement uncertainty, speed, reliability and practical applicability of both methods. Based on the comparison of results, we will highlight the advantages and disadvantages of each method.

Keywords:

Metrology, 3D coordinate measuring machine, contact measuring method, non-contact measuring method, dimensional measurement.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Kratek opis dela	1
1.2	Cilji, hipoteze, omejitve	1
1.3	Metode dela	2
2	TEORETIČNI DEL	3
2.1	Metrologija	3
2.1.1	Mednarodni sistem enot	4
2.1.2	Sledljivost	4
2.1.3	Merilna negotovost	5
2.2	Koordinatni merilni stroj	6
2.2.1	Zgodovina	6
2.2.2	Zgradba koordinatnega merilnega stroja	7
2.2.3	Tipalni sistemi	8
2.2.4	Princip delovanja	8
2.3	Vrste koordinatnih merilnih strojev glede na zgradbo	9
2.3.1	Mostovni koordinatni merilni stroj	9
2.3.2	Koordinatni merilni stroj s fiksnim mostom	10
2.3.3	Konzolni koordinatni merilni stroji	10
2.3.4	Portalni koordinatni merilni stroji	11
2.4	Aplikacije	12
2.5	Dotične metode merjenja	12
2.6	Brezdotične metode merjenja	13
2.7	Strategija merjenja	13
3	EKSPERIMENTALNI DEL	17
3.1	Izdelek in merjene veličine	17
3.2	Merilni instrumenti	18
3.2.1	Hexagon Global S	18
3.3	Izvedba meritev	18
3.3.1	Dotična metoda	18
3.3.2	Optična brezdotična metoda	20
3.4	Postopek programiranja v programu PC-DMIS	21
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	23
4.1	Dotična metoda	23
4.2	Optična brezdotična metoda	24
4.3	Primerjava rezultatov	24
5	SKLEP	26
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	27
	SEZNAM SLIK	29
	SEZNAM TABEL	30
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	31

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	32
PRILOGE	33
Priloga 1: Postopek programiranja 3D koordinatnega merilnega stroja v programu PC-DMIS	33
Priloga 2: Izpis rezultatov dotične metode merjenja	39
Priloga 3: Izpis rezultatov brezdotične metode merjenja	40

1 UVOD

Metrologija, kot znanost o merjenju, ima ključno vlogo pri zagotavljanju enotnega razumevanja in uporabe merskih enot v industrijah po svetu. Področje metrologije obravnava definicije merskih enot, njihovo praktično uporabo ter sledljivost meritev.

V industriji se metrologija aktivno uporablja za zagotavljanje kakovosti, kalibracijo proizvodnih naprav in merjenje končnih izdelkov. Pred začetkom proizvodnje metrološki pripomočki omogočajo kalibracijo naprav in orodij, kar zagotavlja natančne dimenzije končnega izdelka. Metrologija je prav tako pomembna po koncu proizvodnje, saj omogoča nadzor in zagotavljanje predpisanih tolerančnih zahtev glede mer na končnem izdelku na podlagi predpisanega modela. Če dimenzije izdelka odstopajo od predpisanih, je potrebna optimizacija tehnološkega procesa izdelave, ki vključuje prilagoditev orodij, strojev in drugih elementov.

Ker je v industriji vedno bolj pomembno skrajševanje časa posameznih operacij, kakovost pa moramo ohraniti, se tudi v metrologiji pojavi vprašanje, ali lahko s hitrejšimi metodami zagotovimo enako natančnost meritev. V diplomskem delu želimo zato primerjati rezultate meritev, opravljene z dotično merilno metodo in optično merilno metodo, pri tem pa bomo primerjali natančnost meritev in čas, ki je potreben za izvedbo meritve.

1.1 Kratek opis dela

V diplomskem delu bomo podrobneje predstavili postopek meritev z dotično in brezdotično metodo dimenzijskega merjenja na 3D koordinatnem merilnem stroju. Merjenec bomo najprej izmerili z dotično metodo, pri tem bo potrebno napisati program za izvedbo meritve. Meritev bomo ponovili z optično brezdotično metodo na istem stroju in rezultate primerjali med sabo.

1.2 Cilji, hipoteze, omejitve

Glavni cilj diplomskega dela je ugotoviti, katera od dveh merilnih metod je v praksi bolj učinkovita glede na merilno negotovost meritev in čas, ki je potreben za vsako meritev. Sprotni cilji dela vključujejo izvedbo meritev z dotično in brezdotično metodo ter njihovo večkratno ponovitev za ugotavljanje primerljivosti, primerjanje merilne negotovosti meritev in čas meritev za posamezno metodo.

Predpostavljamo, da ima dotična metoda manjšo merilno negotovost kot brezdotična, saj z dotično metodo zajemamo točke, z brezdotično pa površine. Hkrati predpostavljamo, da je brezdotična metoda hitrejša od dotične, razen v primeru zelo majhnega števila točk.

Pri pripravi diplomskega dela bomo omejeni s časom, ki ga imamo na razpolago za delo na stroju.

1.3 Metode dela

Merjenec bomo merili v podjetju Hexagon s koordinatnim merilnim strojem Hexagon Global S 09 15 08. Meritve bomo izvedli z obema metodama in jih večkrat ponovili za primerljivost. Na kosu za učenje merjenja bomo merili ravnino, izvrtine in sferično obliko ter čas posameznih meritev. Meritve bomo primerjali glede na doseženo merilno negotovost in porabljen čas.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Metrologija

Metrologija je znanost, ki se ukvarja z merjenjem. Vključuje razumevanje in uporabo merskih enot ter je pomembna v industrijah po vsem svetu. V okviru metrologije se ukvarjamo z opredelitvijo merskih enot, njihovo praktično uporabo in sledljivostjo meritev [1].

Metrologija se lahko razdeli na tri skupine: zakonsko, znanstveno in tehnično oziroma industrijsko metrologijo. Zakonska metrologija zajema dejavnosti, ki izhajajo iz zakonskih zahtev in jih izvajajo pristojni organi. Te dejavnosti se nanašajo na meritve, merske enote, merilne instrumente in metode, ki so potrebne za zaščito zdravja, javne varnosti in okolja. Znanstvena oz. temeljna metrologija se osredotoča na organizacijo in razvoj standardov za meritve, vzpostavitev merskih enot in razvoj novih merilnih metod. Tehnična oz. industrijska metrologija pa se ukvarja z uporabo meritev v proizvodnih procesih, nadzorom kakovosti, zagotavljanjem ustreznosti merilnih instrumentov ter kalibracijo instrumentov [2,3].

Metrološka sledljivost je lastnost merilnega rezultata, ki nam omogoča povezavo tega rezultata z referenčnimi vrednostmi prej dokumentirane verige kalibracij. S sledljivostjo lahko primerjamo meritve ne glede na kraj ali čas izvajanja meritev [4].

Sledljivost dosežemo s postopkom kalibracije, ki vzpostavi povezavo med merilnim standardom, ki ima znano merilno negotovost, in napravo, ki jo preverjamo. Kalibracije so ključne za zagotavljanje sledljivosti in zanesljivosti meritev, saj nam omogočajo določitev natančnosti naprave in preverjanje, ali je ta skladna s standardi [3].

Metrološka infrastruktura je ključna za zagotavljanje zanesljivih meritev in vključuje številne elemente, kot so informacije, izobraževanje, raziskave, materialna sredstva in pripomočki za umerjanje. Ti elementi omogočajo reševanje merilnih problemov, saj nudijo znanje o tem, kaj meriti, kako meriti ter kako oceniti in predstaviti merilne rezultate. Metrološka infrastruktura obstaja v večini držav in se osredotoča na specifična področja, kot so strojništvo, varstvo okolja, diagnostika v medicini in zdravstvu. Metrološke infrastrukture morajo na globalni ravni delovati enotno in usklajeno. To je še posebej pomembno pri primerih, kot je proizvodnja letalskih komponent v različnih državah, kjer so natančne dimenzije in mehanske lastnosti ključne za sestavo končnega izdelka [5].

Sodelovanje med metrološkimi infrastrukturami omogoča izmenjavo znanja, izkušenj, metodologiji in primerov dobre prakse. To vodi k usklajenim merilnim standardom in postopkom ter zagotavlja medsebojno primerljive merilne rezultate [5].

2.1.1 Mednarodni sistem enot

Système International d'Unités oz. SI sistem enot, znan tudi kot mednarodni sistem enot, je bil uveden leta 1960. Ta sistem temelji na znanstveno utemeljenih osnovnih količinah, ki so opisane v tabeli 1. SI sistem je uveljavljen v skoraj vseh državah sveta, izjema so Liberija, Združene države Amerike in Mjanmar oz. Burma [5].

SI sistem sestavlja sedem osnovnih količin, to so dolžina, masa, čas, električni tok, temperatura, množina snovi in svetilnost. Poleg osnovnih enot se v SI sistemu uporabljajo tudi večji in manjši desetiški mnogokratniki osnovnih enot. Te mnogokratnike izražamo z dogovorjenimi predponami. Predpone omogočajo enostavno in sistematično izražanje vrednosti znanstvenih in tehničnih meritev [5].

Tabela 1: Osnovne fizikalne količine

Osnovna količina	Ime količine	Oznaka enote	Simbol
dolžina	meter	m	<i>l, s, d---</i>
masa	kilogram	kg	<i>m</i>
čas	sekunda	s	<i>t</i>
električni tok	amper	A	<i>I</i>
temperatura	kelvin	K	<i>T</i>
množina snovi	mol	mol	<i>n</i>
svetilnost	kandela	kandela	<i>I_v</i>

2.1.2 Sledljivost

Meroslovna sledljivost je ključna lastnost laboratorijskih meritev, saj omogoča primerljivost rezultatov med različnimi laboratoriji, različnimi časi ali različnimi analitskimi postopki za isti merjenec. Za zagotavljanje sledljivosti je pomembna validacija analitskih postopkov, ki vključuje preverjanje ustreznosti postopkov glede na zahteve naročnikov ali uporabnikov analiz. Ustrezno validirani postopki so tudi eden od ključnih pogojev za pridobitev in vzdrževanje akreditacije laboratorija. S sledenjem sledljivosti in uporabo validiranih postopkov laboratoriji zagotavljajo zanesljive rezultate meritev ter izpolnjujejo visoke standarde kakovosti in zahteve strank [6].

Sledljivost je lastnost meritvenega rezultata ali vrednosti etalona, ki omogoča povezavo z nacionalnimi ali mednarodnimi etaloni preko neprekinjene verige primerjav. Ta veriga primerjav ima opredmeteno negotovost. Nacionalni akreditacijski organ Republike Slovenije je izdal dokument, ki ureja zagotavljanje sledljivosti meritev. Vsebuje splošne zahteve za zagotavljanje sledljivosti. Po tem dokumentu mora imeti vsa oprema, ki se uporablja za kalibracije in preskuse, vključno z opremo za pomožne meritve, ki vplivajo na natančnost merilnega rezultata, zagotovljeno sledljivost. Organizacije, ki izvajajo meritve, morajo imeti vzpostavljeno politiko in postopke za kalibracijo ter preverjanje svoje opreme, vključno z referenčnimi materiali in referenčnimi etaloni [7,8].

2.1.3 Merilna negotovost

Merilna negotovost je vrednost, ki nam pove, kakšen razpon možnih vrednosti je povezan z meritvijo. Predstavlja kvantitativni dvom, ki se pojavlja pri izvedbi meritev. Pri merjenju se rezultat neizogibno spreminja glede na kakovost uporabljenega merilnega instrumenta, zato se pojavlja tudi določena merilna negotovost. Pomembno je razumeti, da merilne negotovosti ne smemo enačiti s točnostjo ali netočnostjo meritve, saj je točnost bolj kvalitativen pojem. Za določitev merilne negotovosti potrebujemo interval zaupanja, ki nam pove, kako širok razpon vrednosti odstopa od izmerjene vrednosti lahko pričakujemo, ter nivo zaupanja, ki izraža stopnjo prepričanja v to, da se dejanska vrednost nahaja znotraj tega pričakovanega intervala odstopanja. Merilne negotovosti tudi ne smemo zamenjati s pogreškom, saj je pogrešek razlika med pravo vrednostjo in izmerjeno vrednostjo, medtem ko je merilna negotovost kvantitativni izraz dvoma v merilni rezultat [9,10].

