

Provjera točnosti 1D mjernog uređaja

Šuća, Antonela

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:323677>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Antonela Šuća

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vedran Šimunović, dipl. ing.

Student:

Antonela Šuća

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se najviše mentoru prof. dr. sc. Vedranu Šimunoviću na ukazanoj prilici te mu se zahvaljujem na svom njegovom uloženom vremenu, trudu, investiranosti i pomoći pri ostvarivanju ovog diplomskog rada.

Također zahvaljujem svojoj kumici Luciji koja je skupa sa mnom i mentorom sudjelovala u provedbi praktičnog dijela ovoga rada.

Za kraj zahvaljujem obitelji, prijateljima i kolegama na podršci i bodrenju tijekom cijelog svog studiranja, bez njih ovo ne bi bilo moguće.

Antonela Šuća



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 01	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Antonela Šuća

JMBAG: 0035218017

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Provjera točnosti 1D mjernog uređaja

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Accuracy Verification of a 1D Measuring device

Opis zadatka:

Laserski interferometri često su korišteni mjerni uređaji u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Njihovu primjenu nalazimo u mjerenju duljine i umjeravanju mjerne opreme. Ovim uređajima moguće je mjeriti pomak, kut, odstupanje od pravocrtosti, ravnost i dr. U ovom radu bit će primijenjen Renishaw ML10 laserski interferometar za utvrđivanje pogreške točnosti pokazivanja 1D mjernog uređaja.

U radu je potrebno:

1. Opisati mjerenje linearnog pomaka laserskim interferometrom.
2. Provesti mjerenja.
3. Utvrditi pogreške pokazivanja 1D mjernog uređaja.
4. Analizirati dobivene rezultate.

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

Zadatak zadan:

16. studenoga 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Datum predaje rada:

18. siječnja 2024.

Predvideni datum obrane:

22. – 26. siječnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1 Uvod	1
2 Interferencijski sustav za mjerenje	2
3 Linearno mjerenje duljine.....	6
4 Oprema korištena za izvedbu mjerenja.....	10
4.1 Renishaw ML10	10
4.2 Linearna mjerna optika	14
4.3 Uređaj za mjerenje duljine	15
5 Provedba mjerenja	18
5.1 Preliminarno mjerenje.....	23
5.2 Pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm	25
5.3 Tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm.....	33
6 Analiza mjerenja.....	38
6.1 Pojašnjenje terminologije prema ISO 230	38
6.1.1 Granice mjerenja	38
6.1.2 Smjer mjerenja	39
6.1.3 Mjerna nesigurnost	39
6.1.4 Pozicioniranje točaka mjerenja	40
6.1.5 Pogreške uzrokovane reverzijom (eng. reversal error)	41
6.1.6 Ponovljivost pozicioniranja	43
6.1.7 Pogreške pozicioniranja	45
6.1.8 Točnost pozicioniranja.....	46
6.2 Korekcija duljine uzrokovana linearnim toplinskim širenjem.....	47
6.3 Analiza mjerenja prema normi ISO 230-2	53
6.4 Analiza mjerenja korištenjem metode najmanjih kvadrata.....	63
7 Zaključak	69
LITERATURA.....	70

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Michelsonov interferometar [1]	3
Slika 2.2 XL-80 laser [1]	4
Slika 3.1 Tipičan postav linearnog mjernog sustava za mjerenje položaja [2]	7
Slika 3.2 Kosinusna pogreška [2]	8
Slika 3.3 Senzor temperature zraka i senzor temperature materijala [2]	9
Slika 4.1 Laser Renishaw ML10	10
Slika 4.2 Jedinica za kompenzaciju okoline EC10	11
Slika 4.3 Senzori temperature zraka i materijala postavljeni na mjerni uređaj	12
Slika 4.4 Senzori tlaka i vlage zraka [2]	12
Slika 4.5 Linearna mjerna optika [2]	14
Slika 4.6 Kolica (lijevo) i mjerna glava (desno) na uređaju za mjerenje duljine	15
Slika 4.7 Kolica grubo pozicionirana na vrijednost od 200 mm	15
Slika 4.8 Očitavanje optičkog sustava za fino pozicioniranje u iznosu od 0,67 mm	16
Slika 4.9 Numerička vrijednost velike mjerne skale (dolje) i optički prozorčić (gore)	16
Slika 4.10 Očitavanje optičkog sustava za najfinije pozicioniranje s odstupanjem od +100 μm	17
Slika 5.1 Laserski zatvarač sa zrakom smanjenog promjera [2]	18
Slika 5.2 Mjerni reflektor poklopljen s metom [2]	18
Slika 5.3 Laserska zraka odbijena od mjernog reflektora nazad na zatvarač [2]	19
Slika 5.4 Pozicioniranje linearnog interferometra u odnosu na mjerni reflektor [2]	19
Slika 5.5 Linearni interferometar poklopljen s metom [2]	20
Slika 5.6 Laserska zraka odbijena od linearnog interferometra nazad na zatvarač [2]	20
Slika 5.7 Odstupanje odbijene mjerne zrake u odnosu na referentnu [2]	21
Slika 5.8 Vertikalno podešavanje snopa [2]	21
Slika 5.9 Horizontalno podešavanje snopa [2]	21
Slika 5.10 Laserski zatvarač zakrenut u položaj za mjerenje [2]	22
Slika 5.11 Konfiguracija preliminarnog mjerenja	23
Slika 5.12 Konfiguracija 5 jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm	25
Slika 5.13 Sustav prolaska laserske zrake kroz linearni interferometar [2]	26
Slika 5.14 Pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm - nekorigirano	32
Slika 5.15 Tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm - nekorigirano	37
Slika 6.1 Pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm - korigirano	49
Slika 6.2 Tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm - korigirano	51
Slika 6.3 Normirani ciklus mjerenja [5]	53
Slika 6.4 Grafički prikaz korigiranih mjerenja s odbačenim prvim mjerenjem	58
Slika 6.5 Aritmetičke sredine odstupanja s linearnim trendom	64
Slika 6.6 Metoda najmanjih kvadrata primijenjena na mjerenje	67

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Očitana odstupanja preliminarnog mjerenja	24
Tablica 5.2 Prvo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm	27
Tablica 5.3 Drugo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm	28
Tablica 5.4 Treće jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm	29
Tablica 5.5 Četvrto jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm	30
Tablica 5.6 Peto jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm	31
Tablica 5.7 Prvo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 100 mm	34
Tablica 5.8 Drugo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 100 mm	35
Tablica 5.9 Treće jednosmjerno mjerenje s razmakom od 100 mm	36
Tablica 6.1 Korigirane vrijednosti duljine za 5 mjerenja s razmakom od 200 mm	48
Tablica 6.2 Korigirane vrijednosti duljine za 3 mjerenja s razmakom od 100 mm	50
Tablica 6.3 Odstupanja od pozicioniranja na poziciji i procjenitelji ponovljivosti [mm].....	54
Tablica 6.4 Pogreške uzrokovane reverzijom [mm]	55
Tablica 6.5 Ponovljivosti pozicioniranja [mm].....	56
Tablica 6.6 Sustavne linearne pogreške očitavanja [mm].....	57
Tablica 6.7 Pogreške očitavanja [mm].....	57
Tablica 6.8 Odstupanja od pozicioniranja na poziciji i procjenitelji ponovljivosti (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]	59
Tablica 6.9 Pogreške uzrokovane reverzijom (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]	60
Tablica 6.10 Ponovljivosti pozicioniranja (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]	61
Tablica 6.11 Sustavne pogreške očitavanja (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]	62
Tablica 6.12 Pogreške očitavanja (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]	62
Tablica 6.13 Podaci dobiveni primjenom metode najmanjih kvadrata	66

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	-	Nagib pravca
A	mm	Točnost dvosmjernog pozicioniranja osi
$A \uparrow$	mm	Točnost jednosmjernog pozicioniranja osi (slučaj primicanja meti)
$A \downarrow$	mm	Točnost jednosmjernog pozicioniranja osi (slučaj odmicanje od mete)
b	-	Odsječak pravca na ordinati
B	mm	Vrijednost pogreške inverzije na određenoj poziciji
B_i	mm	Vrijednost pogreške inverzije na osi
\overline{B}	mm	Srednja vrijednost pogreške inverzije na osi
d	μm	pomak
E	mm	Sustavna pogreška dvosmjernog pozicioniranja osi
$E \uparrow$	mm	Sustavna pogreška jednosmjernog pozicioniranja osi (slučaj primicanja meti)
$E \downarrow$	mm	Sustavna pogreška jednosmjernog pozicioniranja osi (slučaj odmicanja od mete)
L	mm	Duljina
M	mm	Srednja pogreška dvosmjernog pozicioniranja osi
n	-	Broj jednosmjernih prilaženja meti
N	-	Broj prijašnjih rubova
P_i	mm	Pozicija mete
P_{ij}	mm	Stvarna pozicija
R_i	mm	Ponovljivost za slučaj dvosmjernog pozicioniranja na poziciji
$R_i \uparrow$	mm	Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja na poziciji (slučaj primicanja meti)
$R_i \downarrow$	mm	Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja na poziciji (slučaj odmicanja od mete)
R	mm	Ponovljivost dvosmjernog pozicioniranja na osi
$R \uparrow$	mm	Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja na osi (slučaj primicanja meti)
$R \downarrow$	mm	Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja na osi (slučaj odmicanja od mete)
$s \uparrow$	mm	Procjenitelj ponovljivosti jednosmjernog pozicioniranja osi na poziciji (slučaj primicanja meti)
$s \downarrow$	mm	Procjenitelj ponovljivosti jednosmjernog pozicioniranja osi na poziciji (slučaj odmicanja od mete)
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura

x_{ij}	mm	Odstupanje od pozicioniranja
$\overline{x_i}$	mm	Srednje dvosmjerno odstupanje pozicioniranja na određenoj poziciji
$\overline{x_i \uparrow}$	mm	Srednje jednosmjerno odstupanje pozicioniranja na određenoj poziciji (slučaj primicanja meti)
$\overline{x_i \downarrow}$	mm	Srednje jednosmjerno odstupanje pozicioniranja na određenoj poziciji (slučaj odmicanja od mete)
α	K ⁻¹	Koeficijent toplinskog širenja
λ	μm	Valna duljina

SAŽETAK

Tema ovog rada je provjera točnosti 1D uređaja za mjerenje duljine do 3 metra. Ovakvi uređaji koriste se za umjeravanje etalona duljine kao što su štapni kontrolnici, mjerni prsteni ili dugačke granične mjerke.

U prvom dijelu rada detaljno je opisan način rada interferometra, zatim laserski interferencijski sustav Renishaw ML10 te način mjerenja pomaka upotrebom linearne optike.

U eksperimentalnom dijelu razmatrala su se dva različita postava mjerenja tj. različit razmještaj mjerne optike na 1D mjernom uređaju. Izvršene su tri vrste mjerenja. Prvo preliminarno mjerenje provedeno je samo kao testno mjerenje za ispitivanje prikladnosti prvog postava laserskog sustava, ali s obzirom na kompliciranost mjernog procesa i samo njegovo trajanje taj pristup se pokazao nezadovoljavajućim te se odbacio kao primjeren za ovu namjenu.

U drugoj mjernoj konfiguraciji izvršen je ciklus od pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm. Koristeći dobivene rezultate provedena je analiza točnosti korištenjem norme za određivanje točnosti i ponovljivosti pozicioniranja.

Konačno, u istoj konfiguraciji, proveden je ciklus od tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm kako bi se utvrdila greška očitavanja mjernog uređaja sa što gušćim razmakom. Dobiveni rezultati pokazuju određeni linearni pomak koji se može pripisati nestabilnosti temperaturnih uvjeta okoliša.

Ključne riječi: interferometar, linearnost, mjerenje duljine, optika, laser, odstupanje

SUMMARY

The topic of this paper is the accuracy verification of a 1D length measurement device up to 3 meters. Such devices are used for calibrating length standards like bar gauges, measuring rings, or long gauge blocks.

The first part of the paper provides a detailed description of the interferometer's operation, the Renishaw ML10 laser interference system, and the method of displacement measurement using linear optics.

In the experimental section, two different measurement setups were considered, meaning different arrangements of measurement optics on the 1D measuring device. Three types of measurements were conducted. The first preliminary measurement was carried out solely as a test measurement to assess the suitability of the initial laser system setup. However, due to the complexity of the measurement process and its duration, this approach proved unsatisfactory and was discarded for this purpose.

In the second measurement configuration, a cycle of five unidirectional measurements with a spacing of 200 mm was performed. Using the obtained results, an accuracy analysis was conducted using the standard for determining accuracy and repeatability of positioning.

Finally, in the same configuration, a cycle of three unidirectional measurements with a spacing of 100 mm was carried out to determine the reading error of the measuring device with a denser spacing. The results obtained indicate a certain linear shift attributed to the instability of environmental temperature conditions.