Razumevanje merilne negotovosti je ključno za doseg kakovostnih meritev in pravilno razumevanje rezultatov. Pomembno vlogo ima tudi pri:

- izvajanju kalibracij, kjer se merilna negotovost pripisuje rezultatu;
- meritvah v okviru preskušanja, kjer potrebujemo podatek o merilni negotovosti, da ugotovimo, ali izdelek izpolnjuje zahteve;
- meritvah, ki morajo biti znotraj predpisanih toleranc in
- razumevanju kalibracijskega certifikata ali specifikacij določenega merilnega instrumenta [10].

Ponavljanje meritev je izjemno pomembno. Z enim samim merjenjem lahko spregledamo morebitne napake, medtem ko je pri izvedbi treh ali več meritev lažje opaziti nenavadne rezultate, ki se razlikujejo od ostalih. Zbirka več meritev nam omogoča uporabo statističnih metod za odkrivanje dodatnih značilnosti našega merjenja. Ključna statistična parametra za meritve sta aritmetična srednja vrednost in standardni odklon. Običajno velja, da večje število meritev pripomore k temu, da se povprečje meritev bolj približa dejanski vrednosti. Vendar pa je treba upoštevati, da je lahko visoko število ponovitev meritev časovno zahtevno in ni vedno smiselno. V praksi se običajno izvaja med 4 in 15 meritev, kar je običajno dovolj za pridobitev zanesljivih rezultatov [10,11].

Obstaja več razlogov, zakaj pride do negotovosti in pogreškov pri meritvah. V praksi meritve niso izvedene v idealnih pogojih, kar lahko privede do negotovosti. Poleg tega obstajajo drugi viri negotovosti in pogreškov, kot so:

- merilni instrumenti so podvrženi različnim pogreškom zaradi staranja, obrabe, nenatančnih nastavitvev, težav pri odčitavanju, šumov, padcev in drugih težav;
- objekt, ki ga merimo oz. merjenec lahko sam po sebi predstavlja nestabilnost;
- sam proces merjenja je včasih zelo zahteven;
- negotovosti kalibriranih instrumentov, ki jih uporabljamo pri meritvah, se prištevajo k skupni negotovosti merjenja. Če uporabimo netočne instrumente, ne bomo mogli doseči natančnih meritev;

- usposobljenost osebe, ki izvaja meritev, je prav tako pomembna. Pri nekaterih meritvah je rezultat odvisen od subjektivnih odločitev izvajalca;
- pri procesu vzorčenja je pomembno, da niz meritev predstavlja resničen in reprezentativen vzorec merjene veličine;
- pogoji okolja, kot so zračni tlak, temperatura, vlažnost, vsebnost prašnih delcev in vibracije, prav tako vplivajo na merilne instrumente [10].

Če poznamo velikost in smer pogreška, ga lahko uporabimo kot popravek za izmerjeno vrednost. Popravek je aritmetično enak nasprotni vrednosti pogreška. Včasih lahko majhen popravek vključimo v merilno negotovost in predstavlja le del celotne merilne negotovosti izmerjene veličine [10].

Pri merjenju se lahko pojavijo vplivi, ki so bodisi naključni bodisi sistematični. Naključni vplivi se pojavijo, ko rezultat ponovljenih meritev ni enak. Večje število meritev nam omogoča, da se približamo pravi vrednosti prek aritmetične sredine. Sistematični vplivi se pojavijo, ko isti parameter vpliva na vsako izmerjeno vrednost na enak način. Povečanje števila meritev ne prinese nobenega izboljšanja v primeru sistematičnih vplivov [10,11].

2.2 Koordinatni merilni stroj

2.2.1 Zgodovina

Koordinatni merilni stroj je sodobna naprava, ki se uporablja za natančno merjenje geometrijskih lastnosti predmetov. Prva generacija koordinatnih merilnih strojev se je začela pojavljati leta 1950. Ti prvotni modeli so bili preprosti. Njihova uporaba je bila omejena na laboratorije in specializirane industrijske aplikacije. V 1960-ih in 1970-ih letih so se pojavile izboljšane različice koordinatnih merilnih strojev, ki so že uporabljale elektronske senzorje in digitalne metode merjenja. S tem so stroji postali bolj natančni, hitrejši in zanesljivejši. Pomemben mejnik v razvoju koordinatnih merilnih strojev je bila integracija računalniške tehnologije v 1980-ih letih. Računalniki so postali del merilnega sistema, kar je izboljšalo obdelavo podatkov, avtomatiziralo merilne postopke in izboljšalo uporabnost. V zadnjih desetletjih se tehnologija koordinatnih merilnih strojev še naprej razvija. Napredki na področju senzorjev, strojne opreme in programske opreme omogočajo še večjo natančnost, hitrost in zmogljivost. Danes so koordinatni merilni stroji nepogrešljivo orodje v industriji, znanosti, inženiringu in drugih področjih, kjer je pomembno natančno merjenje predmetov. Na sliki 1 je prikazan koordinatni merilni stroj iz leta 1966 [12].



Slika 1: Koordinatni merilni stroj, 1966 [12]

2.2.2 Zgradba koordinatnega merilnega stroja

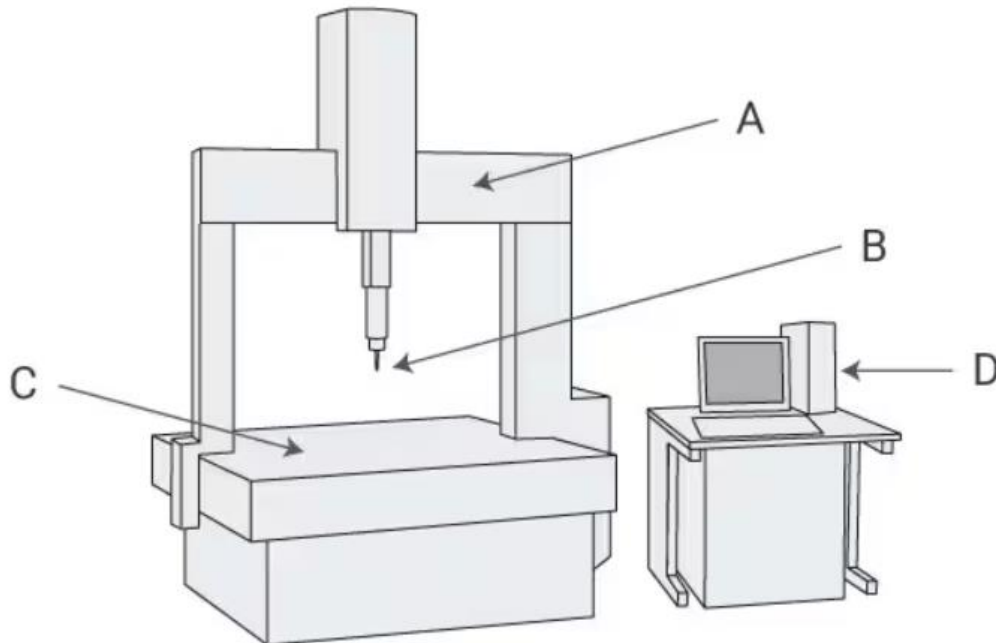
Poznamo več vrst koordinatnih merilnih strojev, ki jih bomo opisali v nadaljevanju. Vsem vrstam so skupne štiri glavne komponente stroja, ki so prikazane na sliki 2:

- Osnovna konstrukcija in merilna miza: miza je običajno izdelana iz granitnega kamna in zagotavlja stabilno površino. Pri večjih strojih se lahko konstrukcija vgradi neposredno v tla. Konstrukcija in miza morata biti trdni in togi, da se prepreči neželjeno premikanje med meritvami ter prenos vibracij na okolico.
- Tipalni sistem: gre za sklop senzorjev, ki se uporabljajo za zaznavanje in merjenje točk na površini. Tipalni sistem lahko vključuje mehanska, optična ali laserska tipala, odvisno od potreb merjenja. Namen tipalnega sistema je zajemanje podatkov o geometriji merjenca, ki se nato uporabijo za analizo in izračun dimenzij.
- Krmilnik: krmilnik je osrednja enota, ki nadzoruje gibanje in delovanje stroja. Prejema ukaze iz programske opreme in usmerja premike stroja in tipalnega sistema v zelenih smereh. Krmilnik je odgovoren za natančno pozicioniranje in premikanje tipala ter usklajevanje vseh delov stroja.
- Programska oprema: je oprema, ki upravlja zbiranje, obdelavo in analizo podatkov meritev. Metrološka programska oprema omogoča izvajanje različnih merilnih operacij, kot so poravnava, merjenje dimenzij, analiza oblike, statistična obdelava podatkov in generiranje poročil o meritvah.

S temi štirimi komponentami koordinatni merilni stroj omogoča zanesljivo in natančno merjene geometrije objektov ter izpolnjuje potrebe v industriji, kar je ključno za kakovost in natančnost merjenja [13].

Na sliki so prikazane komponente stroja, kjer je:

- A – osnovna konstrukcija
- B – tipalni sistem
- C – miza
- D – računalnik s programsko opremo in krmilnikom



Slika 2: Zgradba 3D koordinatnega merilnega stroja [13]

2.2.3 Tipalni sistemi

Poznamo tri glavne vrste tipal, ki se uporabljajo na koordinatnih merilnih strojih:

- Kontaktna tipala: kontaktna tipala so v obliki kroglice ali diska in pridejo v stik s predmetom, ki ga merimo.
- Brezkontaktna tipala: brezkontaktna tipala merijo geometrijo predmeta brez potrebe po neposrednem stiku. Zasnovana so predvsem za merjenje krhkih, mehkih predmetov ali predmetov, ki se enostavno poškodujejo.
- Kombinirana oz. večsenzorska tipala: večsenzorski koordinatni merilni stroji uporabljajo več kot eno tipalo in kombinirajo tako kontaktna kot brezkontaktna tipala. Takšni sistemi se najpogosteje uporabljajo pri merjenju predmetov, ki lahko pridejo v stik s tipali, vendar imajo specifične komponente, ki zahtevajo uporabo skenerja ali brezkontaktnega tipala.

2.2.4 Princip delovanja

Koordinatni merilni stroj je naprava, ki zaznava točke na površini fizičnih predmetov s pomočjo tipala in meri njihovo geometrijo. Omogoča natančno in zanesljivo določanje geometrije predmetov ter preverjanje skladnosti s predpisanimi specifikacijami.

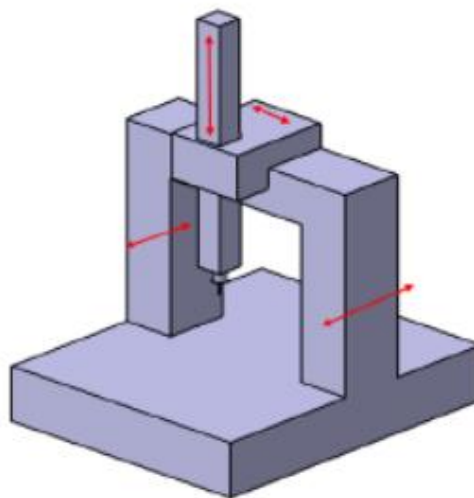
Koordinatni merilni stroj deluje na principu premikanja tipala po površini predmeta in zaznavanja točk. Tipalo je pritrjeno na tipalno glavo, ki je pritrjena na pinolo. Na koordinatnih merilnih strojih se uporabljajo različne vrste tipal, to so mehanska, optična, laserska ali skenerji na belo svetlobo. Položaj tipala se lahko ročno ali računalniško nadzoruje, odvisno od stroja. Koordinatni merilni stroji določajo položaj tipala glede na referenčno točko v tridimenzionalnem koordinatnem sistemu. Poleg premikanja tipala po oseh x, y in z, omogočajo nekateri stroji tudi nadzor nad kotom tipala, kar omogoča merjenje težko dostopnih površin. Tipičen tridimenzionalni koordinatni merilni stroj omogoča premikanje tipala vzdolž osi x, y in z, ki so pravokotne druga na drugo. Vsaka os je opremljena s senzorjem, ki z natančnostjo mikrometra spremlja položaj tipala na posamezni osi. Ko tipalo zazna določeno mesto na predmetu, stroj zabeleži položaj s pomočjo teh senzorjev. Postopek se ponavlja, pri čemer se tipalo premika, da dobimo "oblak točk". Dimenzijske meritve se izvajajo z ustvarjanjem geometrij na podlagi pridobljenih točk. Meritve lahko izvajamo s pomočjo CAD modela. Če meritve načrtujemo s pomočjo CAD modela, je mogoče postopek meritev avtomatizirati [14,15].

2.3 Vrste koordinatnih merilnih strojev glede na zgradbo

2.3.1 Mostovni koordinatni merilni stroj

Mostovni koordinatni merilni stroj je najpogosteje uporabljena vrsta koordinatnih merilnih strojev, ki se uporablja v laboratorijih in industriji. Imajo visoko natančnost merjenja, relativno visoko hitrost meritev in sposobnost merjenja delov različnih oblik in velikosti.

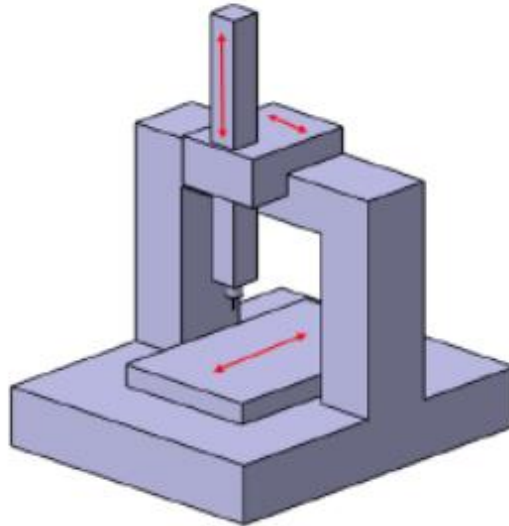
Sestavljeni so iz dveh stebrov, ki se premikata skupaj v eni smeri. Preostali osi izvirata iz premikanja mostu, s katerim sta stebra povezana, in njegove vertikalne osi (z) [12].



Slika 3: Mostovni koordinatni merilni stroj [13]

2.3.2 Koordinatni merilni stroj s fiksnim mostom

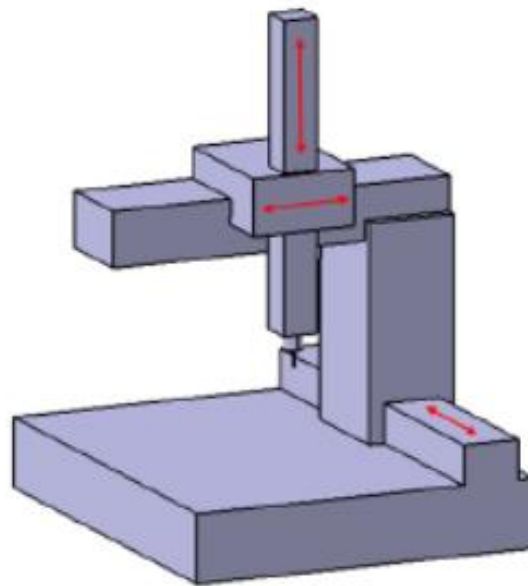
Ta vrsta koordinatnih merilnih strojev ima dva fiksna stebra in most, miza pa omogoča enoosno gibanje. Preostali dve osi izvirata iz gibanja mostu in njegove vertikalne osi. Princip delovanja je torej enak kot pri mostovnih koordinatnih strojih, vendar se namesto mostu premika miza [12].



Slika 4: Koordinatni merilni stroj s fiksnim mostom [13]

2.3.3 Konzolni koordinatni merilni stroji

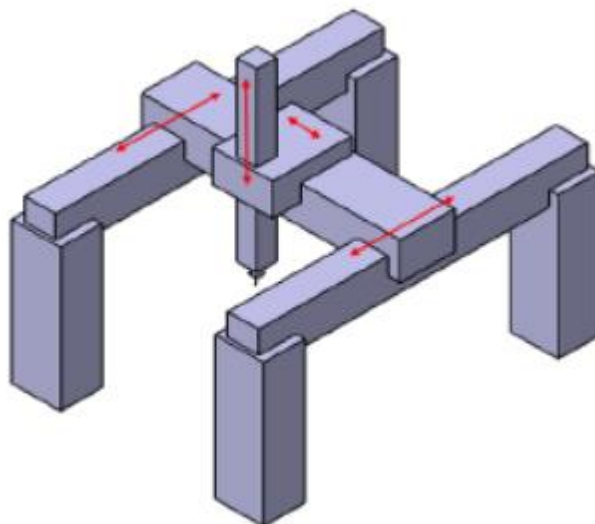
Konzolni koordinatni merilni stroji se pogosto uporabljajo v avtomobilski industriji, saj omogočajo meritve karoserije sestavljenih avtomobilov. Imajo dolgo horizontalno merilno roko, ki omogoča dostop do površine velikih komponent z votlinami. V primerjavi z drugimi vrstami koordinatnih merilnih strojev imajo nizko natančnost. Na konzolni roki lahko zaradi gravitacijske sile prihaja do uklonov pri bolj oddaljenih položajih. Ta uklon prispeva k merilnim napakam in povečuje merilno negotovost [12].



Slika 5: Konzolni koordinatni merilni stroj [13]

2.3.4 Portalni koordinatni merilni stroji

Portalni koordinatni merilni stroji so stroji z največjim merilnim volumnom. Pogosto se uporabljajo za merjenje delov, večjih od 10 m. Zaradi svoje velikosti ima v primerjavi z drugimi vrstami koordinatnih merilnih strojev nižjo natančnost. Sestavljen je iz štirih fiksnih stebrov, ki so med sabo povezani v parih, med njimi pa se premika most z merilno glavo, ki omogoča gibanje v vseh treh smereh [12].



Slika 6: Portalni koordinatni merilni stroj [13]

2.4 Aplikacije

Koordinatne merilne stroje uporabljamo v avtomobilski industriji, strojogradnji, vesoljski industriji ter mnogih drugih. Uporabni so pri razvoju novih izdelkov, pregledovanju delov in določanju dimenzijske natančnosti komponent. Omogočajo preverjanje oblike, položaja in dimenzij elementov na izdelku ali izdelka samega.

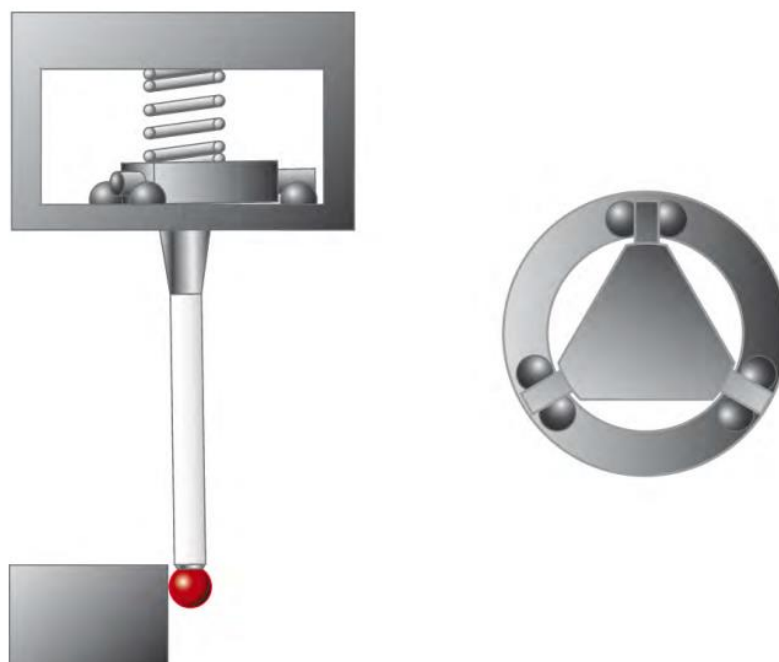
2.5 Dotične metode merjenja

Dotične merilne naprave predstavljajo večino tradicionalno uporabljenih naprav za dimenzijsko merjenje. To so naprave, ki morajo priti v fizični kontakt z merjencem. Tipična orodja za dotično merjenje so koordinatni merilni stroj, kljunasta merila, mikrometri, merilni bloki itd., osredotočili pa se bomo na koordinatni merilni stroj, saj smo tega uporabili pri izvajanju eksperimentalnega dela.

Na koordinatnem merilnem stroju lahko izbiramo med dvema splošnima načinoma delovanja – točkovnim načinom ali skeniranjem. Skeniranje pomeni, da krogično tipalo drsi po površini merjenca in neprekinjeno zbira točke. Prednost tega je, da zbere relativno veliko število točk, vendar obstaja možnost večje merilne negotovosti kot pri meritvah posameznih točk [16].

“Touch-Trigger” tipala

Mehanizem tipala na dotik vključuje tri valje, ki so pritisnjeni k parom kroglic, kot je prikazano na sliki 7. Mehanizem omogoča, da se tipalo vrne v isti položaj po tem, ko je bilo premaknjeno. Električni krog je vzpostavljen preko kontaktov, tako da se generira signal vsakič, ko je tipalo odklonjeno v katero koli smer. Ob stiku se signal pošlje v računalnik, ki zabeleži položaj stroja.



Slika 7: Shematični prikaz mehanizma "touch-trigger" tipala [13]

Analogna tipala

Kadar je potrebna visoka natančnost, se pogosto uporabljajo analogna tipala. Gibanje tipala v vsaki smeri zazna induktivni merilni sistem. Tri vzmeti so pritrjene v nevtralnem položaju, pri tem je ničelni položaj merilnih sistemov nastavljen na ta položaj. Glavna razlika med analognimi in "touch-trigger" tipali je v tem, da se merjenje z analognim tipalom izvaja statično, kar pripomore k zmanjšanju merilne negotovosti.

2.6 Brezdotične metode merjenja

V zadnjih letih je bilo veliko pozornosti namenjene razvoju brezkontaktnih senzorjev. Ti senzori so danes zmožni zbirati ogromno podatkov v kratkem času, kar v kombinaciji z zmogljivimi računalniki omogoča hitro analizo velike količine podatkov. Ta napredek v senzorski tehnologiji je še posebej koristen na področju optične metrologije. Optična metrologija izkorišča svetlobo kot nosilca informacij za natančno merjenje geometrijskih lastnosti objektov, kot so razdalja, premiki, oblika, hrapavost itd. Brezkontaktni senzori omogočajo zbiranje podatkov brez fizičnega stika s predmetov, kar preprečuje morebitne poškodbe ali spremembe merjenih lastnosti [16,17].

Primer brezkontaktnega tipala je laserski skener, ki oddaja usmerjeno svetlobo na merjenec. Ko usmerjen žarek doseže površino merjenca, pride do odboja, ki ga nato zazna senzor in nastane točkovna slika. Ker laserski skener ne povzroča površinskih deformacij na merjencu, je tipično uporabljen pri merjenju sedežev in armaturnih plošč, glinenih modelov in modelov za hitro prototipiranje [16].