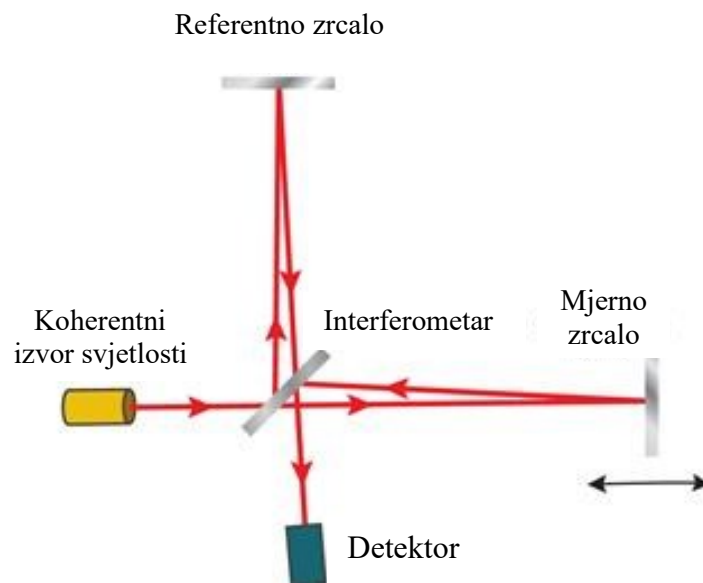
Key words: interferometer, linearity, length measurement, optics, laser, deviation

1 Uvod

Svrha 1D uređaja je mjerenje linearnih dimenzija. Točnost ovih uređaja izravno utječe na kvalitetu i pouzdanost proizvoda i procesa. Pogrešno mjerenje može dovesti do neispravnih proizvoda, ugrožene sigurnosti i financijskih gubitaka. Stoga je osiguravanje točnosti 1D mjernih instrumenata ključni aspekt osiguranja kvalitete. Jedna od pouzdanih tehnika za provjeru točnosti 1D mjernog uređaja je interferometrija. Interferometrija iskorištava principe valne interferencije za procjenu poravnanja i performansi optičkih sustava, nudeći veliko mjerno područje uz visoku razinu točnosti u dimenzijskim mjerenjima.

2 Interferencijski sustav za mjerenje

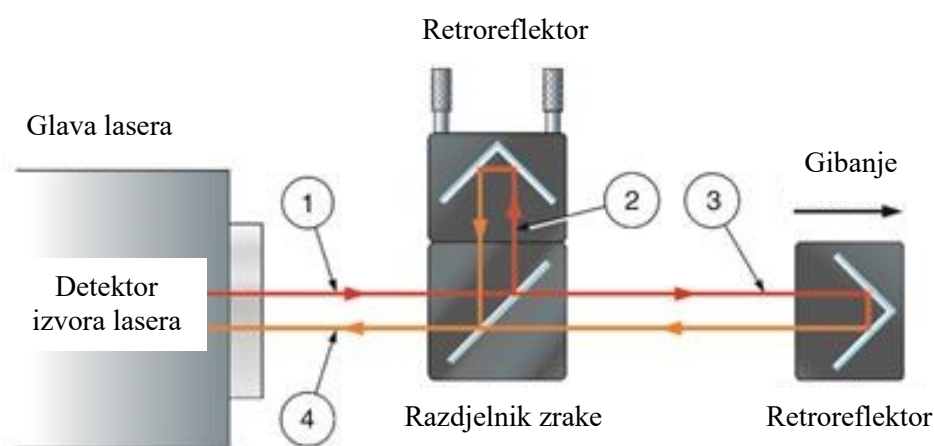
Interferometar je precizni instrument koji se koristi za mjerenje različitih optičkih i fizičkih svojstava, kao što su duljina, kut, valna duljina svjetlosti, brzina i mnoge druge karakteristike. Osnovna ideja interferometrije leži u iskorištavanju pojave interferencije svjetlosnih valova radi dobivanja preciznih mjerenja. Interferencija je fizikalni fenomen koji se javlja kada se dvije ili više valnih zraka susretnu i kombiniraju. Osnovni dijelovi interferometra uključuju izvor svjetlosti, uređaj za podjelu svjetlosnog snopa, referentno i mjerno zrcalo ili objekt te detektor za mjerenje interferencijskog uzorka. Interferometri koriste izvor svjetlosti, obično laser, koji emitira koherentne svjetlosne valove. Koherentnost je bitna karakteristika jer omogućuje preciznu interferenciju valova. Svjetlosni snop iz izvora podijeli se na dva ili više snopova pomoću polupropusnog zrcala ili drugih optičkih elemenata. Ovi podijeljeni snopovi će putovati različitim putanjama prije nego što se ponovno preklope u jedan rezultatni snop zraka. Jedan od snopova je referentni snop koji putuje po poznatoj putanji unutar interferometra. Ovaj snop se obično ne mijenja tijekom mjerenja i služi kao referenca za usporedbu. Preostali podijeljeni snop usmjerava se prema objektu ili uzorku koji se mjeri. Takav snop se reflektira kroz područje koje se želi analizirati i skupno se naziva mjernim snopom. Referentni snop i mjerni snop ponovno se kombiniraju unutar interferometra te kada se susretnu, stvaraju se interferencijski uzorci. Interferencijski uzorci, koji se pojavljuju kao svijetle i tamne pruge, analiziraju se pomoću detektora svjetlosti. Detektor mjeri intenzitet svjetlosti na različitim točkama uzorka i pretvara ga u električni signal koji se dalje obrađuje kako bi se dobile informacije o mjerenoj veličini. To može uključivati analizu promjena u frekvenciji, fazi ili intenzitetu interferencijskog uzorka. Nakon obrade signala, dobiveni podaci se obrađuju kako bi se dobila konačna vrijednost mjerene veličine.



Slika 2.1 Michelsonov interferometar [1]

Početak korištenja načela interferencije svjetlosti za postupak mjerenja može se pripisati Albertu A. Michelsonu 1880-ih godina, obilježenih razvojem prvog interferometra [Slika 2.1]. Michelsonov interferometar sastoji se od djelitelja zraka (djelomično reflektirajuće, poluposrebrano zrcalo) i dva zrcala. Dok svjetlost prolazi kroz poluposrebrano zrcalo ili razdjelnik, dijeli jednu zraku u dvije koje dalje slijede različite optičke putanje odnosno svaka putuje do drugog zrcala – jedna do mjernog, druga do referentnog. Nakon odbijanja od tih zrcala, zrake se rekombiniraju na razdjelniku prije nego što dođu do detektora. Razlika u duljinama ovih dviju zraka uzrokuje faznu razliku. Na detektoru rekombinirane zrake interferiraju, potencijalno proizvodeći konstruktivne ili destruktivne interferencije. Tijekom konstruktivne interferencije, dvije zrake su u fazi, a njihovi se vrhovi međusobno pojačavaju kako bi stvorili svijetli rub. Obrnuto od toga, tijekom destruktivne interferencije, između zraka postoji fazna razlika, pri čemu se vrhovi jedne zrake poništavaju udubljenjima druge zrake, što rezultira tamnim rubom.

Michelsonov interferometar je izvorno koristio konvencionalni izvor svjetlosti, dok suvremeni interferometri koriste lasere. Laserski izvor svjetlosti omogućuje korištenje koherentnih svjetlosnih valova što poboljšava preciznost interferencijskih mjerenja. Za generiranje visoko preciznog interferencijskog uzorka kojeg karakteriziraju svijetli rubovi, prisutnost iznimno stabilnog izvora valne duljine od velike je važnosti. Ovaj stupanj stabilnosti je postignut upotrebom ML-80 lasera. Ključne komponente ML-80 laserskog sustava su par zrcala i djeliteľ snopa koji se koriste unutar interferometra. Zrcala služe kao retroreflektori (uređaj ili površina koja reflektira zračenje natrag na izvor uz minimalno raspršenje) te pokazuju jedinstveno svojstvo odbijanja upadne svjetlosti natrag duž staze usporedne s njezinim izvorom. Jedan od tih retroreflektora je pričvršćen na razdjelnik snopa, čineći tako referentni snop. Drugi reflektor služi kao mjerni snop promjenjive duljine, prilagođavajući svoju udaljenost u odnosu na razdjelnik snopa.



Slika 2.2 XL-80 laser [1]

Optička obrada signala na detektoru omogućuje promatranje interferencije ovih dviju zraka. Pomak mjernog kraka uzrokuje promjenu relativne faze dviju zraka. Ovaj ciklus destruktivne i konstruktivne interferencije uzrokuje cikličku varijaciju intenziteta rekombinirane svjetlosti. Jedan ciklus varijacije intenziteta od svijetlog preko tamnog pa ponovo do svijetlog javlja se svaki put kada se retroreflektor pomakne za 316,5 nm, što je polovica valne duljine lasera. Stoga se pomak mjeri izračunavanjem broja ciklusa pomoću sljedeće formule:

$$d = \frac{\lambda N}{2} \quad (2.1)$$

Gdje je:

- d pomak u mikrometrima;
- λ valna duljina lasera (koja iznosi 0,633 μm);
- N broj prijašnjih rubova.

Da bi se postigla veća razlučivost od 1 nm, koristi se interpolacija unutar ovih ciklusa.

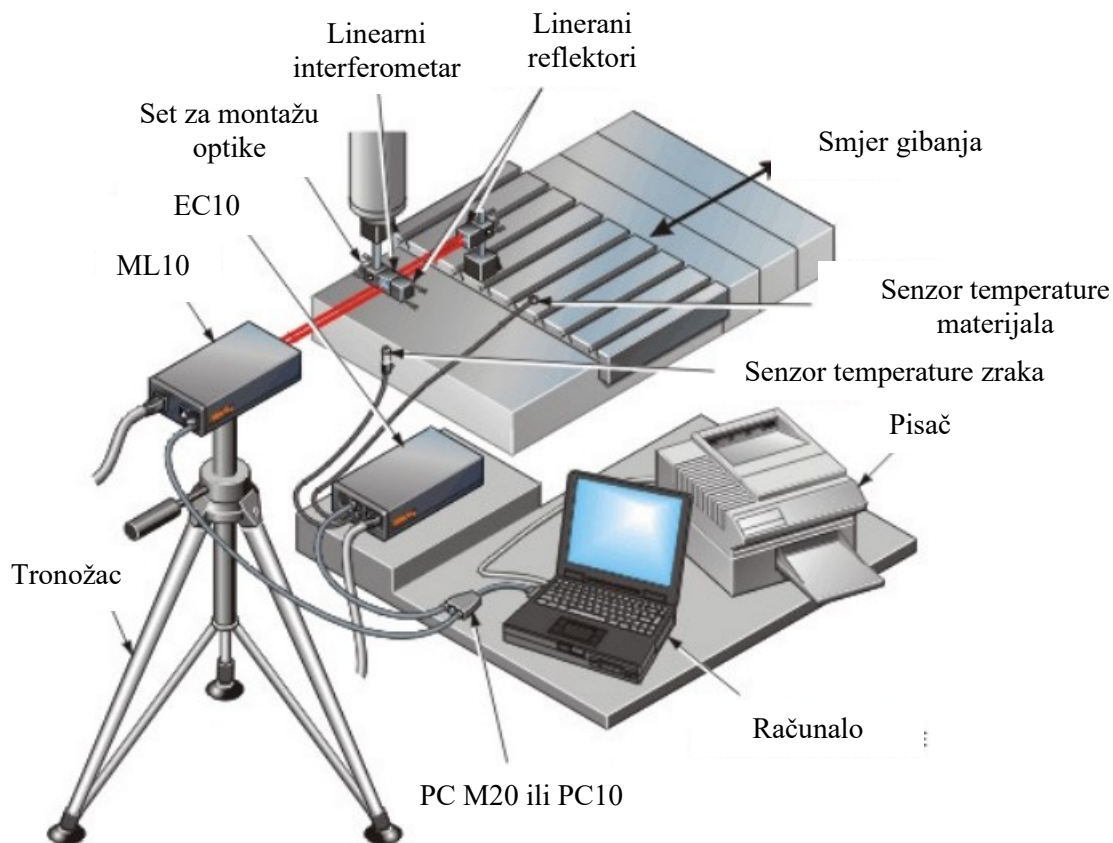
Bez obzira na kvalitetu laserske jedinice, posebice njezinu preciznost i stabilnost, točnost linearnih mjerenja položaja ovisi o poznavanju valne duljine laserske zrake. Na radnu valnu duljinu utječe indeks loma tvari (najčešće zrak) kroz koju se svjetlosna zraka širi koja varira s promjenom temperature, tlaka i vlage. Stoga se moraju izvršiti prilagodbe (kompenzacije) na valnoj duljini laserske zrake kako bi se uzele u obzir promjene u tim parametrima okoliša.