Nekateri brezkontaktni senzori uporabljajo strukturirano svetlobo. Ko svetlobo presekamo z nekim predmetom, se svetloba oblikuje vzdolž konture tega predmeta. Obliko zazna senzor, ki jo pretvori v merljivo digitalno sliko, iz katere je mogoče izračunati koordinate točk [16].

Pri uporabi brezkontaktnih metod merjenja je nekaj stvari, na katere moramo biti pozorni. Dejavniki, ki lahko vplivajo na meritev, so barva merjenca, odbojnost površine in tekstura površine. Sistem lahko zajame napačne točke zaradi motečih odbojev, ki jih je kasneje treba filtrirati.

2.7 Strategija merjenja

Pred začetkom merjenja je potrebno določiti postopek merjenja za izbran merjenec. Treba je upoštevati, da je delovno območje stroja primerne velikosti. Tipalo mora imeti dostop do vseh značilnosti, ki jih je potrebno izmeriti [16].

Splošno strategijo merjenja lahko razdelimo na več korakov, ki jih upoštevamo:

- izbor značilnosti oz. funkcionalnosti na merjenem kosu, ki jih je treba izmeriti;

- določitev osnovnih značilnosti merjenca, ki se bodo uporabljale znotraj koordinatnega sistema;
- izbor postavitve in usmerjenosti merjenca;
- izbor metode pritrditve merjenca;
- izbor primerne merilne sonde in tipala;
- določitev strategije zajemanja podatkov;
- programiranje koordinatnega merilnega stroja in zbiranje podatkov [16].

Izbor značilnosti

Običajno nam proizvodne in funkcionalne zahteve izdelka določijo, katere značilnosti izdelka je potrebno izmeriti. Včasih merjenec lahko vsebuje značilnosti, ki jih je težko izmeriti zaradi dostopa, lahko so nepraktične za merjenje ali pa bi jih bilo stroškovno bolj učinkovito izmeriti na drug način. Treba je upoštevati tudi minimalno število točk, ki jih bomo potrebovali za določitev koordinatnega sistema [16].

Postavitev, usmerjenost in pritrditev izdelka

Ko so določeni elementi merjenca, ki jih je potrebno izmeriti, moramo izbrati postavitev in orientacijo merjenca v merilnem območju stroja. Najpomembneje je zagotoviti dostopnost površin in lastnosti, ki so pomembne pri merjenju. Pomembno je premisliti, kako bomo merjenec vpeli na stroj. Če je možno, uporabimo le eno vpetje, ki omogoča merjenje vseh potrebnih značilnosti merjenca. Če se uporabi več kot eno vpetje, obstaja možnost človeške napake, ki lahko vpliva na točnost rezultatov [16].

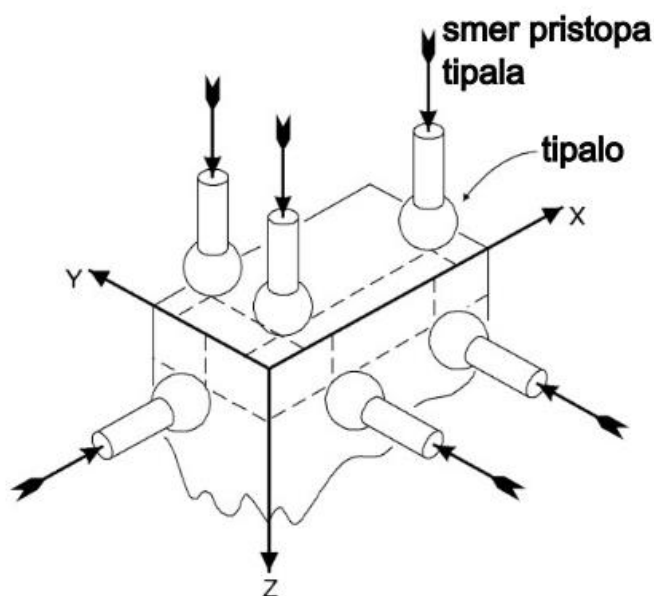
Pri meritvah je pomembno upoštevati vpliv sile dotika pri izbiri metode pritrditve merjenca. Koordinatni merilni stroji delujejo pri zelo nizkih silah dotika, običajno v območju od 0,05 N do 0,2 N. Vendar je treba upoštevati, da lahko koordinatni merilni stroj med postopkom merjenja povzroči silo do 3 N, temu primerno mora biti tudi vpetje merjenca [16].

Če je merjenec dovolj težak, ga je mogoče stabilno namestiti na mizo stroja brez uporabe dodatnih pritrdilnih naprav. Za majhne, lahke dele, uporabljamo kot pritrdilni material plastelin, modelirne mase ali vosek, vendar je potrebno poskrbeti, da ti materiali ne ovirajo meritve. Druge metode pritrditve vključujejo magnetna ali vakuumna držala. Program za merjenje je potrebno napisati tako, da se tipalo izogne trčenju s pritrdilnimi napravami [16].

Definiranje koordinatnega sistema

Pri merjenju poznamo dva koordinatna sistema. Prvi je koordinatni sistem stroja, kjer se osi x, y in z navezujejo na gibanje stroja. Drugi je koordinatni sistem merjenca, kjer se osi navezujejo na značilnosti merjenca. Preden so se pri merjenju začeli uporabljati računalniki, je moral biti merjenec vpet popolnoma vzporedno s posameznimi osmi koordinatnega sistema stroja. Tak način ni časovno učinkovit in natančen [16].

Pri definiranju koordinatnega sistema merjenca moramo določiti referenčno površino, ravnino, črto ali točko, ki se uporablja za lažje določanje značilnosti na merjencu. Značilnosti lahko določimo na podlagi tehnične risbe ali CAD modela merjenca. Pri merjenju je pomembno, da je mogoče ustvariti koordinatni sistem, povezan z merjencem. Velja, da ima telo, ki se lahko prosto premika v prostoru, šest prostostnih stopenj, zato je za določitev koordinatnega sistema potrebnih šest točk na merjencu. Na sliki 8 so prikazane točke, ki jih potrebujemo za določitev koordinatnega sistema. Za določitev ravnine XY so potrebne tri točke, za določitev premice na ravnini XZ dve točki in ena točka za ravnino YZ. Ravnine morajo biti ustvarjene tako, da so medsebojno pravokotne in je njihovo presečišče izhodišče koordinatnega sistema [16].



Slika 8: Šest točk, potrebnih za določitev koordinatnega sistema merjenca [16]

Strategije zbiranja podatkov

Elementi, ki jih merimo, so po navadi kombinacija standardnih geometrijskih oblik, kot so ravnine, krogi, premice, sfere. Za meritve obstaja matematično določeno minimalno število točk, ki jih potrebujemo za določeno geometrijsko obliko. Tabela 2 prikazuje potrebno število točk za vsako obliko. V praksi po navadi uporabimo večje število točk od priporočenega minimuma. Na primer dve točki določata premico, tri točke pa določajo krog, vendar uporaba treh točk pri merjenju kroga ne poda informacije o krožnosti. Ni potrebno, da so točke enakomerno razporejene po površini, vendar je priporočljivo, da se doseže enakomerna pokritost [16].

Tabela 2: Število potrebnih točk

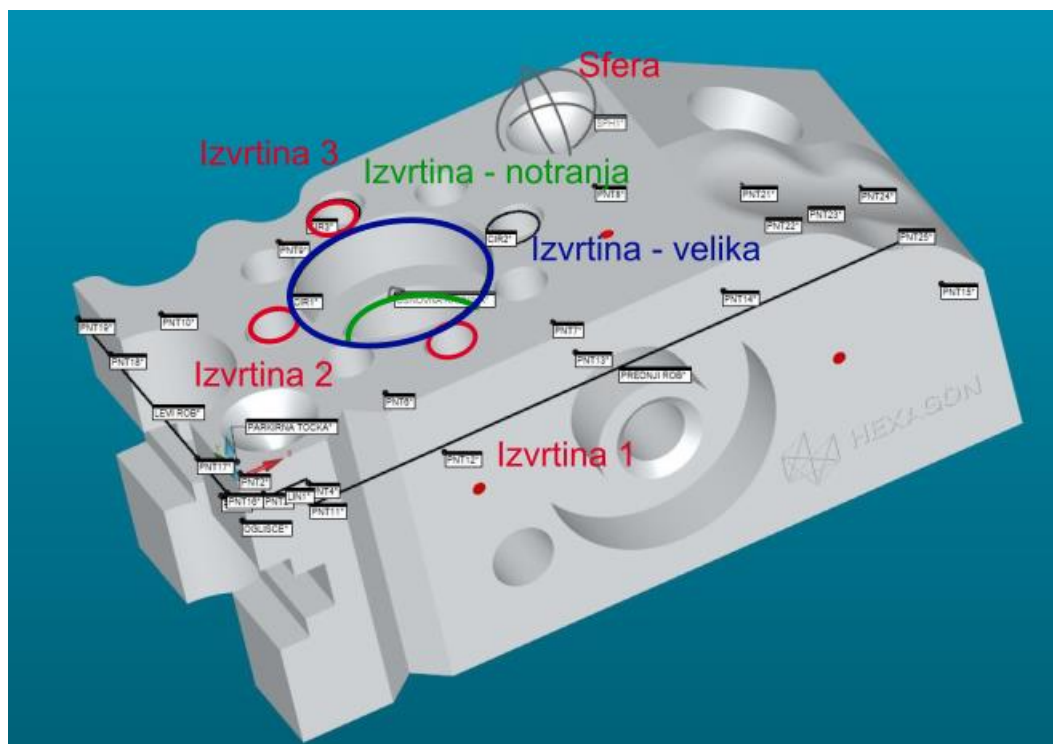
Oblika	Matematično določen minimum	Priporočen minimum
Premica	2	5

Ravnina	3	9
Krog	3	7
Sfera	4	9
Stožec	6	12–15
Elipsa	7	12
Cilinder	5	12–15
Kocka	6	18

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Izdelek in merjene veličine

Merili smo demo merilni kos, ki je namenjen učenju uporabe merilnih naprav. CAD model merjenca je prikazan na sliki 9. Obravnavali smo premere izvrtin, sferično obliko in ravnino.



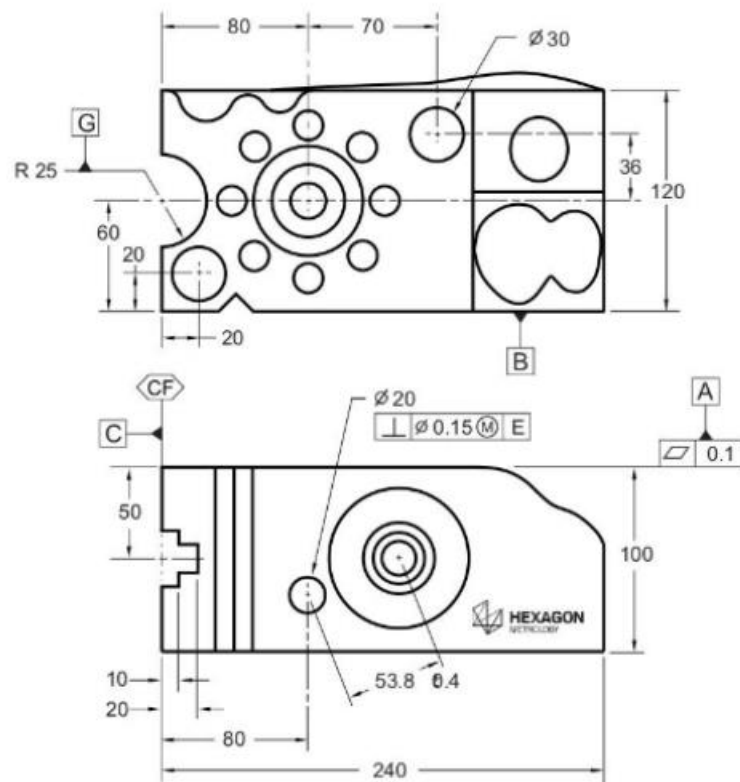
Slika 9: CAD model merjenca

V tabeli 3 so prikazane nominalne vrednosti mer in tolerance:

Tabela 3: Nominalne vrednosti mer s tolerancami

Element	Nominalna vrednost [mm]	Toleranca [mm]
Izprtina 1	16	$\pm 0,05$
Izprtina 2	16	$\pm 0,05$
Izprtina 3	16	$\pm 0,05$
Izprtina – velika	60	$\pm 0,05$
Izprtina – notranja	40	$\pm 0,05$
Sfera	32	$\pm 0,05$

Na sliki 10 je prikazana tehniška risba merjenca z merami za lažjo predstavbo o velikosti izdelka.