3 Linearno mjerenje duljine

Linearno mjerenje temeljni je proces u područjima znanosti, inženjerstva, građevinarstva, proizvodnje i brojnih drugih industrija. Uključuje određivanje duljine ili udaljenosti između dviju točaka na ravnoj liniji. Točna linearna mjerenja neophodna su za osiguranje kvalitete, sigurnosti i funkcionalnosti različitih proizvoda i sustava. Prije nego što počne sam proces mjerenja, potrebno je obaviti određene pripreme. Najprije se odabire odgovarajući alat za specifičnu primjenu koji ovisi o čimbenicima kao što su duljina ili udaljenost koju treba izmjeriti, potrebna točnost i svojstva predmeta mjerenja. Područje mjerenja treba biti čisto, dobro osvijetljeno i bez ikakvih prepreka ili smetnji koje bi mogle utjecati na točnost mjerenja. Pri korištenju mjernih uređaja ili instrumenata važno je provjeriti i, ako je potrebno, umjeriti instrument odnosno uređaj prije početka mjerenja. Umjeravanje osigurava točna očitavanja instrumenta. Objekt mjerenja mora biti postavljen sigurno i što je ravnije moguće kako bi se spriječilo bilo kakvo pomicanje tijekom mjerenja.

Za uspostavljanje linearnog mjernog sustava prvo se mora pričvrstiti linearni reflektor na razdjelnik snopa pomoću pričvrstnih vijaka. Kako je zraka odbijena od taj reflektor u principu nepromjenjiva, on će se smatrati referentnim reflektorom. Ova kombinacija elemenata naziva se linearni interferometar. Laser ML10 emitira zraku koja ulazi u linearni interferometar, gdje se dijeli na dvije zrake. Referentni snop je usmjeren na reflektor pričvršćen na razdjelnik snopa, dok mjerni snop prolazi kroz razdjelnik snopa do drugog reflektora. Obje zrake se reflektiraju natrag na razdjelnik zrake, gdje se rekombiniraju i usmjeravaju natrag na lasersku glavu. Unutar laserske glave, detektor prati interferenciju između dviju zraka.

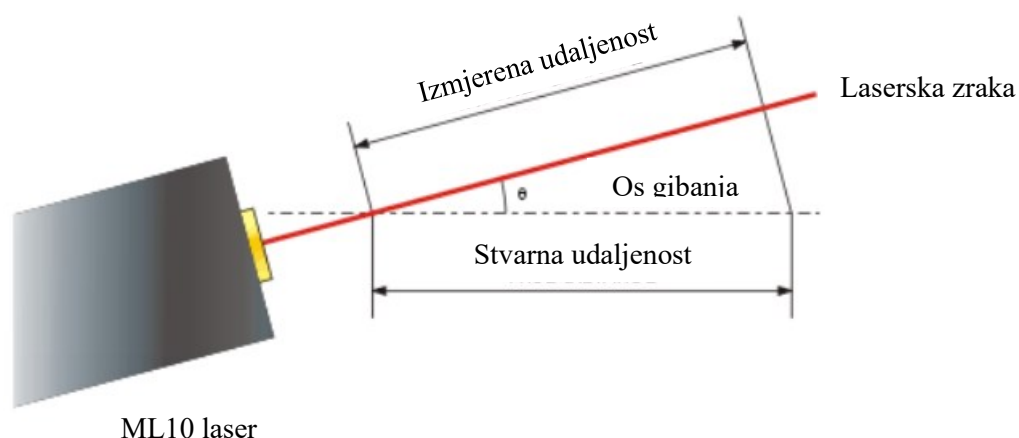
Tijekom linearnih mjerenja jedna optička komponenta ostaje nepomična dok se druga kreće duž linearne osi. U većini slučajeva reflektor je postavljen kao pokretna optička komponenta, a interferometar kao nepokretna komponenta. Mjerenje položaja izvodi se praćenjem promjene razlike između mjernog i referentnog snopa. Bitno je napomenuti da je ovo diferencijalno mjerenje između dviju optičkih komponenti neovisno o položaju lasera ML10. Ovo se mjerenje zatim uspoređuje s očitanjem skale stroja koji se testira kako bi se identificirale sve netočnosti.



Slika 3.1 Tipičan postav linearnog mjernog sustava za mjerenje položaja [2]

Kako bi se povećala preciznost pri linearnom mjerenju, važno je ispravno postaviti sve komponente, posebno kada se koriste laserski interferometri. U području laserske interferometrije ključna su dva optička elementa – retroreflektor i interferometar. Položaj ovih komponenti je strateški, s jednom postavljenom na strani prihvata alata, a drugom na strani prihvata obratka alatnog stroja. Ovakav postav osigurava da laserska zraka emitirana iz laserske glave ostane paralelna s linearnim gibanjem, minimizirajući kosinusne pogreške.

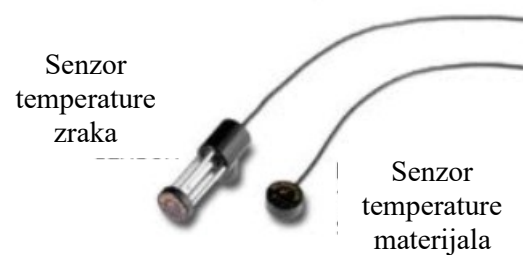
Kosinusna pogreška nastaje kada je putanja laserske zrake pogrešno poravnata u odnosu na os gibanja. Njena prisutnost uzrokuje kutno odstupanje što utječe na točnost u mjerenju na način da rezultira kraćom izmjerenom udaljenošću u usporedbi sa stvarnom udaljenošću. Iznos kosinusne pogreške manifestira se kao razlika između izmjerene udaljenosti i stvarne prijeđene udaljenosti te je proporcionalan je kutu odstupanja između laserske zrake i osi kretanja [Slika 3.2].



Slika 3.2 Kosinusna pogreška [2]

Kako bi se optimizirala točnost laserskih mjerenja, neophodno je poravnati mjernu lasersku zraku tako da ide paralelno s osi kretanja. Postizanje ovog poravnanja je jednostavno na duljim osima. Minimiziranje kosinusne pogreške može se postići maksimiziranjem laserskog očitavanja, tehnikom autorefleksije ili uklanjanjem nagiba tijekom postavljanja sustava za mjerenje pravocrtnosti.

Senzori za zrak, postavljeni duž putanje zrake, igraju ključnu ulogu u kompenzaciji loma zraka. Mjerenjem temperature zraka, tlaka i vlažnosti, ovi senzori pomažu u ispravljanju svih odstupanja uzrokovanih promjenama atmosferskih uvjeta, osiguravajući točnost mjerenja laserskog interferometra. Senzori temperature materijala sastavni su dio korekcije laserskih očitavanja za toplinsko širenje koje može značajno utjecati na točnost mjerenja. Ovi senzori su pričvršćeni na prikladne površine stroja za praćenje reprezentativnih temperatura stroja. Obično se uzima u obzir koeficijent linearnog toplinskog širenja prevladavajućeg materijala na stroju. Ključno je prepoznati da sustavi za numeričko upravljanje reagiraju na temperaturu pretvarača strojne povratne sprege, a ne nužno na ukupnu temperaturu stroja ili stola. U slučajevima kada postoje značajni gradijenti prostorne temperature, moraju se uzeti u obzir dodatni faktori koji doprinose nesigurnosti u procjeni točnosti strojno obrađenog dijela. Ovo naglašava važnost razumijevanja i uzimanja u obzir temperaturnih razlika kako bi se povećala pouzdanost mjerenja laserske interferometrije.



Slika 3.3 Senzor temperature zraka i senzor temperature materijala [2]

4 Oprema korištena za izvedbu mjerenja

4.1 Renishaw ML10

Kao mjerni sustav za izvedbu postupka mjerenja upotrebom efekta interferencije korišten je laserski interferometar Renishaw ML10 [Slika 4.1]. Naime riječ je o instrumentu koji igra ključnu ulogu u osiguravanju preciznosti i točnosti u linearnim mjerenjima, pridonoseći kontroli kvalitete i optimizaciji performansi strojeva i mehaničkih sustava.

ML10 radi na principu interferometrije, koristeći interferenciju stabiliziranog He-Ne laserskog svjetla. Primarna funkcija ML10 je linearno mjerenje, što omogućuje mjerenje linearnih pomaka s iznimnom točnošću velikog mjernog područja. Točnost je bitno svojstvo opreme u primjenama gdje je precizno pozicioniranje ključno, kao što je npr. umjeravanje mjernih uređaja ili mjerenje točnosti alatnih strojeva.

ML10 sustav uključuje opremu za pojednostavljenje procesa poravnanja. Laserska zraka može se podesiti izvana pomoću kotačića na postolju stativa, što omogućuje precizno poravnanje bez složenih podešavanja unutar stroja.

Da bi mjerenja bila upotpunjena, ML 10 nerijetko se koristi u kombinaciji s namjenskim softverom za prikupljanje i analizu podataka. Ova integracija poboljšava mogućnosti interferometra, pružajući detaljan uvid u linearna mjerenja.



Slika 4.1 Laser Renishaw ML10

Jedinica za kompenzaciju okoline EC10 [Slika 4.2] mjeri varijacije temperature zraka, tlak zraka i relativne vlažnosti. Ova kompenzacija je bitna za održavanje točnosti mjerenja, posebno u linearnim primjenama gdje indeks loma zraka može prouzročiti pogreške pri mjerenjima. Jedna izvanredna značajka EC10 je njegova sposobnost povezivanja s do tri senzora materijala, koji mjere temperaturu stroja. Unosom odgovarajućeg koeficijenta toplinskog širenja materijala u softver, ovi senzori omogućuju normalizaciju mjerenja na standardiziranu temperaturu stroja od 20 °C. To osigurava dosljednost u mjerenjima, kompenzirajući toplinsko širenje materijala i doprinoseći ukupnoj točnosti laserskog mjeriteljskog sustava.



Slika 4.2 Jedinica za kompenzaciju okoline EC10

Senzor temperature zraka priključen na EC10 dizajniran je za optimalnu izvedbu kroz pažljivo pozicioniranje. Postavljen je na cilindrično postolje s magnetskom bazom što omogućava pričvršćivanje na stroj, baznu ploču Renishaw kompleta za montažu ili montažni stup. Kako bi se osigurala točna mjerenja, senzor treba postaviti u neposrednoj blizini mjerne putanje laserske zrake, po mogućnosti otprilike na pola puta duž osi kretanja. Treba izbjegavati postavljanje senzora u blizini bilo kakvih izvora topline kao što su npr. motori ili na hladnom propuhu jer ti čimbenici mogu dovesti do netočnosti. Za mjerenja duž dugih osi postoji mogućnost javljanja temperaturnih gradijenata stoga je neophodno procijeniti promjene temperature zraka. Ako temperatura oscilira za više od 1 °C duž osi, preporučuje se korištenje ventilatora za cirkulaciju zraka.

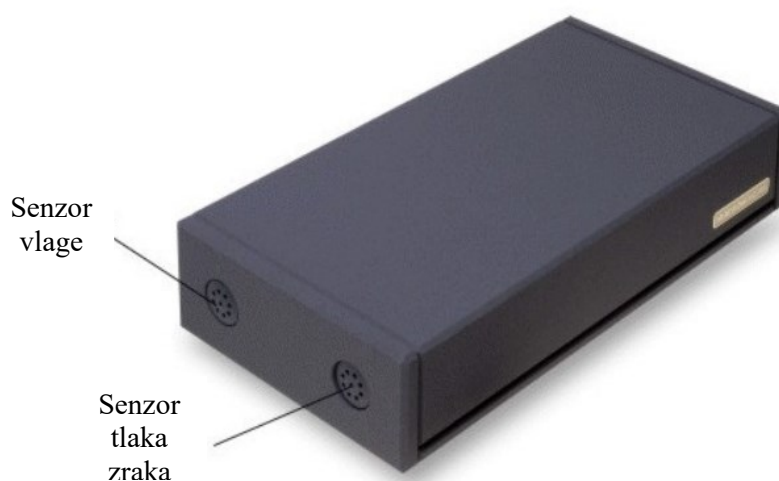
Senzor temperature materijala priključen na EC10 posjeduje robusnu magnetsku bazu za sigurno pričvršćivanje na stroj koji se testira. Bitno je osigurati dobar toplinski kontakt između

senzora i materijala koji se mjeri. Namjena senzora je procijeniti linearnu točnost pozicioniranja koja se može postići u ambijentalnom okruženju od 20 °C u kontroliranim uvjetima.



Slika 4.3 Senzori temperature zraka i materijala postavljeni na mjerni uređaj

Za razliku od senzora temperature zraka i materijala, **senzori tlaka i vlage** integrirani su u jedinicu EC10. Ove senzore nije potrebno postaviti u neposrednu blizinu putanje laserske zrake. To je zato što bi značajne pogreške mjerenja mogle izazvati velike varijacije u tlaku i vlažnosti, a treba postojati minimalna varijacija u radnom području. Ipak, treba obratiti pozornost na senzor relativne vlažnosti, koji treba postaviti dalje od izvora topline ili propuha.



Slika 4.4 Senzori tlaka i vlage zraka [2]

EC10 nudi fleksibilnost u kompenzaciji okoline kroz tri različite metode:

1) **Automatska kompenzacija okoline** robusna je značajka koja koristi jedinicu EC10 za automatsku kompenzaciju laserske valne duljine i toplinske ekspanzije materijala. Ovaj metoda posebno se preporučuje u okruženjima u kojima će atmosferski uvjeti vjerojatno varirati tijekom testiranja. Za pokretanje automatske kompenzacije, jedinica EC10 je spojena na karticu sučelja PC10/PCM20 pomoću kabela podatkovne veze. Senzori temperature zraka i materijala zatim se spajaju na odgovarajuće utičnice na stražnjoj strani EC10. Ovom metodom moguće je kontinuirano praćenje okolišnih uvjeta tijekom procesa mjerenja. EC10 se autonomno prilagođava promjenama temperature zraka, tlaka i vlažnosti, pružajući kompenzaciju u stvarnom vremenu tijekom mjerenja.

2) **Ručna kompenzacija okoline** omogućuje EC10 kontinuirano očitavanje senzora i ažuriranje vrijednosti na ekranu, ali faktor okoline ažurira se samo nakon ručne naredbe. Ručni način je koristan za umjeravanje osi stroja gdje prisutno kontinuirano toplinsko širenje utječe na njegove dimenzije. Ova metoda osigurava da su svi toplinski učinci koji se javljaju tijekom umjeravanja uključeni u statističku analizu točnosti i ponovljivosti.

3) **Kompenzacija korištenjem ručno unesenih podataka** odvija se bez upotrebe EC10 jedinice postupkom očitavanja temperature zraka, tlaka i vlažnosti sa zasebnih instrumenata. Očitani podaci se ručno unose u sustav gdje softver za snimanje linearnih podataka zatim izračunava faktor okoliša koji se zatim primjenjuje na izmjerene vrijednosti. Iako ručna kompenzacija nudi fleksibilnost, često je nepraktično ažurirati kompenzaciju zbog inherentne ručne prirode procesa.

4.2 Linearna mjerna optika

Linearna mjerna optika [Slika 4.5] za navedeni laserski sustav sastoji se od razdjelnika laserske zrake (eng. *beam-splitter*), dva linearna reflektora te dvije mete (eng. *target*) za pomoć pri optičkom poravnanju čija je uloga uspostavljanje preciznosti i točnosti pri interferometrijskim mjerenjima.



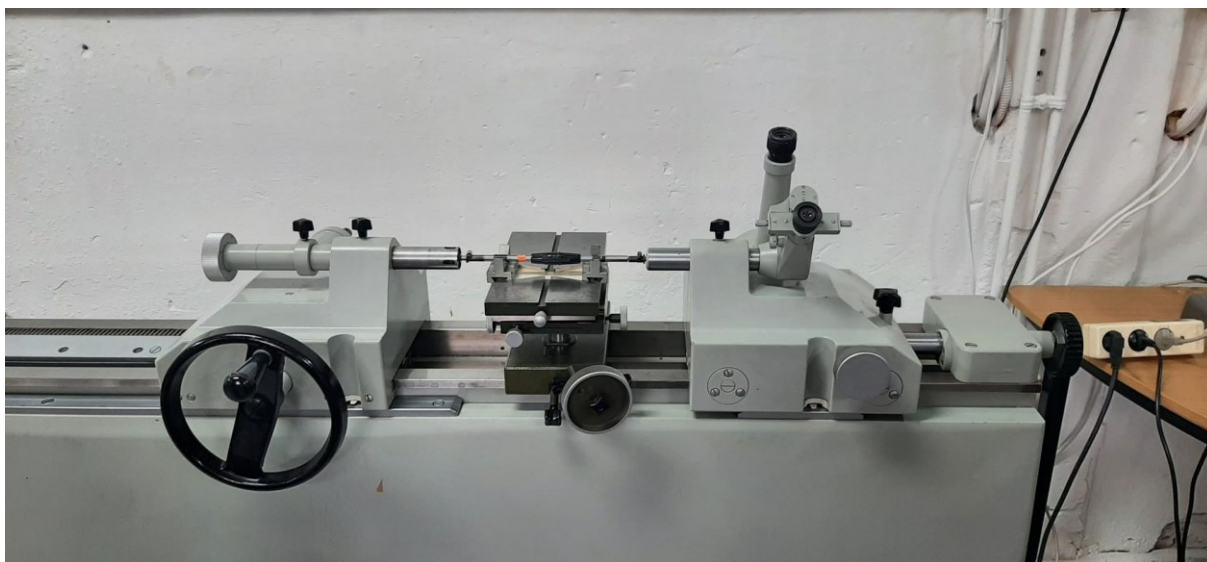
Slika 4.5 Linearna mjerna optika [2]

Razdjelnik zrake odnosno snopa služi za, kako mu ime kaže, podjelu ulazne laserske zrake na dva koherentna kraka. Kako je spomenuto ranije, jedna od te dvije zrake služi kao stabilna referenca, dok se na drugoj vrše mjerenja. Dva linearna reflektora refleksijom usmjeravaju te dvije podijeljene zrake prema meti te ih zatim vraćaju natrag na razdjelnik snopa. Svrha tih dviju meta jest pomoći u točnom poravnanju komponenti, osiguravajući da zrake prate unaprijed predodređene putanje na način da minimiziraju moguću neusklađenost koja bi mogla dovesti do pogrešaka u mjerenjima, dok je pozicioniranje reflektora temelj točnosti linearnih mjerenja.

Za učinkovitu montažu linearne optike, neophodna je upotreba kompleta za montažu optike i odgovarajuće stezaljke namijenjene za pričvršćivanje optike na stroj na kojem se vrše mjerenja. Montažni stupovi igraju ključnu ulogu u ovom procesu, služeći kao pričvršne točke za linearni interferometar i linearni reflektor. Oni se pričvršćuju na stroj pomoću blokova magnetskih stezaljki i/ili čeličnih ploča. Na ovaj način se smanjuje rizik od vibracija ili neželjenog pomicanja komponenti što bi moglo ugroziti točnost mjerenja.

4.3 Uređaj za mjerenje duljine

Uređaj na kojem će se provesti mjerenja i provjeriti točnost jest uređaj za mjerenje duljina do 3000 mm. Ključni dijelovi uređaja za mjerenje su kolica (na slici lijevo) i mjerna glava (na slici desno).



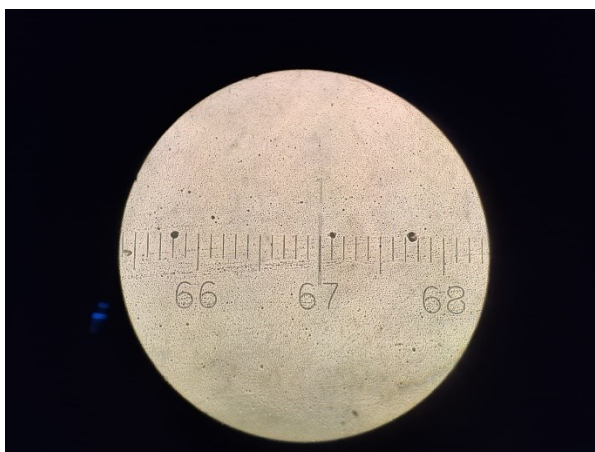
Slika 4.6 Kolica (lijevo) i mjerna glava (desno) na uređaju za mjerenje duljine

Kolica se pokreću okretnim kolom s ručicom te se translirira odnosno „klizi“ duž osi velike mjerne skale od početnih 0 do maksimalnih 3000 mm. Kolicima se može ugrubo postaviti ili izmjeriti određena duljina, no za preciznije očitavanje koriste se optički sustavi smješteni na mjernoj glavi.



Slika 4.7 Kolica grubo pozicionirana na vrijednost od 200 mm

Mjerna glava posjeduje skalu s vrijednostima od 0 do 100 mm. S bočne strane uređaja nalazi se ručica čijim je zakretanjem moguće pomicati mjernu glavu čime se pomiče i vrijednost na skali. Ovo je pogodno u slučaju kada treba namjestiti vrijednost odnosno umjeriti ju na način da ju se dovede na nulu kako bi se željena dimenzija finije pozicionira. Optički sustav montiran na mjernu glavu služi za fino pozicioniranje te se pomoću njega mogu očitati prve dvije decimalne postignute pozicije.



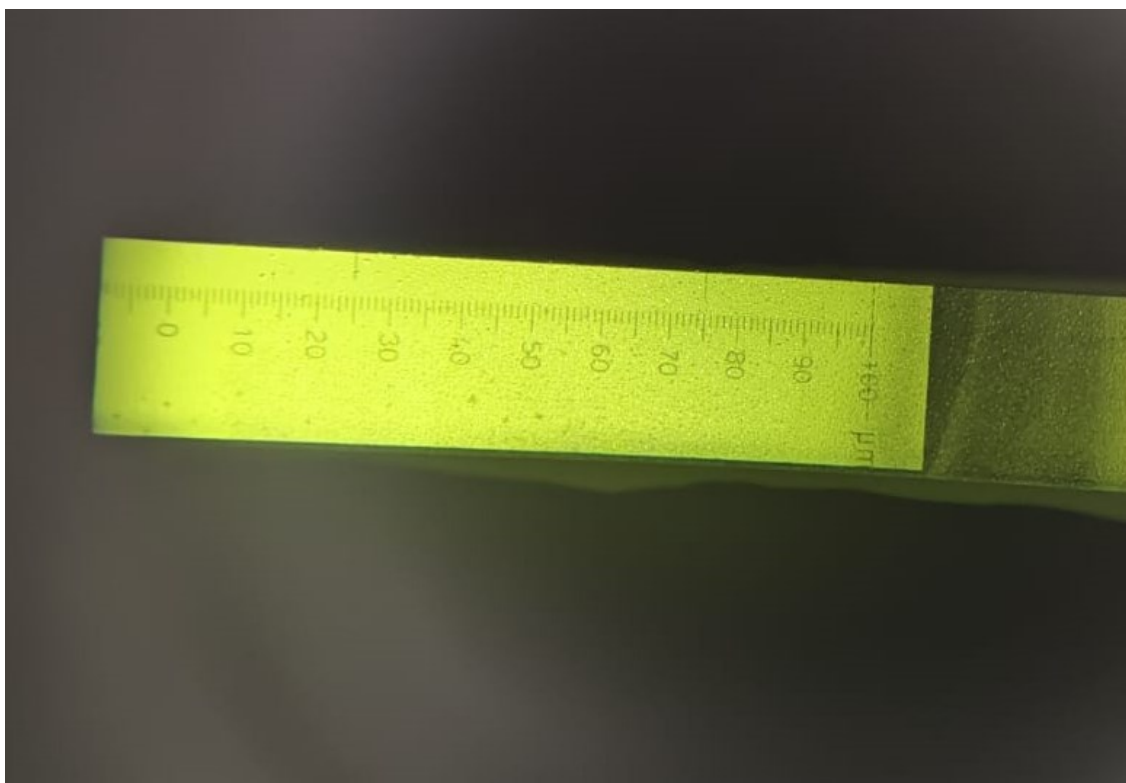
Slika 4.8 Očitavanje optičkog sustava za fino pozicioniranje u iznosu od 0,67 mm

Takvo očitavanje je moguće kada se na kolica u određeni utor postavi funkcionalna svjetiljka. Velika mjerna skala s jedne strane prikazuje brojeve, a s druge strane nalaze se prozorčići koji služe za određivanje decimala pri finijem očitavanju. Prolaskom svjetlosti svjetiljke kroz te prozorčice se prikazuje skala na optičkom sustavu.



Slika 4.9 Numerička vrijednost velike mjerne skale (dolje) i optički prozorčić (gore)

Za najfinije pozicioniranje na mjernu glavu moguće je ugraditi dodatni optički sustav s ticalom. Ticalo je moguće prisloniti na predmet mjerenja te se ono uvlači i izvlači čime se i najmanji pomak manifestira na mjernoj skali ovog optičkog sustava koja ima raspon od $-100\ \mu\text{m}$ do $+100\ \mu\text{m}$ te se tako mogu očitati izmjerena treća i četvrta decimala. Kao i na drugom optičkom sustavu, potrebno je priključiti rasvjetu koja će osvijetliti mjernu skalu.