Slika 10: Tehniška risba merjenca

3.2 Merilni instrumenti

3.2.1 Hexagon Global S

Za merjenje smo uporabili 3D koordinatni merilni stroj Hexagon Global S 09.15.08, ki ima merilno območje 900 x 1500 x 800 mm³.

3.3 Izvedba meritev

3.3.1 Dotična metoda

Pred začetkom meritve je potrebno določiti dobro strategijo merjenja, pripraviti merjenec in merilni stroj. Določili smo orientacijo merjenega kosa in presodili, da ne potrebuje dodatnega vpenjanja zaradi lastne teže. Sledil je zagon stroja.

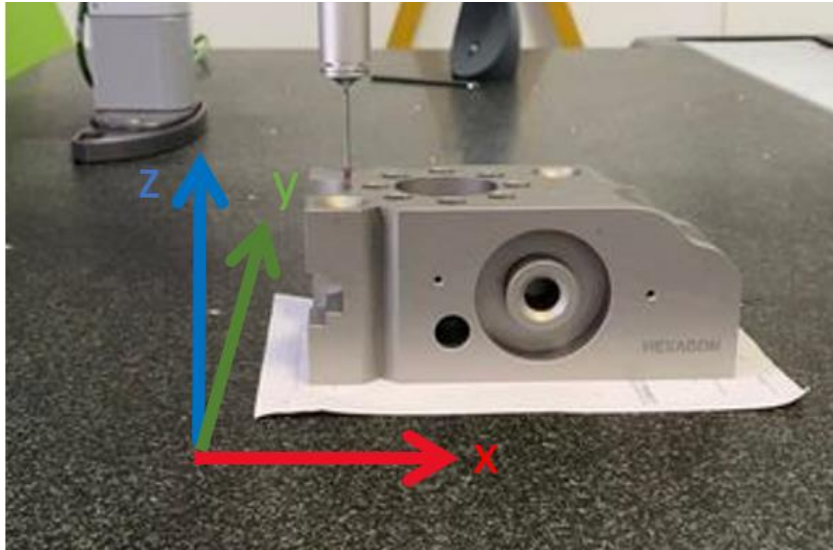
1. Na koordinatnem merilnem stroju moramo zagotoviti dotok komprimiranega zraka, zato vklopimo kompresor in filter ter preverimo ali zrak dejansko doseže stroj. Ko na manometru preverimo dovod zraka in zagotovimo, da tlak doseže vsaj 4,2 bara, lahko s krmilnikom vklopimo stroj. Hkrati na računalniku zaženemo programsko opremo PC-DMIS. Ko je vzpostavljena povezava med računalnikom in merilnim strojem ter so prižgani vsi motorji stroja, se stroj s tipalom pomakne v izhodišče svojega koordinatnega sistema.

2. V programu PC-DMIS smo odprli novo datoteko, jo poimenovali in določili tipalo, ki ga uporabljamo. V našem primeru smo uporabili tipalo, ki je prikazano na sliki 11 – dolžine 50 mm in s premerom kroglice 5 mm.



Slika 11: Uporabljeno tipalo in merilna sonda

3. Izbrano tipalo je za natančno meritev potrebno kalibrirati. Za kalibracijo tipala smo uporabili kalibracijsko kroglico, ki ima znan točno določen premer. PC-DMIS omogoča funkcijo kalibracije, kjer vnesemo podatek o premeru kroglice in tipalo ročno pomaknemo do kroglice. Nato določimo eno točko na vrhu kroglice in tri točke na ekvatorju. S temi točkami podamo programu dovolj podatkov, da ve, kje se kroglica nahaja in jo izmeri v CNC načinu merjenja. Dobljene rezultate program primerja z vnesenimi podatki in na ta način kalibrira tipalo.
4. Po kalibraciji tipala smo lahko začeli s pripravo merjenja. Na sliki 12 je prikazana postavitev merjenega kosa glede na osi koordinatnega sistema merilnega stroja. Kosa ni bilo potrebno dodatno vpenjati zaradi njegove teže.



Slika 12: Postavitev merjenega kosa s koordinatnim sistemom merilnega stroja

5. Ker nam je bil na razpolago CAD model merjenca, smo tega uvozili v odprt program. Sledi programiranje stroja za meritev. Podroben postopek programiranja je opisan v prilogi 1.

3.3.2 Optična brezdotočna metoda

Pri izvajanju brezdotočnega merjenja oz. skeniranja smo uporabili enako postavitev merjenca kot pri dotični metodi. Zagon stroja in programske opreme poteka enako kot pri dotični metodi. Razlika se pojavi pri izbiri tipala, kjer smo za brezdotočno metodo izbrali skener Hexagon HP-L-5.8, ki je prikazan na sliki 13. Kot koordinatni sistem merjenca smo v tem primeru uporabili predhodno določen koordinatni sistem na CAD modelu. V programu smo določili pot, po kateri se skener premika in širino, po kateri zajema točke. Skener se nato premika nad merjencem in zajema podatke o površini. Optični senzorji zaznavajo odboj svetlobe laserskih žarkov, ki so projicirani na površino merjenca. S tem zajamejo tridimenzionalne koordinate točk na površini. Zajete podatke smo lahko obdelali s programsko opremo in tako rekonstruirali tridimenzionalni model merjenca. Določili smo podatke, ki nas zanimajo in izpis rezultatov. Rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 13: Skener Hexagon HP-L-5.8 [13]

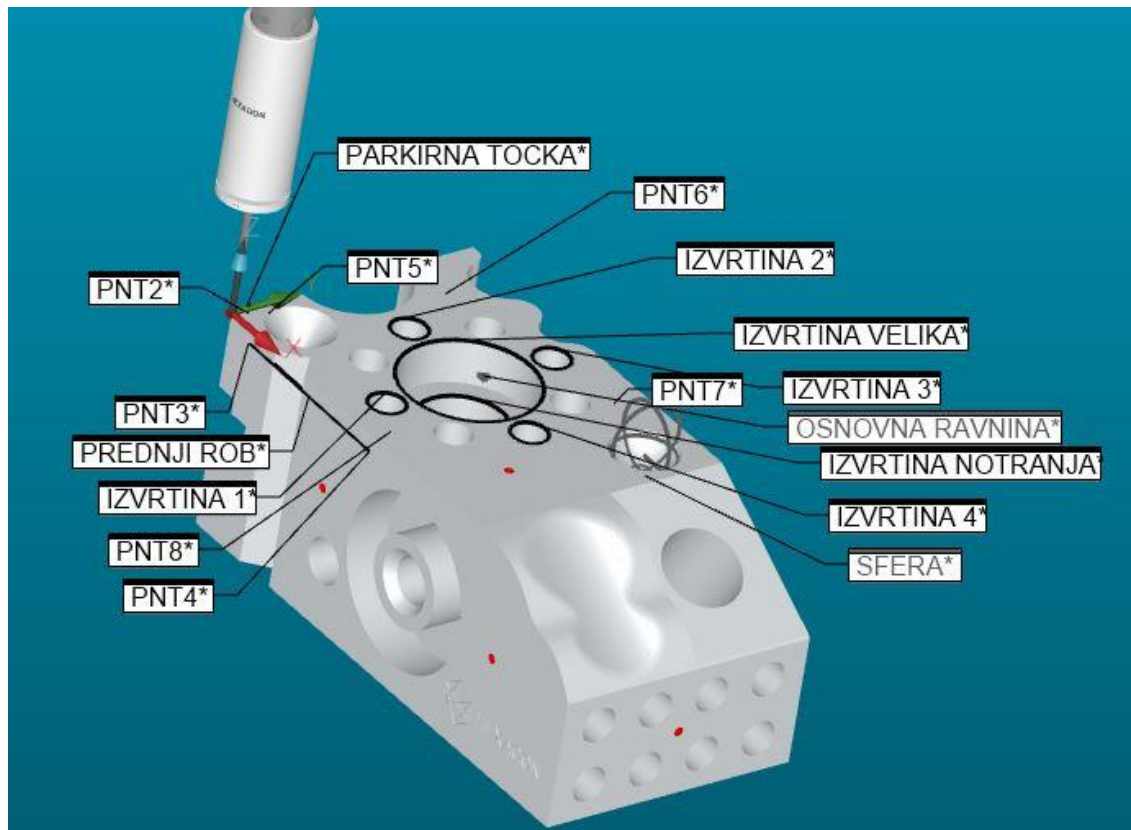
3.4 Postopek programiranja v programu PC-DMIS

- V nadaljevanju je opisan postopek programiranja stroja za dotično meritev v programu PC-DMIS. Postopek je tudi prikazan v prilogi 1.
- Program odpremo, ga poimenujemo, določimo tipalo in izvedemo kalibracijo ter začnemo s pisanjem programa. V začetku smo dodali komentar »Parkiraj tipalo nad sprednje levo oglišče«. Komentar se prikaže na zaslonu vsakič, ko zaženemo program in s tem omogočimo, da lahko kateri koli operater izvede meritev, saj ve, kako meritev začeti.
- Parkirna točka: Določili smo parkirno točko, ki je bila v našem primeru nad sprednjim levim ogliščem. Parkirna točka je delovala kot začetna točka meritve. Določili smo teoretične vrednosti parkirne točke, če je koordinatno izhodišče merjenca v zgornjem levem oglišču. Teoretične vrednosti za x, y in z so bile (3, 3, 5). Določevanje parkirne točke smo končali s funkcijo »MODE/DCC«, kot je razvidno na sliki 16. S to funkcijo omogočimo računalniško voden meritev. Na ta način lahko v prihodnosti opravljamo meritve tako, da tipalo ročno pomaknemo v parkirno točko in jo potrdimo, stroj pa meritev nadaljuje z računalniškim vodenjem in ne potrebuje operaterja. Takšen način merjenja zagotavlja tudi večjo ponovljivost meritev.
- A1: Z uporabo funkcije alignment oz. poravnava smo določili približno izhodišče koordinatnega sistema merjenega kosa. To smo storili tako, da smo koordinatno izhodišče pomaknili v absolutne koordinate parkirne točke, torej (-3, -3, -5).
- PNT2: Določili smo prvo točko na merjencu (označena je s številko 2, saj se kot prva šteje parkirna točka). Točko smo določili s pomikom tipala navzdol po osi z, na zgornji ravnini merjenca. Na sliki 16 je razvidno, da smo na koncu dela PNT2 določili varnostno ravnino. Zapis »CLEARP/ZPLUS,10,ZPLUS,0,ON« nam pove, da smo določili varnostno ravnino (clearance plane) glede na točko v smeri z, v velikosti 10 mm. V nadaljevanju programa se večkrat pojavi zapis