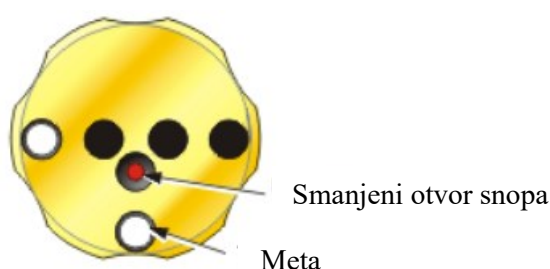


Slika 4.10 Očitanje optičkog sustava za najfinije pozicioniranje s odstupanjem od $+100\ \mu\text{m}$

5 Provedba mjerenja

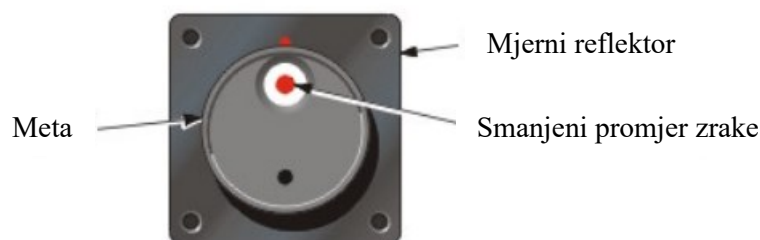
Postizanje preciznih optičkih mjerenja zahtijeva precizno pozicioniranje i poravnavanje ključnih komponenti kao što su linearni interferometar i reflektor. Proces pozicioniranja počinje postavljanjem lasera na tronožac tako da je normalno usmjeren prema mjernoj optici. Laser je za početak grubo poravnat s osi kretanja. Ovaj početni postav postavlja temelje za sljedeće korake poravnanja.

Kako bi se poboljšala vidljivost tijekom poravnanja, laserski zatvarač se okreće kako bi emitirao zraku smanjenog promjera što olakšava lakše otkrivanje bilo kakvog odstupanja tijekom procesa.



Slika 5.1 Laserski zatvarač sa zrakom smanjenog promjera [2]

Mjerni reflektor se zatim primakne laseru, s metom postavljenom na prednjoj strani i bijelom točkom na vrhu. Stroj se podešava sve dok laserska zraka precizno ne pogodi bijelu točku na meti. Važno je da u ovoj fazi linearni interferometar ne bi trebao biti postavljen između lasera i mjernog reflektora.



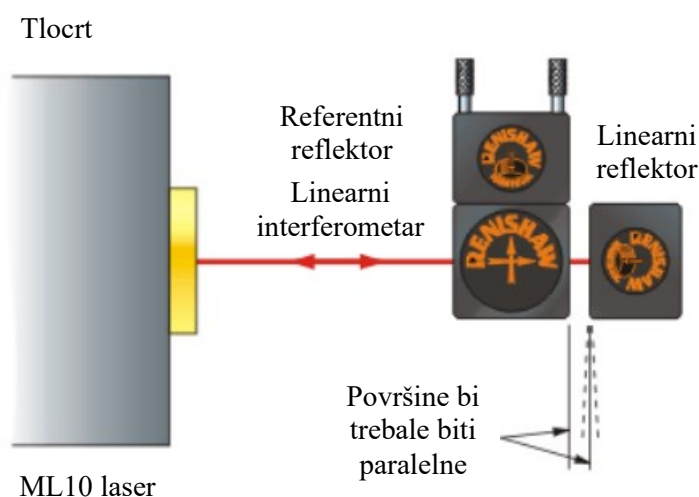
Slika 5.2 Mjerni reflektor poklopljen s metom [2]

Meta se uklanja, a zraka vraćena iz reflektora provjerava se kako bi se osiguralo da pogađa središte zatvarača ML10. Svako odstupanje od središta rješava se translacijom ili lasera ili stroja dok se zraka ne poravnata sa središtem mete.



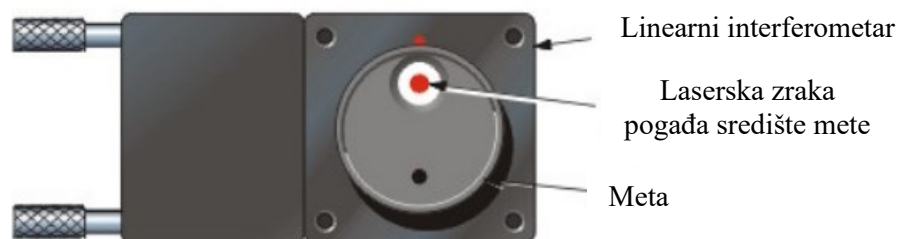
Slika 5.3 Laserska zraka odbijena od mjernog reflektora nazad na zatvarač [2]

Nakon što je utvrđeno da je zraka ispravno centrirana, postavlja se linearni interferometar što je moguće bliže reflektoru, što omogućuje naknadna podešavanja zrake finim podešavanjem laserske glave. Ključno je osigurati da su vanjske strane interferometra i reflektora poravnate u odnosu na stroj te da su i međusobno poravnate.



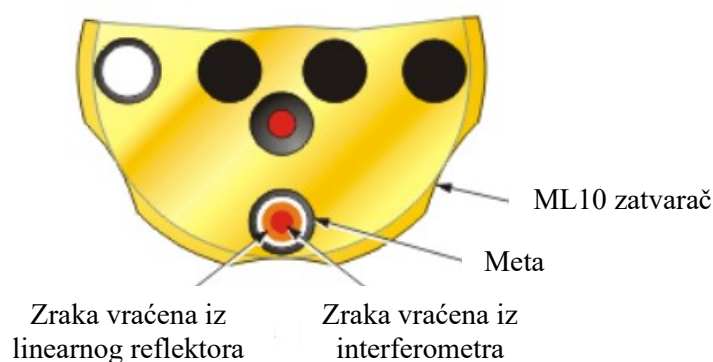
Slika 5.4 Pozicioniranje linearnog interfeometra u odnosu na mjerni reflektor [2]

Meta se postavlja na ulazni otvor interferometra, a podešavanja se vrše vertikalno i horizontalno kako bi se osiguralo da laserska zraka precizno pogađa metu. Ovaj korak je ključan za konačnu provjeru vraćene zrake iz interferometra za koju se provjerava da pogađa središte ML10 zatvarača na vrhu zrake vraćene iz retroreflektora.



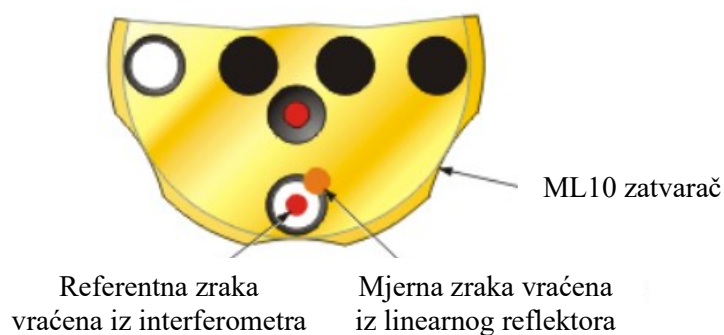
Slika 5.5 Linearni interferometar poklopljen s metom [2]

Meta se uklanja s interferometra te se provjerava pogađa li vraćena zraka iz interferometra središte na zatvaraču kao i zraka vraćena iz mjernog zrcala. Drugim riječima, trebale bi se preklapati. Za postupak poravnanja zraka može biti korisno blokirati zraku koja se vraća iz reflektora postavljanjem prepreke između interferometra i reflektora. To omogućuje bolju procjenu vraćene zrake iz interferometra dodatno poboljšavajući točnost poravnanja.



Slika 5.6 Laserska zraka odbijena od linearnog interferometra nazad na zatvarač [2]

Proces laserskog poravnanja u linearnim optičkim sustavima započinje pokretanjem stroja duž osi kretanja, uzrokujući odmicanje reflektora od interferometra. Stroj se zaustavlja kada jedna od zraka počne odstupati od središta na zatvaraču ML10.



Slika 5.7 Odstupanje odbijene mjerne zrake u odnosu na referentnu [2]

Podešavanje laserske glave vrši se pomoću kotačića čime se vertikalno poravnanje zrake postiže podešavanjem visine laserske glave, a horizontalno poravnanje zakretanjem glave u lijevo ili u desno.



Slika 5.8 Vertikalno podešavanje snopa [2]



Slika 5.9 Horizontalno podešavanje snopa [2]

Riječ je o procesu iterativne prirode, pri čemu se stroj kreće duž osi sve dok laserske zrake ne ostanu konstantno u središtu mete. Stroj se kreće kako bi se mjerni i referentni reflektor međusobno približili što omogućuje daljnje prilagodbe laserskog poravnanja. Posebna pozornost pridaje se problemima s bočnim pomakom uzrokovanim retroreflektorom, koji se rješava pomicanjem gore/dolje i lijevo/desno dok se vraćeni snop ne preklopi sa snopom

interferometra na meti zatvarača. Kada se laserska zraka poravna s osi kretanja stroja, zatvarač je potrebno zakrenuti u njegov položaj za mjerenje.



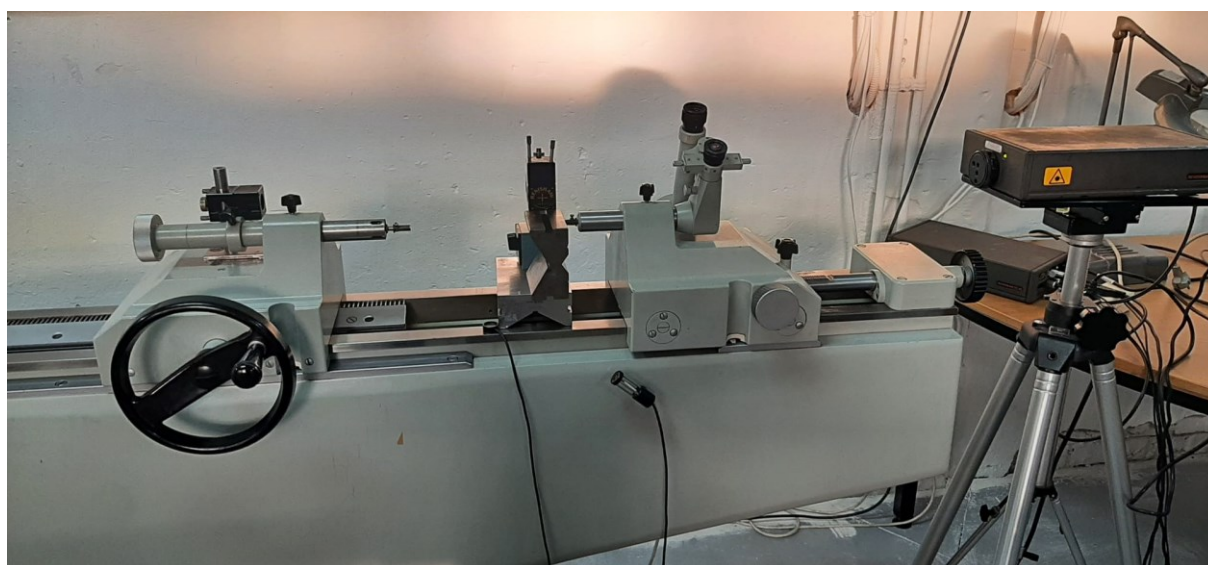
Slika 5.10 Laserski zatvarač zakrenut u položaj za mjerenje [2]

Osim samog poravnanja laserske zrake, bitno je obratiti pažnju na jačinu signala prikazana u softveru za linearno bilježenje podataka koja se provjerava dok se retroreflektor pomiče preko cijele duljine stroja. Nakon što je zraka uspješno namještena i jačina signala osigurana, u softveru se briše pogreška ometanja laserske zrake (eng. *Beam obstruct*). Također, prilikom mjerenja laserska zraka se nikako ne smije omesti odnosno prekinuti inače se cijeli postupak i namještanja sustava i mjerenja mora ponoviti ispočetka.

Proces usklađivanja završava aktivacijom kompenzacije okoline, gdje se točan koeficijent rastezanja materijala unosi u softver što dodatno poboljšava točnost linearnog mjerenja koje može započeti.

5.1 Preliminarno mjerenje

Kod preliminarnog mjerenja na mjernu glavu će se postaviti optički sustav s ticalom. Pred ticalo se stavljaju prizme koje sprječavaju pomak ticala odnosno njegovo izvlačenje i uvlačenje. Kao početna pozicija mjerenja uzet će se 200 mm namještenih na mjernoj skali stroja koje će ujedno biti početna točka mjerenja lasera. Optički sustav za fino očitavanje pomaka kolica potrebno je pomoću okretne ručice pri svakom mjerenju vratiti u nulu.



Slika 5.11 Konfiguracija preliminarnog mjerenja

Zakretanjem kola, kolica se skupa s mjernim zrcalom linearno pomiču duž osi stroja do sljedeće okrugle vrijednosti očitane interferometrom pričvršćenim na mjernu glavu pomoću magneta. Iz tog razloga odlučeno je da će se pomicati za svakih 400 mm jer je ovaj proces iziskivao puno vremena i bilo je teško namjestiti uređaj. Nakon što su svi navedeni dijelovi uređaja podešeni, iz optičkog sustava za najfinije pozicioniranje očitavalo se odstupanje u mikrometrima. Kao završna vrijednost odnosno konačna pozicija mjerenja je odabrana nazivna vrijednost velike mjerne skale iznosa 2600 mm. Kada je ta vrijednost dosegnuta, isti postupak mjerenja se primjenjivao u suprotnom smjeru prema početnoj vrijednosti iznosa 200 mm na skali odnosno 0 mm prema interferometru. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici.