- »MOVE/CLEARPLANE«, kar pomeni, da se bo tipalo premaknilo na to ravnino po posameznem premiku.
- A2: Z drugo poravnavo smo premaknili izhodišče osi z v PNT2 in s tem poravnali os z z zgornjo površino merjenca.
 - PNT3 in PNT4: Točki 3 in 4 smo določili vzdolž prednjega roba merjenca.
 - Prednji rob: Iz točk 3 in 4 smo konstruirali premico in jo poimenovali »Prednji rob«.
 - A3: Pri tretji poravnavi smo uporabili prej konstruirano premico »Prednji rob«. Določili smo rotacijo koordinatnega sistema in izhodišče osi y. Rotacijo smo določili na način, da os x poteka v smeri od točke 3 proti točki 4 in ne v obratni smeri.
 - PNT5: Določili smo še eno točko na levi strani merjenca.
 - A4: S četrto poravnavo smo s pomočjo točke 5 določili še izhodišče za os x.
 - PNT6, PNT7 in PNT8: Določili smo še tri naključno razporejene točke na zgornji ravnini merjenca.
 - Osnovna ravnina: Iz točk 6, 7 in 8 smo konstruirali ravnino in jo poimenovali »Osnovna ravnina«.
 - KS: Izvedli smo še eno poravnavo, in sicer smo izhodišče osi z poravnali z Osnovno ravnino. Tako smo dobili dejanski koordinatni sistem merjenca, saj nam 3 točke oz. ravnina omogočijo bolj natančno določitev izhodišča kot 1 točka, kot smo to naredili na začetku programa.
 - Izvrtine: S pomočjo programa, ki lahko zaznava določene konture in oblike na CAD modelu, smo izbrali izvrtine, katerih premeri so nas zanimali.
 - Na koncu smo v programu določili še rezultate, ki so nas zanimali, tolerance in način izpisa rezultatov.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Na sliki 14 je prikazan CAD model merjenega kosa z označenimi elementi.



Slika 14: CAD model merjenca z označenimi elementi

4.1 Dotična metoda

V tabeli 3 so podani merilni rezultati, ki smo jih dobili z dotično metodo merjenja dimenzij. Pod izmerjenimi vrednostmi je prikazano povprečje desetih ponovitev meritev, primer izpisa rezultatov je prikazan v prilogi 2. Mera za izvrtino 1 iz tolerančnega polja odstopa za +0,001 mm, za izvrtino 3 za +0,007 mm, za veliko izvrtino 0,016 mm in za notranjo izvrtino za 0,013 mm. V tem primeru je posamezna meritev trajala okoli 2 minuti in pol.

Tabela 4: Rezultati dotične metode merjenja

Pozicija	Merjena vrednost	Nominalna mera [mm]	Zgornje dovoljeno odstopanje [mm]	Zgornje dovoljeno odstopanje [mm]	Izmerjena vrednost
Izvertina 1	D	16	+0,05	-0,05	16,051
Izvertina 2	D	16	+0,05	-0,05	16,046
Izvertina 3	D	16	+0,05	-0,05	16,057
Izvertina velika	D	60	+0,05	-0,05	60,066
Izvertina notranja	D	40	+0,05	-0,05	40,063
Sfera	D	32	+0,05	-0,05	32,015
Osnovna ravnina	M	0	+0,05	-0,05	0,0015

4.2 Optična brezdotična metoda

V tabeli 4 so prikazani rezultati, pridobljeni z optično brezdotično metodo merjenja. Izven tolerančnih mer je bila le mera osnovne ravnine za 0,0502 mm. V tem primeru je posamezna meritev trajala do 20 sekund. Primer izpisa rezultatov je prikazan v prilogi 3.

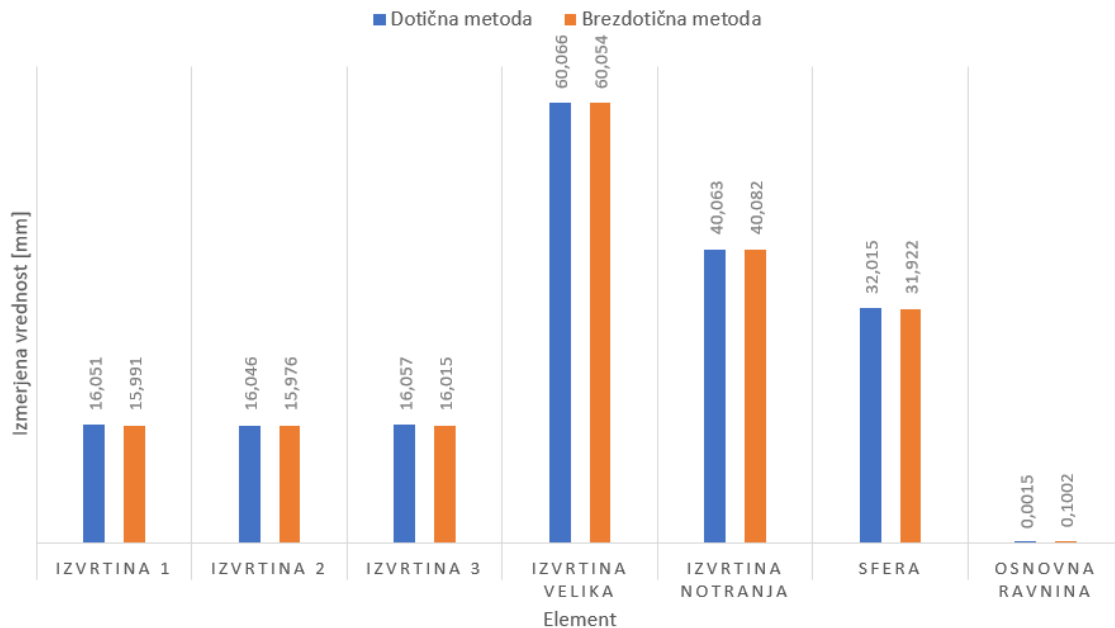
Tabela 5: Rezultati optične brezdotične metode merjenja

Pozicija	Merjena vrednost	Nominalna mera [mm]	Zgornje dovoljeno odstopanje [mm]	Zgornje dovoljeno odstopanje [mm]	Izmerjena vrednost
Izvertina 1	D	16	+0,05	-0,05	15,991
Izvertina 2	D	16	+0,05	-0,05	15,976
Izvertina 3	D	16	+0,05	-0,05	16,015
Izvertina velika	D	60	+0,05	-0,05	60,054
Izvertina notranja	D	40	+0,05	-0,05	40,082
Sfera	D	32	+0,05	-0,05	31,922
Osnovna ravnina	M	0	+0,05	-0,05	0,1002

4.3 Primerjava rezultatov

Na sliki 15 je prikazana primerjava rezultatov obeh metod.

PRIMERJAVA MERITEV OPTIČNE BREZDOTIČNE METODE MERJENJA Z DOTIČNO



Slika 15: Graf primerjave meritev optične brezdotične metode merjenja z dotično

Pri primerjavi med brezdotično metodo dimenzijskega merjenja in dotično metodo smo opazili, da je brezdotična metoda pokazala več prednosti. Bila je hitrejša, omogočila je zajemanje podatkov brez neposrednega stika z merjenim predmetom, kar je zmanjšalo čas izvajanja meritve. Poleg tega smo opazili manjše število odstopanj in manjše velikosti odstopanj pri optični brezdotični metodi v primerjavi z dotično metodo. Razlika v rezultatih je lahko delno razložena tudi z različnim številom zajetih točk. Pri dotični metodi smo za zajem podatkov o izvrtini uporabili le 5 točk, medtem ko smo pri brezdotični metodi za zajem podatkov uporabili več tisoč točk. Razširjenost vzorčenja pri brezdotični metodi omogoča celovitejše zajemanje površinskega profila izvrtin, kar lahko vodi do natančnejših in bolj zanesljivih rezultatov. Nasprotno pa lahko omejenost vzorčenja pri dotični metodi prispeva k manj natančnim rezultatom, saj ne zajame vseh podrobnosti stanja integritete obdelane površine izvrtine (površinska hrapavost).

Treba je upoštevati tudi, da se lahko slabši rezultati dotične metode nanašajo tudi na naše programiranje in izkušnje pri uporabi metode. Glede na to, da smo začetnik pri uporabi dotične metode, obstaja možnost, da je programiranje in izvedba merjenja z dotično metodo vplivala na rezultate in povzročila večje odstopanje zaradi neoptimalnosti zapisanega programa. Na osnovi pridobljenih rezultatov se da razbrati velik napredek na področju razvoja optičnih metod dimenzijskega merjenja v zadnjih desetletjih. Ta napredek nakazuje na potencialni trend nadomeščanja dotičnih naprav z optičnimi pri nekaterih aplikacijah, zagotovo pa ne pri vseh.

5 SKLEP

V sklopu diplomskega dela smo izvedli primerjavo med dotično in optično brezdotično metodo dimenzijskega merjenja glede na hitrost izvajanja meritev in merilno negotovost rezultatov. Pričakovali smo, da bo brezdotična metoda omogočila hitrejšo izvajanje meritev, vendar pa bo manj natančna v primerjavi z dotično metodo.

Po analizi in primerjavi rezultatov smo ugotovili, da je optična brezdotična metoda res izkazala večjo hitrost merjenja v primerjavi z dotično metodo. To je bilo pričakovano, saj brezdotična metoda temelji na optičnih in laserskih načelih, ki omogočajo hitro zajemanje podatkov brez neposrednega dotika s površino merjenega predmeta.

Presenetljivo smo ugotovili, da so bili rezultati brezdotične metode večkrat znotraj tolerančnih polj kot pri dotični metodi. Poleg tega smo ugotovili, da je dotična metoda bolj občutljiva na zunanje vplive, kar lahko vpliva na večjo merilno negotovost. Na primer pritisk in smer dotika ali deformacija merilne sonde lahko vplivajo na natančnost meritev pri dotični metodi. V nasprotju s tem pa optična brezdotična metoda, ki ne zahteva fizičnega stika s predmetom, omogoča manjše vplive zunanjih dejavnikov na merilno negotovost.

Optična brezdotična metoda kljub svoji hitrosti zagotavlja zadovoljivo natančnost pri merjenju dimenzij, hkrati pa zmanjšuje vplive zunanjih dejavnikov na rezultate meritev. To je pomembno spoznanje, ki kaže na potencialno uporabo brezdotične metode merjenja v industrijskih in proizvodnih okoljih, kjer je potrebno zagotoviti natančne in hitre meritve.

V prihodnosti bi bilo smiselno nadalje raziskovati in razvijati brezdotične metode merjenja ter še izboljšati njihovo natančnost in odpornost na zunanje vplive. Kot sklep lahko zaključimo, da je brezdotična metoda dimenzijskega merjenja pokazala obetavne rezultate glede na hitrost, natančnost in manjšo občutljivost na zunanje vplive.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] Urad Republike Slovenije za meroslovje, Meroslovje | GOV.SI, GOV.SI. (2022). <https://www.gov.si/podrocja/podjetnistvo-in-gospodarstvo/meroslovje/> (accessed March 1, 2023).
- [2] International Organization of Legal Metrology, International Vocabulary of Metrology, (2000). <https://web.archive.org/web/20070928030048/http://www.oiml.org/publications/V/V001-ef00.pdf> (accessed May 8, 2023).
- [3] P. Howarth, F. Redgrave, Metrology - in short, (2008). https://web.archive.org/web/20121023153656/http://resource.npl.co.uk/international_office/metrologyinshort.pdf (accessed May 8, 2023).
- [4] JCGM, International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM), (2008). https://web.archive.org/web/20110110120304/http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf (accessed May 10, 2023).
- [5] J. Dmovšek, J. Bojkovski, G. Geršak, I. Pušnik, D. Hudoklin, Metrologija, Laboratorij za metrologijo in kakovost, Ljubljana, 2012.
- [6] Urad Republike Slovenije za meroslovje, Zagotavljanje sledljivosti meritev, Urad Republike Slovenije Za Meroslovje. (2023).
- [7] Urad RS za standardizacijo in meroslovje, Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja, Ljubljana, 1999.
- [8] B. Mali, SPREJEMLJIVA MEROSLOVNA SLEDLJIVOST MERILNIH REZULTATOV Kazalo, 2022. <https://european-accreditation.org/ea->
- [9] W. Hässelbarth, Guide to the Evaluation of Measurement Uncertainty for Quantitative Test Results, Paris, 2006. https://web.archive.org/web/20161123053518/http://www.eurolab.org/document_s/EL_11_01_06_387%20Technical%20report%20-%20Guide%20Measurement%20uncertainty.pdf (accessed May 10, 2023).
- [10] G. Geršak, Univerza v Ljubljani Fakulteta Laboratorij za metrologijo in kakovost za elektrotehniko Merilna negotovost za začetnike, (2008).
- [11] B. Ačko, Calibration of Coordinate Measuring Devices in the Laboratory Conditions, Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering. 44 (1998) 41–46.
- [12] Coordinate Measuring Machines and Systems - Google Knjige, CRC Press. (2012). https://books.google.si/books?id=TGzLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sl&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (accessed May 10, 2023).
- [13] CMMXYZ, CMM Parts: The Parts Of A Coordinate Measuring Machine, (2020).

-
- [14] R.R. Nikam, COORDINATE MEASURING MACHINE (CMM), International Journal of Mechanical and Industrial Technology. 6 (2018) 13–19. www.researchpublish.com (accessed May 10, 2023).
- [15] F. Artkin, CMM Machines and Industrial Applications, (n.d.). <https://www.researchgate.net/publication/367438496> (accessed May 15, 2023).
- [16] D. Flack, Good Practice Guide No. 41 CMM Measurement Strategies Issue 2, n.d.
- [17] C. Zuo, J. Qian, S. Feng, W. Yin, Y. Li, P. Fan, J. Han, K. Qian, Q. Chen, Deep learning in optical metrology, Light Sci Appl. 11 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00714-x>.

SEZNAM SLIK

Slika 1: Koordinatni merilni stroj, 1966 [12]	7
Slika 2: Zgradba 3D koordinatnega merilnega stroja	8
Slika 3: Mostovni koordinatni merilni stroj	9
Slika 4: Koordinatni merilni stroj s fiksnim mostom	10
Slika 5: Konzolni koordinatni merilni stroj	11
Slika 6: Portalni koordinatni merilni stroj	11
Slika 7: Shematični prikaz mehanizma "touch-trigger" tipala	13
Slika 8: Šest točk, potrebnih za določitev koordinatnega sistema merjenja	15
Slika 9: CAD model merjenja	17
Slika 10: Tehniška risba merjenja	18
Slika 11: Uporabljeno tipalo in merilna sonda	19
Slika 12: Postavitev merjenega kosa s koordinatnim sistemom merilnega stroja	20
Slika 13: Skener Hexagon HP-L-5.8	21
Slika 14: CAD model merjenja z označenimi elementi	23
Slika 15: Graf primerjave meritev optične brezdotične metode merjenja z dotično	25
Slika 16: Začetek programa	33
Slika 17: 1. del programa	34
Slika 18: 2. del programa	35
Slika 19: 3. del programa	36
Slika 20: 4. del programa	37
Slika 21: 5. del programa	38
Slika 22: Primer rezultatov dotične metode	39
Slika 23: Primer izpisa rezultatov brezdotične metode	40

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Osnovne fizikalne količine.....	4
Tabela 2: Število potrebnih točk	15
Tabela 3: Nominalne vrednosti mer s tolerancami	17
Tabela 4: Rezultati dotične metode merjenja	24
Tabela 5: Rezultati optične brezdotične metode merjenja	24

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

l - dolžina (m)

m - masa (kg)

t - čas (s)

I - električni tok (A)

T - temperatura (K)

n - množina snovi (mol)

I_v - svetilnosti (kandela)

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

FTPO - Fakulteta za tehnologijo polimerov

3D - tri koordinatno

SI - Syst eme International

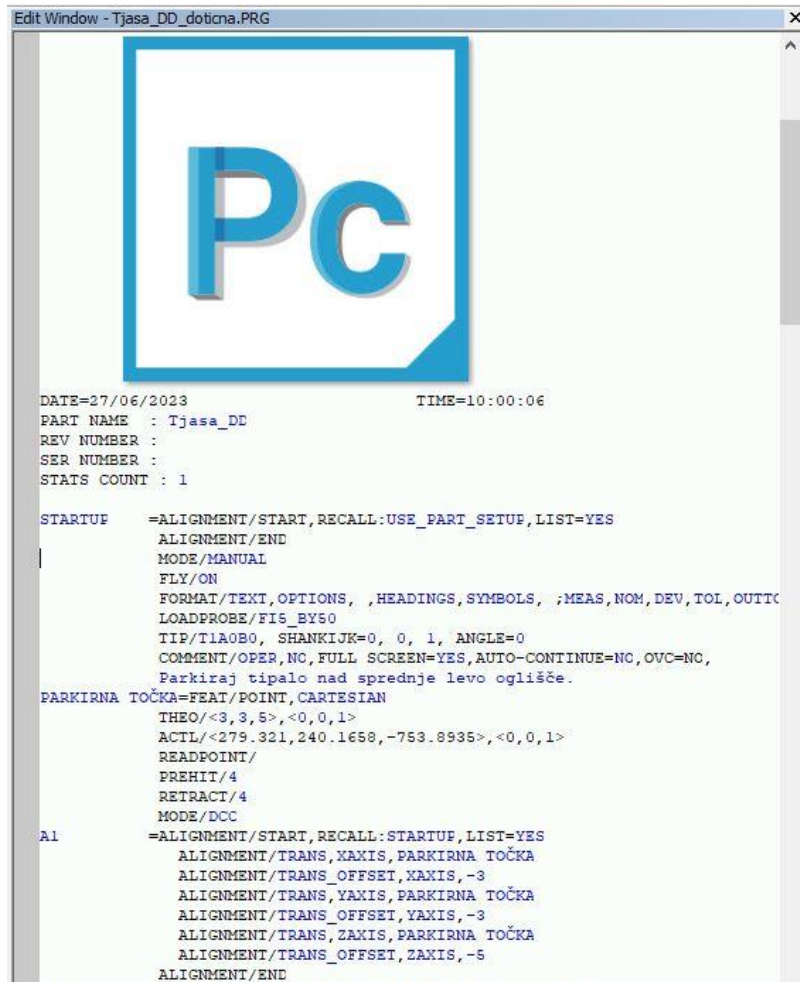
CAD - Computer Aided Design

PC-DMIS - Personal Computer-Dimensional Measurement Interface Specification

CNC - Computer Numerical Control

PRILOGE

Priloga 1: Postopek programiranja 3D koordinatnega merilnega stroja v programu PC-DMIS



```
Edit Window - Tjasa_DD_doticna.PRG
x
^
Pc
DATE=27/06/2023          TIME=10:00:06
PART NAME  : Tjasa_DD
REV NUMBER :
SER NUMBER :
STATS COUNT : 1

STARTUP  =ALIGNMENT/START, RECALL:USE_PART_SETUP, LIST=YES
ALIGNMENT/END
MODE/MANUAL
FLY/ON
FORMAT/TEXT, OPTIONS, , HEADINGS, SYMBOLS, ; MEAS, NOM, DEV, TOL, OUTT
LOADPROBE/FIS_BY50
TIP/TIA0B0, SHANKIJK=0, 0, 1, ANGLE=0
COMMENT/OPER, NC, FULL SCREEN=YES, AUTO-CONTINUE=NC, OVC=NC,
Parkiraj tipalo nad sprednje levo oglišče.
PARKIRNA TOČKA=FEAT/POINT, CARTESIAN
THEO/<3, 3, 5>, <0, 0, 1>
ACTL/<279.321, 240.1658, -753.8935>, <0, 0, 1>
READPOINT/
PREHIT/4
RETRACT/4
MODE/DCC
A1      =ALIGNMENT/START, RECALL:STARTUP, LIST=YES
ALIGNMENT/TRANS, XAXIS, PARKIRNA TOČKA
ALIGNMENT/TRANS_OFFSET, XAXIS, -3
ALIGNMENT/TRANS, YAXIS, PARKIRNA TOČKA
ALIGNMENT/TRANS_OFFSET, YAXIS, -3
ALIGNMENT/TRANS, ZAXIS, PARKIRNA TOČKA
ALIGNMENT/TRANS_OFFSET, ZAXIS, -5
ALIGNMENT/END
```

Slika 16: Začetek programa

```

t Window - Tjasa_DD_doticna.PRG
ALIGNMENT/END
PNT2 =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT, CARTESIAN
      THEO/<2.4138,4.8158,0>,<0,0,1>
      ACTL/<2.4143,4.8173,-0.4256>,<0,0,1>
      TARG/<2.4138,4.8158,0>,<0,0,1>
      SNAP=NC
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      AVOIDANCE MOVE=NC
      SHOW HITS=NC
      CLEARP/ZPLUS,10,ZPLUS,0,ON
A2 =ALIGNMENT/START,RECALL:A1,LIST=YES
    ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,PNT2
    ALIGNMENT/END
    MOVE/CLEARPLANE
PNT3 =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT, CARTESIAN
      THEO/<12.3812,0,-5.8871>,<0,-1,0>
      ACTL/<12.383,-0.7057,-5.8873>,<0,-1,0>
      TARG/<12.3812,0,-5.8871>,<0,-1,0>
      SNAP=NC
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      AVOIDANCE MOVE=NC
      SHOW HITS=NC
PNT4 =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT, CARTESIAN
      THEO/<94.6117,0,-7.5241>,<0,-1,0>
      ACTL/<94.6139,2.1642,-7.524>,<0,-1,0>
      TARG/<94.6117,0,-7.5241>,<0,-1,0>
      SNAP=NC
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      AVOIDANCE MOVE=NC
      SHOW HITS=NC
PREDNJI ROB=FEAT/LINE, CARTESIAN, UNBOUNDED, NC
      THEO/<12.3812,0,-5.8871>,<0.9998019,0,-0.0199039>
      ACTL/<12.383,-0.7057,-5.8873>,<0.9991939,0.034872,-0.019888>
      CONSTR/LINE,BF,3D,PNT3,PNT4,,
      OUTLIER_REMOVAL/OFF,3
      FILTER/OFF,WAVELENGTH=0
A3 =ALIGNMENT/START,RECALL:A2,LIST=YES
    ALIGNMENT/ROTATE,XPLUS,TC,PREDNJI ROB,ABOUT,ZPLUS
    ALIGNMENT/TRANS,YAXIS,PREDNJI ROB
    ALIGNMENT/END
    MOVE/CLEARPLANE
PNT5 =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT, CARTESIAN
      THEO/<0,20.257,-6>,<-1,0,0>
      ACTL/<-1.856,20.2587,-5.9991>,<-1,0,0>
      TARG/<0,20.257,-6>,<-1,0,0>
      SNAP=NC
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      AVOIDANCE MOVE=NC
      SHOW HITS=NC
A4 =ALIGNMENT/START,RECALL:A3,LIST=YES
    ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,PNT5
    ALIGNMENT/END
    MOVE/CLEARPLANE