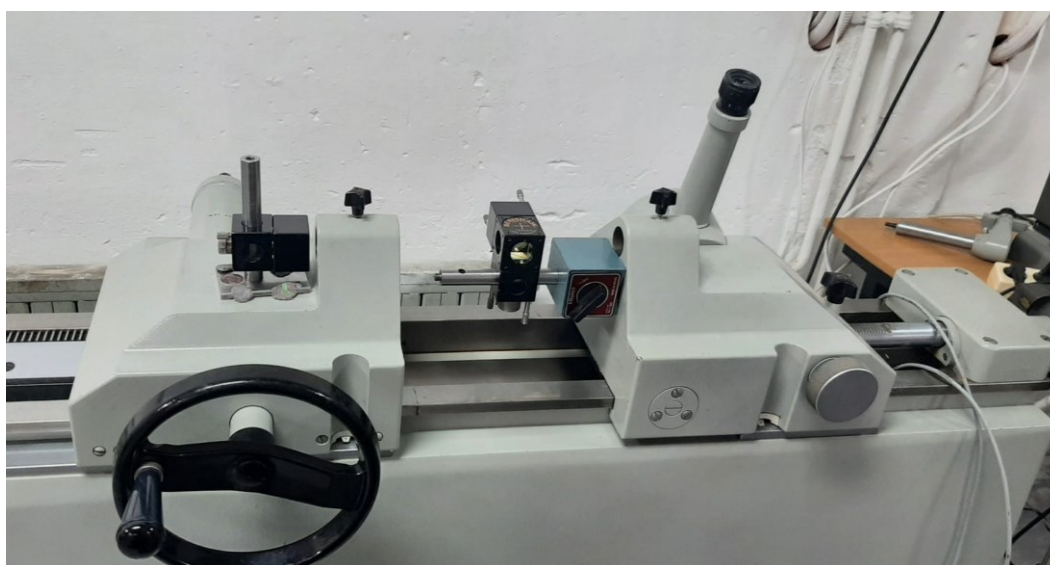
Tablica 5.1 Očitana odstupanja preliminarnog mjerenja

Nazivna vrijednost	Vrijednost izmjerena interferometrom	Mjerenje u pozitivnom smjeru		Mjerenje u negativnom smjeru		Razlika	
		<i>Očitano odstupanje u μm</i>	<i>Očitano odstupanje u mm</i>	<i>Očitano odstupanje u μm</i>	<i>Očitano odstupanje u mm</i>	<i>Razlika u μm</i>	<i>Razlika u mm</i>
200	0	0	0	-3	-0,003	-3	-0,003
600	400,0001	11	0,011	14	0,014	3	0,003
1000	800,0001	22	0,022	24	0,024	2	0,002
1400	1200,0000	35	0,035	39	0,039	4	0,004
1800	1600,0000	50	0,050	53	0,053	3	0,003
2200	2000,0000	67	0,067	67	0,067	0	0
2600	2400,0000	80	0,080	80	0,080	0	0

Ovaj postupak je dugotrajan i zamoran. Komplicirano je dovesti grubim pomakom kolica očitavanje laserom izmjerene vrijednosti točno na nulu. Postupak je dugotrajan te je teško zadržati istu temperaturu okoliša za vrijeme trajanja ovog mjernog postupka. Također, problem pri ovakvom mjerenju mogu predstavljati vibracije što remeti točnost i preciznost mjerenja. Iz tog razloga ovakav način mjerenja će se odbaciti te će se primijeniti drugačija konfiguracija u kojoj se i interferometar i mjerni retroreflektor gibaju.

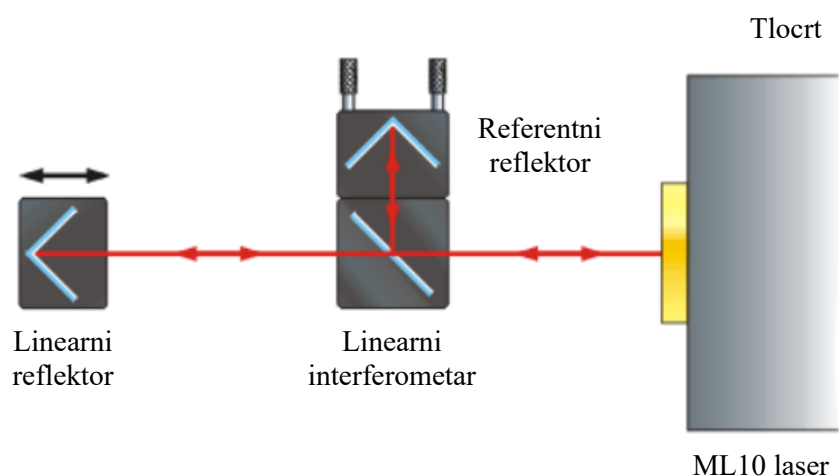
5.2 Pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm

Za provedbu ovakvog mjerenja, uklanja se optički sustav s ticalom jer je nepotreban za ovakav način mjerenja. Kako je navedeno u prethodnom odlomku, postavit će se konfiguracija linearnog mjerenja na način da će se linearni interferometar pomoću magneta pričvrstiti za mjernu glavu te će na taj način imati omogućeno kretanje. S druge strane, mjerni reflektor će se učvrstiti na kolica kako bi se skupa s njima translahirao po mjernoj skali, ali da bude dobro pričvršćen kako pomaci i vibracije ne bi ugrozili odbijanje zrake što bi u konačnici dalo krive rezultate mjerenja. Opisana konfiguracija prikazana je slikom [Slika 5.12]. Laserska zraku, uklanjanjem optičkog sustava s ticalom, sada je bilo moguće dovesti u os mjerenja 1D mjernog uređaja.



Slika 5.12 Konfiguracija 5 jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm

Sustav prolaska laserske zrake kroz linearni interferometarski sustav prikazan je slikom [Slika 5.13].



Slika 5.13 Sustav prolaska laserske zrake kroz linearni interferometar [2]

Kolica se postave u 0 mm te se vrijednost na skali optičkog sustava također podesi na nulu. Nakon toga se u programu mjerenje lasera također postavlja na nulu što označava početak mjerenja interferometra. Nakon obavljanja svih prethodno navedenih koraka se može započeti s procesom mjerenja. Vršiti se niz jednosmjernih mjerenja približavanjem do ciljane pozicije iznosa 2800 mm u razmaku od po 200 mm. U obzir nije uzeta maksimalna vrijednost mjerne skale stroja iznosa 3000 mm iz razloga što se mjerni reflektor nije mogao postaviti na način da može ispravno odbiti zraku da bi se moglo izvršiti mjerenje od krajnje točke prema početnoj. Kada se dosegla maksimalna vrijednost od 2800 mm, isti princip jednosmjernog pozicioniranja se primijenio na način da se odmiče od konačne pozicije prema početnoj odnosno prema 0 mm. Ovako opisan proces proveden je 5 puta i tablično prikazana mjerenja slijede u nastavku.

Prilikom svakog od mjerenja zabilježene su temperature stroja koje su bitne za korekciju izmjerene duljine zbog toplinskog istezanja materijala. Taj postupak opisan je u poglavlju 6.2.

- Temperatura pri prvom mjerenju: 19,47 °C
- Temperatura pri drugom mjerenju: 19,54 °C
- Temperatura pri trećem mjerenju: 19,54 °C
- Temperatura pri četvrtom mjerenju: 19,58 °C
- Temperatura pri petom mjerenju: 19,61 °C

Tablica 5.2 Prvo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm

Nazivna vrijednost	Prvo mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0000	0,0187	0,0000	0,0187
200	199,9978	200,0154	-0,0022	0,0154
400	399,9938	400,0080	-0,0062	0,0080
600	599,9909	600,0080	-0,0091	0,0080
800	799,9897	799,9996	-0,0103	-0,0004
1000	999,9865	999,9942	-0,0135	-0,0058
1200	1199,9840	1199,9930	-0,0161	-0,0066
1400	1399,9780	1399,9880	-0,0220	-0,0122
1600	1599,9790	1599,9860	-0,0213	-0,0144
1800	1799,9740	1799,9810	-0,0260	-0,0190
2000	1999,9700	1999,9780	-0,0300	-0,0223
2200	2199,9660	2199,9730	-0,0344	-0,0275
2400	2399,9640	2399,9670	-0,0365	-0,0331
2600	2599,9600	2599,9620	-0,0402	-0,0385
2800	2799,9560	2799,9560	-0,0439	-0,0445

Tablica 5.3 Drugo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm

Nazivna vrijednost	Drugo mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0001	0,0008	0,0001	0,0008
200	199,9962	199,9984	-0,0038	-0,0016
400	399,9939	399,9937	-0,0061	-0,0063
600	599,9911	599,9914	-0,0089	-0,0086
800	799,9884	799,9882	-0,0116	-0,0118
1000	999,9870	999,9857	-0,0130	-0,0143
1200	1199,9839	1199,9849	-0,0161	-0,0151
1400	1399,9801	1399,9795	-0,0199	-0,0205
1600	1599,9775	1599,9779	-0,0225	-0,0221
1800	1799,9735	1799,9723	-0,0265	-0,0277
2000	1999,9704	1999,9708	-0,0296	-0,0292
2200	2199,9668	2199,9665	-0,0332	-0,0335
2400	2399,9633	2399,9635	-0,0367	-0,0365
2600	2599,9604	2599,9610	-0,0396	-0,0390
2800	2799,9579	2799,9573	-0,0421	-0,0427

Tablica 5.4 Treće jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm

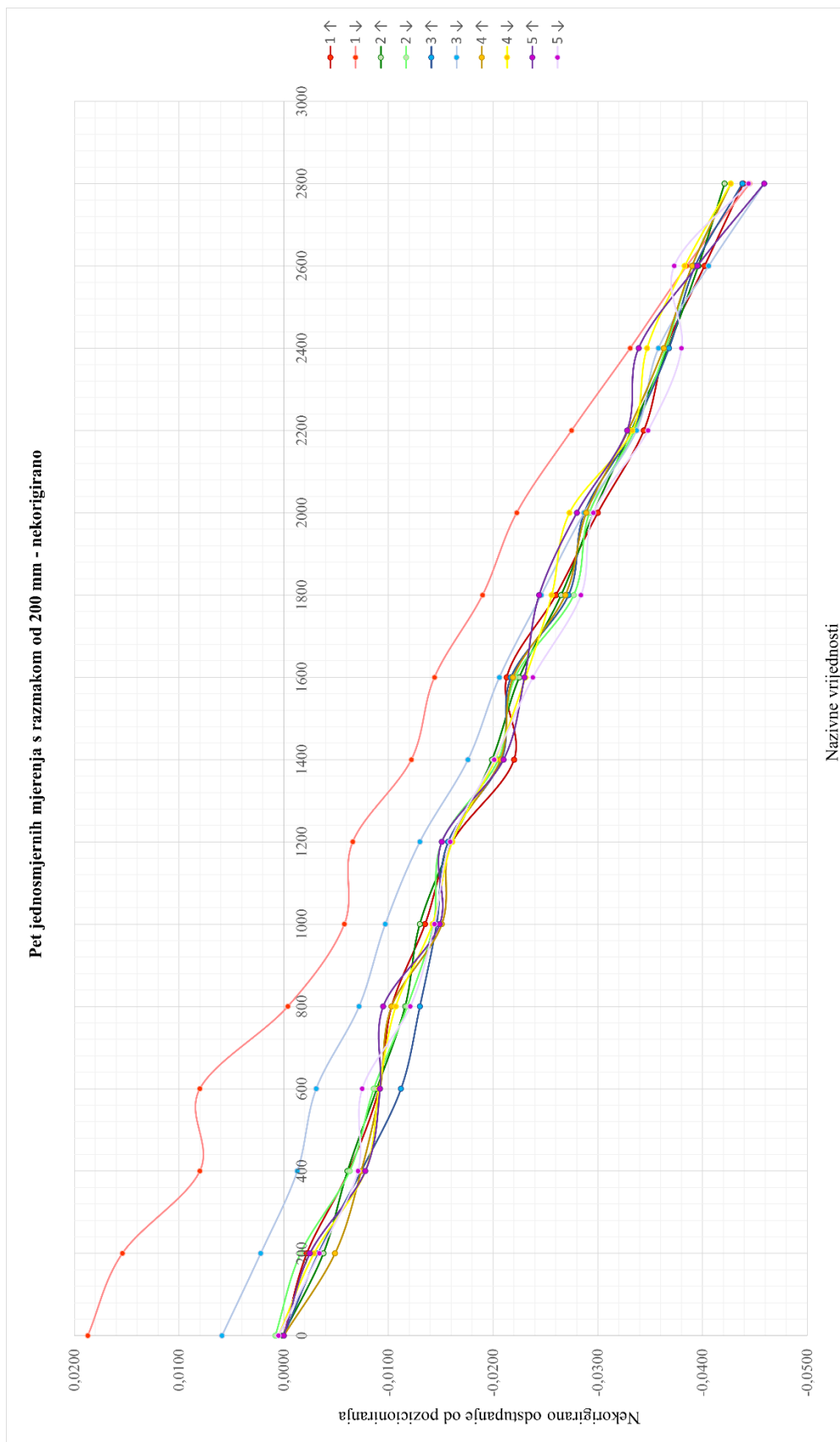
Nazivna vrijednost	Treće mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0000	0,0059	0,0000	0,0059
200	199,9967	200,0022	-0,0033	0,0022
400	399,9926	399,9987	-0,0074	-0,0013
600	599,9888	599,9969	-0,0112	-0,0031
800	799,9870	799,9928	-0,0130	-0,0072
1000	999,9854	999,9903	-0,0146	-0,0097
1200	1199,9843	1199,9870	-0,0157	-0,0130
1400	1399,9792	1399,9824	-0,0208	-0,0176
1600	1599,9783	1599,9794	-0,0217	-0,0206
1800	1799,9728	1799,9754	-0,0272	-0,0246
2000	1999,9713	1999,9713	-0,0287	-0,0287
2200	2199,9667	2199,9663	-0,0333	-0,0337
2400	2399,9632	2399,9642	-0,0368	-0,0358
2600	2599,9607	2599,9594	-0,0393	-0,0406
2800	2799,9562	2799,9541	-0,0438	-0,0459

Tablica 5.5 Četvrto jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm

Nazivna vrijednost	Četvrto mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0000	0,0005	0,0000	0,0005
200	199,9951	199,9971	-0,0049	-0,0029
400	399,9926	399,9922	-0,0074	-0,0078
600	599,9908	599,9909	-0,0092	-0,0091
800	799,9897	799,9893	-0,0103	-0,0107
1000	999,9849	999,9858	-0,0151	-0,0142
1200	1199,9841	1199,9839	-0,0159	-0,0161
1400	1399,9793	1399,9798	-0,0207	-0,0202
1600	1599,9781	1599,9769	-0,0219	-0,0231
1800	1799,9731	1799,9744	-0,0269	-0,0256
2000	1999,9711	1999,9727	-0,0289	-0,0273
2200	2199,9671	2199,9667	-0,0329	-0,0333
2400	2399,9637	2399,9653	-0,0363	-0,0347
2600	2599,9610	2599,9617	-0,0390	-0,0383
2800	2799,9573	2799,9573	-0,0427	-0,0427

Tablica 5.6 Peto jednosmjerno mjerenje s razmakom od 200 mm

Nazivna vrijednost	Peto mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0000	0,0005	0,0000	0,0005
200	199,9975	199,9966	-0,0025	-0,0034
400	399,9922	399,9929	-0,0078	-0,0071
600	599,9908	599,9925	-0,0092	-0,0075
800	799,9905	799,9879	-0,0095	-0,0121
1000	999,9851	999,9856	-0,0149	-0,0144
1200	1199,9849	1199,9841	-0,0151	-0,0159
1400	1399,9790	1399,9799	-0,0210	-0,0201
1600	1599,9770	1599,9762	-0,0230	-0,0238
1800	1799,9756	1799,9716	-0,0244	-0,0284
2000	1999,9720	1999,9704	-0,0280	-0,0296
2200	2199,9672	2199,9652	-0,0328	-0,0348
2400	2399,9661	2399,9620	-0,0339	-0,0380
2600	2599,9605	2599,9627	-0,0395	-0,0373
2800	2799,9541	2799,9556	-0,0459	-0,0444



Slika 5.14 Pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm - nekorigirano

5.3 Tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm

Za gušću mrežu podataka i za bolji prikaz rezultata izvršit će se mjerenja po istom principu kao u prethodnom odlomku s manjim razmakom od 100 mm. Za bržu izvedbu mjerenja napraviti će se 3 jednosmjerna mjerenja s približavanjem i odmicanjem od krajnje mete maksimalnog iznosa 2900 mm. Ovaj postupak mjerenja izvršit će se samo kao kontrola da bi se vidjelo da ne postoje odstupanja od točnosti na pozicijama koje nisu uzete u obzir u prethodnom mjerenju budući da je onda bio uzet veći razmak.

Kao i u prethodnom slučaju, bitno je zabilježiti očitane temperature stroja.

- Temperatura pri prvom mjerenju: 19,05 °C
- Temperatura pri drugom mjerenju: 19,21 °C
- Temperatura pri trećem mjerenju: 19,22 °C

Tablica 5.7 Prvo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 100 mm

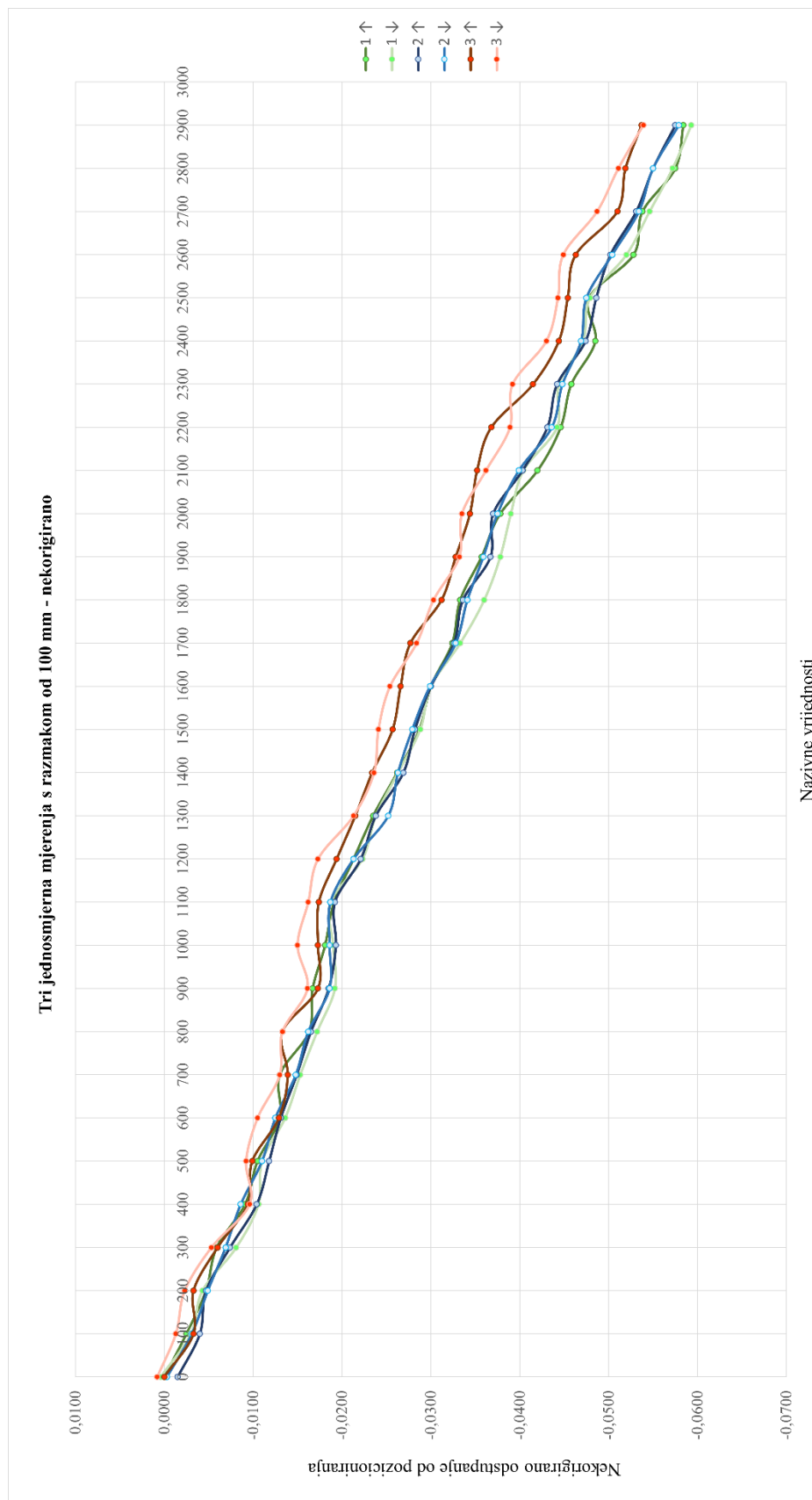
Vrijednost na mjernoj skali	Prvo mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0000	0,0004	0,0000	0,0004
100	99,9975	99,9970	-0,0025	-0,0030
200	199,9953	199,9957	-0,0047	-0,0043
300	299,9941	299,9919	-0,0059	-0,0081
400	399,9909	399,9894	-0,0091	-0,0106
500	499,9895	499,9890	-0,0105	-0,0110
600	599,9870	599,9864	-0,0130	-0,0136
700	699,9870	699,9847	-0,0130	-0,0153
800	799,9837	799,9828	-0,0163	-0,0172
900	899,9833	899,9808	-0,0167	-0,0192
1000	999,9819	999,9810	-0,0181	-0,0190
1100	1099,9809	1099,9813	-0,0191	-0,0187
1200	1199,9787	1199,9777	-0,0213	-0,0223
1300	1299,9765	1299,9762	-0,0235	-0,0238
1400	1399,9738	1399,9737	-0,0262	-0,0263
1500	1499,9713	1499,9712	-0,0287	-0,0288
1600	1599,9700	1599,9700	-0,0300	-0,0300
1700	1699,9676	1699,9667	-0,0324	-0,0333
1800	1799,9667	1799,9640	-0,0333	-0,0360
1900	1899,9643	1899,9622	-0,0357	-0,0378
2000	1999,9622	1999,9610	-0,0378	-0,0390
2100	2099,9580	2099,9596	-0,0420	-0,0404
2200	2199,9554	2199,9558	-0,0446	-0,0442
2300	2299,9542	2299,9556	-0,0458	-0,0444
2400	2399,9515	2399,9529	-0,0485	-0,0471
2500	2499,9522	2499,9521	-0,0478	-0,0479
2600	2599,9472	2599,9480	-0,0528	-0,0520
2700	2699,9462	2699,9454	-0,0538	-0,0546
2800	2799,9425	2799,9428	-0,0575	-0,0572
2900	2899,9416	2899,9407	-0,0584	-0,0593

Tablica 5.8 Drugo jednosmjerno mjerenje s razmakom od 100 mm

Vrijednost na mjernoj skali	Drugo mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	-0,0015	-0,0003	-0,0015	-0,0003
100	99,9960	99,9969	-0,0040	-0,0031
200	199,9953	199,9951	-0,0047	-0,0049
300	299,9926	299,9931	-0,0074	-0,0069
400	399,9896	399,9914	-0,0104	-0,0086
500	499,9882	499,9890	-0,0118	-0,0110
600	599,9869	599,9875	-0,0131	-0,0125
700	699,9851	699,9852	-0,0149	-0,0148
800	799,9835	799,9838	-0,0165	-0,0162
900	899,9815	899,9814	-0,0185	-0,0186
1000	999,9807	999,9814	-0,0193	-0,0186
1100	1099,9808	1099,9813	-0,0192	-0,0187
1200	1199,9779	1199,9787	-0,0221	-0,0213
1300	1299,9762	1299,9748	-0,0238	-0,0252
1400	1399,9731	1399,9737	-0,0269	-0,0263
1500	1499,9718	1499,9721	-0,0282	-0,0279
1600	1599,9700	1599,9701	-0,0300	-0,0299
1700	1699,9674	1699,9672	-0,0326	-0,0328
1800	1799,9664	1799,9659	-0,0336	-0,0341
1900	1899,9633	1899,9641	-0,0367	-0,0359
2000	1999,9630	1999,9625	-0,0370	-0,0375
2100	2099,9597	2099,9601	-0,0403	-0,0399
2200	2199,9569	2199,9564	-0,0431	-0,0436
2300	2299,9558	2299,9552	-0,0442	-0,0448
2400	2399,9526	2399,9531	-0,0474	-0,0469
2500	2499,9514	2499,9525	-0,0486	-0,0475
2600	2599,9498	2599,9496	-0,0502	-0,0504
2700	2699,9469	2699,9466	-0,0531	-0,0534
2800	2799,9450	2799,9450	-0,0550	-0,0550
2900	2899,9425	2899,9421	-0,0575	-0,0579