```

Slika 17: 1. del programa

```
PNT6      =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT,CARTESIAN
          THEO/<24.322,88.4865,0>,<0,0,1>
          ACTL/<24.3222,88.4882,0.0051>,<0,0,1>
          TARG/<24.322,88.4865,0>,<0,0,1>
          SNAP=NC
          SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
          SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
            AVOIDANCE MOVE=NC
          SHOW HITS=NC
          MOVE/CLEARPLANE
PNT7      =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT,CARTESIAN
          THEO/<117.0057,105.0661,0>,<0,0,1>
          ACTL/<117.0055,105.0675,-0.0012>,<0,0,1>
          TARG/<117.0057,105.0661,0>,<0,0,1>
          SNAP=NC
          SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
          SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
            AVOIDANCE MOVE=NC
          SHOW HITS=NC
          MOVE/CLEARPLANE
PNT8      =FEAT/CONTACT/VECTOR POINT/DEFAULT,CARTESIAN
          THEO/<97.9746,8.5666,0>,<0,0,1>
          ACTL/<97.9746,8.5674,-0.0078>,<0,0,1>
          TARG/<97.9746,8.5666,0>,<0,0,1>
          SNAP=NC
          SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
          SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
            AVOIDANCE MOVE=NC
          SHOW HITS=NC
OSNOVNA RAVNINA=FEAT/PLANE,CARTESIAN,TRIANGLE,NC,LEAST_SQR
          THEO/<79.7674,67.3731,0>,<0,0,1>
          ACTL/<79.7674,67.3744,-0.0013>,<0.0000828,-0.0000842,1>
          CONSTR/PLANE,BF,PNT6,PNT7,PNT8,,
          OUTLIER_REMOVAL/OFF,3
          FILTER/OFF,WAVELENGTH=0
```

Slika 18: 2. del programa

```

Edit Window - Tjasa_DD_doticna.PRG
OUTLIER_REMOVAL/OFF,3
FILTER/OFF,WAVELENGTH=0
KS =ALIGNMENT/START,RECALL:A4,LIST=YES
    ALIGNMENT/LEVEL,ZPLUS,OSNOVNA RAVNINA
    ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,OSNOVNA RAVNINA
ALIGNMENT/END
PREHIT/2.5
RETRACT/2.5
MOVE/CLEARPLANE
IZVRTINA 1 =FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQ
    THEO/<80,19,0>,<0,0,1>,16.4
    ACTL/<79.9761,18.9395,0>,<0,0,1>,16.0507
    TARG/<80,19,0>,<0,0,1>
    START ANG=0,END ANG=360
    ANGLE VEC=<1,0,0>
    DIRECTION=CCW
    SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
    SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
        NUMHITS=5,DEPTH=3,PITCH=0
        SAMPLE METHOD=SAMPLE_HITS
        SAMPLE HITS=0,SPACER=0
    AVOIDANCE MOVE=NC
    FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
    SHOW HITS=NC
    MOVE/CLEARPLANE
IZVRTINA 2 =FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQ
    THEO/<39,60,0>,<0,0,1>,16.4
    ACTL/<38.9806,59.9386,0>,<0,0,1>,16.0464
    TARG/<39,60,0>,<0,0,1>
    START ANG=0,END ANG=360
    ANGLE VEC=<1,0,0>
    DIRECTION=CCW
    SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
    SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
        NUMHITS=5,DEPTH=3,PITCH=0
        SAMPLE METHOD=SAMPLE_HITS
        SAMPLE HITS=0,SPACER=0
    AVOIDANCE MOVE=NC
    FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
    SHOW HITS=NC
    MOVE/CLEARPLANE
IZVRTINA 3 =FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQ
    THEO/<80,101,0>,<0,0,1>,16.4
    ACTL/<79.9788,100.9331,0>,<0,0,1>,16.0571
    TARG/<80,101,0>,<0,0,1>
    START ANG=0,END ANG=360
    ANGLE VEC=<1,0,0>
    DIRECTION=CCW
    SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
    SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
        NUMHITS=5,DEPTH=3,PITCH=0
        SAMPLE METHOD=SAMPLE_HITS
        SAMPLE HITS=0,SPACER=0
    AVOIDANCE MOVE=NC
    FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
    SHOW HITS=NC
    MOVE/CLEARPLANE

```

Slika 19: 3. del programa

```
Edit Window - Tjasa_DD_doticna.PRG
      FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
      SHOW HITS=NC
      MOVE/CLEARPLANE
IZVRTINA 4 =FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQR
      THEO/<121,60,0>,<0,0,1>,16.4
      ACTL/<120.9719,59.9386,0>,<0,0,1>,16.0499
      TARG/<121,60,0>,<0,0,1>
      START ANG=0,END ANG=360
      ANGLE VEC=<1,0,0>
      DIRECTION=CCW
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      NUMHITS=5,DEPTH=3,PITCH=0
      SAMPLE METHOD=SAMPLE_HITS
      SAMPLE HITS=0,SPACER=0
      AVOIDANCE MOVE=NC
      FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
      SHOW HITS=NC
      MOVE/CLEARPLANE
IZVRTINA VELIKA=FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQR
      THEO/<80,60,0>,<0,0,1>,60
      ACTL/<79.9624,59.9407,0>,<0,0,1>,60.0669
      TARG/<80,60,0>,<0,0,1>
      START ANG=0,END ANG=360
      ANGLE VEC=<1,0,0>
      DIRECTION=CCW
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      NUMHITS=5,DEPTH=3,PITCH=0
      SAMPLE METHOD=SAMPLE_HITS
      SAMPLE HITS=0,SPACER=0
      AVOIDANCE MOVE=NC
      FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
      SHOW HITS=NC
      MOVE/CLEARPLANE
IZVRTINA NOTRANJA=FEAT/CONTACT/CIRCLE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQR
      THEO/<80,60,-20>,<0,0,1>,40
      ACTL/<79.9613,59.9437,-20>,<0,0,1>,40.0634
      TARG/<80,60,-20>,<0,0,1>
      START ANG=0,END ANG=360
      ANGLE VEC=<1,0,0>
      DIRECTION=CCW
      SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
      SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
      NUMHITS=5,DEPTH=3,PITCH=0
      SAMPLE METHOD=SAMPLE_HITS
      SAMPLE HITS=0,SPACER=0
      AVOIDANCE MOVE=NC
      FIND HOLE=DISABLED,ONERROR=NC,READ POS=NC
      SHOW HITS=NC
      MOVE/CLEARPLANE
```

Slika 20: 4. del programa

```

Edit Window - Tjasa_DD_dotica.PRG
SFERA =FEAT/CONTACT/SPHERE/DEFAULT,CARTESIAN,IN,LEAST_SQR
THEO/<150,96,5.5678>,<-0.0001183,-0.0000092,1>,32
ACTL/<149.9686,96.9451,5.5577>,<-0.0001183,-0.0000092,1>,31.973
TARG/<150,96,5.5678>,<-0.0001183,-0.0000092,1>
START ANGLE 1=0,END ANG 1=360
START ANGLE 2=-104,END ANG 2=-28.357
ANGLE VEC=<1,0,0.0001183>
SHOW FEATURE PARAMETERS=NC
SHOW CONTACT PARAMETERS=YES
NUMHITS=6,NUMROWS=3
SAMPLE HITS=0
AVOIDANCE MOVE=NC
SHOW HITS=NC
DIM LOC1= LOCATION OF CIRCLE IZVRTINA 1 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
D 16.0507 16.0000 0.0507 0.0500 -0.0500 0.0007 -----
END OF DIMENSION LOC1
DIM LOC2= LOCATION OF CIRCLE IZVRTINA 2 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
D 16.0464 16.0000 0.0464 0.0500 -0.0500 0.0000 -----
END OF DIMENSION LOC2
DIMINFO/LOC2,ICON,DIMID,FEATID,VERT,HORIZ,
HEADINGS,GRAPH AXIS,DEV, , , , , , , ,
USEDIM
DIM LOC9= LOCATION OF POINT PNT5 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
X 0.0005 0.0000 0.0005 0.0500 -0.0500 0.0000 -----
Y 20.2582 20.2570 0.0012 0.0500 -0.0500 0.0000 -----
Z -6.0004 -6.0000 -0.0004 0.0500 -0.0500 0.0000 -----
T -0.0005 0.0000 -0.0005 0.0500 -0.0500 0.0000 -----
END OF DIMENSION LOC9
DIMINFO/LOC9,ICON,DIMID,FEATID,VERT,HORIZ,
HEADINGS,GRAPH AXIS,DEV, , , , , , , ,
USEDIM
DIM LOC3= LOCATION OF CIRCLE IZVRTINA 3 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
D 16.0571 16.0000 0.0571 0.0500 -0.0500 0.0071 -----
END OF DIMENSION LOC3
DIM LOC4= LOCATION OF CIRCLE IZVRTINA 4 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
D 16.0499 16.0000 0.0499 0.0500 -0.0500 0.0000 -----
END OF DIMENSION LOC4
DIM LOC5= LOCATION OF CIRCLE IZVRTINA VELIKA UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
D 60.0669 60.0000 0.0669 0.0500 -0.0500 0.0169 -----
END OF DIMENSION LOC5
DIM LOC6= LOCATION OF CIRCLE IZVRTINA NOTRANJA UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC
AX MEAS NOMINAL DEV +TOL -TOL OUTTOL
D 40.0634 40.0000 0.0634 0.0500 -0.0500 0.0134 -----
END OF DIMENSION LOC6
DIM LOC7= LOCATION OF SPHERE SFERA UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NC

```

Slika 21: 5. del programa

Priloga 2: Izpis rezultatov dotične metode merjenja

Pc		PART NAME : Tjasa_DD		April 12, 2023		11:37	
		REV NUMBER :		SER NUMBER :		STATS COUNT : 1	
#	MM	LOC1 - IZVRTINA 1					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		16.051	16.000	0.051	0.050	-0.050	0.001
#	MM	LOC2 - IZVRTINA 2					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		16.046	16.000	0.046	0.050	-0.050	0.000
#	MM	LOC3 - IZVRTINA 3					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		16.057	16.000	0.057	0.050	-0.050	0.007
#	MM	LOC4 - IZVRTINA 4					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		16.050	16.000	0.050	0.050	-0.050	0.000
#	MM	LOC5 - IZVRTINA VELIKA					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		60.066	60.000	0.066	0.050	-0.050	0.016
#	MM	LOC6 - IZVRTINA NOTRANJA					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		40.063	40.000	0.063	0.050	-0.050	0.013
#	MM	LOC7 - SFERA					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
D		31.973	32.000	-0.027	0.050	-0.050	0.000
#	MM	LOC8 - OSNOVNA RAVNINA					
AX		MEAS	NOMINAL	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL
T		0.000	0.000	0.000	0.050	-0.050	0.000

Slika 22: Primer rezultatov dotične metode

Priloga 3: Izpis rezultatov brezdotične metode merjenja

Pc		PART NAME : scan				April 26, 2023	13:17
		REV NUMBER :		SER NUMBER :		STATS COUNT : 1	
FCFLAT1		MM	1		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
PLN_A	0.0000	1.0000		0.1002	0.1002	0.0000	
#	MM	LOC1 - CIR_1					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	16.4000	0.0500	-0.0500	15.9914	-0.4086	0.3586	
#	MM	LOC2 - CIR_2					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	16.4000	0.0500	-0.0500	15.9760	-0.4240	0.3740	
#	MM	LOC3 - CIR_3					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	16.4000	0.0500	-0.0500	16.0152	-0.3848	0.3348	
#	MM	LOC4 - CIR_4					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	16.4000	0.0500	-0.0500	15.9912	-0.4088	0.3588	
#	MM	LOC5 - CIR_40					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	40.0000	0.0500	-0.0500	40.0826	0.0826	0.0326	
#	MM	LOC6 - CIR_60					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	60.0000	0.0500	-0.0500	60.0542	0.0542	0.0042	
#	MM	LOC7 - SPH2					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	32.0000	0.0500	-0.0500	31.9228	-0.0772	0.0272	

Slika 23: Primer izpisa rezultatov brezdotične metode