Tablica 5.9 Treće jednosmjerno mjerenje s razmakom od 100 mm

Vrijednost na mjerneoj skali	Treće mjerenje [mm]		Odstupanje [mm]	
	Mjerenje u pozitivnom smjeru	Mjerenje u negativnom smjeru	Odstupanje u pozitivnom smjeru	Odstupanje u negativnom smjeru
0	0,0000	0,0008	0,0000	0,0008
100	99,9967	99,9987	-0,0033	-0,0013
200	199,9967	199,9977	-0,0033	-0,0023
300	299,9940	299,9947	-0,0060	-0,0053
400	399,9906	399,9904	-0,0094	-0,0096
500	499,9901	499,9908	-0,0099	-0,0092
600	599,9871	599,9895	-0,0129	-0,0105
700	699,9861	699,9870	-0,0139	-0,0130
800	799,9867	799,9867	-0,0133	-0,0133
900	899,9827	899,9839	-0,0173	-0,0161
1000	999,9827	999,9850	-0,0173	-0,0150
1100	1099,9826	1099,9838	-0,0174	-0,0162
1200	1199,9806	1199,9827	-0,0194	-0,0173
1300	1299,9785	1299,9787	-0,0215	-0,0213
1400	1399,9766	1399,9764	-0,0234	-0,0236
1500	1499,9743	1499,9759	-0,0257	-0,0241
1600	1599,9734	1599,9746	-0,0266	-0,0254
1700	1699,9723	1699,9716	-0,0277	-0,0284
1800	1799,9688	1799,9697	-0,0312	-0,0303
1900	1899,9672	1899,9668	-0,0328	-0,0332
2000	1999,9656	1999,9665	-0,0344	-0,0335
2100	2099,9648	2099,9638	-0,0352	-0,0362
2200	2199,9632	2199,9611	-0,0368	-0,0389
2300	2299,9585	2299,9608	-0,0415	-0,0392
2400	2399,9556	2399,9570	-0,0444	-0,0430
2500	2499,9546	2499,9557	-0,0454	-0,0443
2600	2599,9537	2599,9551	-0,0463	-0,0449
2700	2699,94902	2699,9513	-0,0510	-0,0487
2800	2799,9481	2799,9489	-0,0519	-0,0511
2900	2899,9463	2899,9461	-0,0537	-0,0539



Slika 5.15 Tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm - nekorrigirano

6 Analiza mjerenja

6.1 Pojašnjenje terminologije prema ISO 230

ISO norme predstavljaju sustav međunarodnih normi koji je razvila Međunarodna organizacija za normizaciju (eng. *International Organization for Standardization*) te one igraju ključnu ulogu u različitim aspektima modernog društva i industrije. ISO norme su važne jer pružaju temelj za kvalitetu, sigurnost i učinkovitost u raznim industrijama pridonoseći međunarodnoj trgovini, inovacijama i održivosti na način da osiguravaju kako bi organizacije ispunile globalna očekivanja u pogledu pouzdanosti i dosljednosti. Poštivanje ISO normi često se smatra znakom izvrsnosti i predanosti k usavršavanju u određenom području.

ISO 230-1:2012 i ISO 230-2:2014 norme su koji se primarno usredotočuju na ispitivanje i procjenu alatnih strojeva. Međutim, s obzirom da ne postoje standardi za provjeru točnosti 1D mjernih uređaja, a pošto se radi o uređaju koji koristi slične principe alatni strojevi, zahtjevi ovih normi mogu se prilagoditi i primijeniti na proces provjere točnosti 1D mjernih uređaja.

6.1.1 Granice mjerenja

U kontekstu normi ISO 230 koje se odnose na ispitivanje alatnih strojeva, pojmovi "hod osi" i "mjerni hod" odnose se na pomicanje osi alatnog stroja i odgovarajući raspon unutar kojeg mjerenja se provode. Drugim riječima, **hod osi** odnosi se na maksimalni raspon ili udaljenost duž koje se numerički upravljana pokretna komponenta alatnog stroja može kretati tijekom rada. To je striktno definirani opseg unutar kojeg se provode mjerenja koja su ključna za procjenu točnosti pozicioniranja i ponovljivosti. S druge strane **mjerni hod** je odabrani segment hoda osi čije su početna i završna meta odnosno točka mjerenja postavljene na način da im se može pristupiti iz oba smjera osi.

6.1.2 Smjer mjerenja

Prema navedenoj normi, mjerenja mogu biti jednosmjerna ili dvosmjerna ovisno o smjeru u kojem se provode tijekom specifičnih postupaka ispitivanja. **Jednosmjerno mjerenje** uključuje niz mjerenja samo u jednom smjeru duž određene osi stroja. Uz pripadajući parametar mjerenja obično se stavlja simbol \uparrow kada je riječ o približavanju meti u pozitivnom smjeru, a simbol \downarrow kada se provodi niz mjerenja koja se odmiču od mete u negativnom smjeru. Jednosmjerna mjerenja se koriste zbog jednostavnosti svoje aplikacije i predviđena su za primjenu kod strojeva koji su namijenjeni prvenstveno za kretanje u jednom smjeru. Brža su i isplativija, osobito u slučajevima kada stroj radi pod poznatim i dosljednim uvjetima opterećenja u određenom smjeru.

Dvosmjerno mjerenje predstavlja parametar koji uključuje mjerenje do odabrane mete u oba smjera duž određene osi alatnog stroja. Ovo mjerenje, kao i jednosmjerno, može biti izvršeno i oko osi koja potencijalno rotira pa postoji opcija mjerenja zakreta. Međutim, kako je u vidu ovog rada kako je riječ o 1D stroju, fokus je samo na translacijskim pomacima. Dvosmjerna mjerenja korisna su za sveobuhvatniju procjenu performansi alatnog stroja gdje postoje potencijalne razlike u ponašanju pri kretanju u pozitivnom i negativnom smjeru. Drugim riječima, kod strojeva koji bi trebali imati simetrične kretnje u oba smjera rada, postoji rizik od javljanja kašnjenja u izvedbi ili preciznosti izvedbe. Razumijevanje jesu li određena jednosmjerna ili dvosmjerna mjerenja presudno je za točno tumačenje rezultata ispitivanja provedenih prema ISO 230-1.

6.1.3 Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je koncept u mjeriteljstvu koji kvantificira sumnju u dobivene rezultate mjerenja. Ona daje procjenu raspona unutar kojeg će se vjerojatno nalaziti stvarna vrijednost izmjerene veličine iz čega se može zaključiti da sva mjerenja uključuju određeni stupanj nepreciznosti ili netočnosti. U području ISO normi, posebno u kontekstu mjerenja i umjeravanja, bit će razmatrano nekoliko koncepata povezanih s nesigurnošću za osiguranje pouzdanih i točnih rezultata.

Standardna nesigurnost (u) je mjera inherentne varijabilnosti ili disperzije u rezultatima mjerenja. Predstavlja nesigurnost povezanu s jednim mjerenjem i izražava se u istim jedinicama kao i izmjerena veličina. Kao izvor nesigurnosti uzima u obzir pogreške instrumenta, uvjete okoline i ljudske čimbenike. Izražava se kao standardno odstupanje (σ).

Kombinirana standardna nesigurnost (u_c) nastaje kada višestruki izvori nesigurnosti doprinose ukupnoj nesigurnosti mjerenja. Izračunava se kombiniranjem pojedinačnih standardnih nesigurnosti korištenjem načela širenja pogreške pomoću formule koja uzima u obzir varijancu i kovarijancu između različitih izvora nesigurnosti.

Proširena nesigurnost (U) je interval koji uključuje rezultat mjerenja s određenom razinom pouzdanosti te se razumno pripisuje mjerenoj veličini. Izračunava se množenjem kombinirane standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja (k).

Faktor pokrivanja (k) se koristi za izračunavanje proširene nesigurnosti. On uzima u obzir željenu razinu pouzdanosti u rezultat mjerenja. Izbor vrijednosti ovog faktora je pod utjecajem statističke distribucije pretpostavljene za nesigurnost. Za normalnu distribuciju, uobičajena vrijednost iznosi 2 za vjerojatnost pokrivenosti od približno 95,45% i 3 za vjerojatnost pokrivenosti od približno 99,7%.

6.1.4 Pozicioniranje točaka mjerenja

Pozicija mete (P_i za $i = 1$ do m) odnosi se na planirani ili specificirani položaj za koji se očekuje da ga se treba doseći tijekom određenog pomicanja ili operacije pozicioniranja. Ta pozicija služi kao referenca te se koristi kao osnova za procjenu koliko je točno stvarni položaj stroja usklađen s predviđenim položajem.

Stvarna pozicija (P_{ij} za $i = 1$ do m ; $j = 1$ do n) predstavlja stvarni, fizički izmjereni položaj stroja koji se utvrđuje izravnim mjernim metodama. Riječ je o j -tom položaju dosegnutom u odnosu na i -ti referentni položaj pozicije ciljane mete.

Odstupanje od pozicioniranja (x_{ij}) je numerička razlika ili odstupanje između ciljanog položaja mete i stvarnog položaja stroja. Računa se prema sljedećoj formuli:

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (4.1)$$

Ukratko, pozicija mete, stvarna pozicija i odstupanje od pozicioniranja temeljni su koncepti u ocjeni točnosti alatnog stroja prema normama ISO 230. Ovi parametri pomažu u procjeni geometrijskih performansi te osiguravaju ispunjenje kriterija za preciznost i pouzdanost.

6.1.5 Pogreške uzrokovane reverzijom (eng. reversal error)

U postupcima ispitivanja, srednja jednosmjerna i srednja dvosmjerna odstupanja pozicioniranja na određenim pozicijama izračunavaju se kao dio procjene točnosti pozicioniranja alatnog stroja. Ova srednja odstupanja ključna su za razumijevanje ponašanja stroja na određenim položajima i identificiranje bilo kakvih dosljednih pogrešaka ili varijacija u njegovoj izvedbi. Cilj je osigurati da stroj zadovoljava specificirane zahtjeve točnosti, a srednja odstupanja pomažu karakterizirati ukupnu preciznost i ponovljivost pozicioniranja u kritičnim točkama duž hoda osi.

Srednje jednosmjerno odstupanje pozicioniranja na određenoj poziciji odnosi se na prosječnu ili srednju vrijednost odstupanja od pozicija izmjerenih na određenom položaju duž raspona kretanja po osi stroja. Jednosmjerna odstupanja pozicioniranja obično uključuju mjerenja u jednom smjeru, bilo pozitivno ili negativno.

Za slučaj prilaženja meti uz niz od n jednosmjernih pristupa položaju mete P_i računa se kao:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (4.2)$$

Za slučaj odmicanja od mete uz niz od n jednosmjernih pristupa položaju mete P_i računa se kao:

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (4.3)$$

Ovaj parametar pruža uvid u prosječnu razliku između pozicije mete i stvarne pozicije stroja na određenoj lokaciji. Pomaže u procjeni sustavnih pogrešaka koje mogu biti prisutne u izvedbi pozicioniranja stroja u određenom smjeru.

Srednje dvosmjerno odstupanje pozicioniranja na određenoj poziciji odnosi se na prosječnu ili srednju vrijednost odstupanja pozicioniranja izmjerenih na određenom položaju, uzimajući u obzir kretanja u oba smjera (pozitivno i negativno) duž raspona kretanja po osi stroja.

Računa se kao aritmetička sredina prethodno spomenutih srednjih jednosmjernih odstupanja pozicioniranja u pozitivnom smjeru primicanja meti i negativnom smjeru odmicanja od mete koje su dobivene iz dva smjera približavanja k poziciji mete P_i .

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (4.4)$$

Ovaj parametar pruža sveobuhvatniju procjenu uzimajući u obzir odstupanja u oba smjera. Procjenjuje prosječnu pogrešku u postizanju zadanog položaja mete, uzimajući u obzir potencijalne asimetrije ili učinke histereze koji se mogu pojaviti kada se stroj pomiče dvosmjerno.

Pogreška uzrokovana reverzijom (eng. *reversal error*) javlja se pri dvosmjernom mjerenju, konkretno u situaciji kada se smjer mjerenja promijeni odnosno vraća se po istoj putanji u suprotnom smjeru. Uzroci nastanka ovakve vrste greške mogu biti: trenje, proklizavanje, mrtvi hod mehaničkog sustava, nelinearne kretnje, trošenje i starenje komponenti itd.

Vrijednost pogreške inverzije na određenoj poziciji (B_i) iznosi razliku između srednjih jednosmjernih odstupanja pozicioniranja iz dva smjera približavanja na određenoj poziciji mete P_i .

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (4.5)$$

Vrijednost pogreške reverzije na osi (B) je zapravo maksimalni iznos među apsolutnih vrijednostima pogrešaka inverzije na položajima svih meta duž ili oko osi.

$$B = \max. [|B_i|] \quad (4.6)$$

Srednja vrijednost pogreške reverzije na osi je aritmetička sredina vrijednosti pogrešaka inverzije na određenim položajima svih meta duž ili oko osi.

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (4.7)$$

6.1.6 Ponovljivost pozicioniranja

Dva temeljna pojma u mjeriteljstvu koja značajno pridonose ocjeni i poboljšanju mjernih sustava su ponovljivost i obnovljivost.

Ponovljivost se odnosi na sposobnost mjernog sustava da pruži dosljedne rezultate pri mjerenju iste značajke ili objekta više puta pod identičnim uvjetima. Drugim riječima, procjenjuje preciznost sustava i opseg do kojeg može reproducirati iste mjerne vrijednosti u nizu uzastopnih mjerenja. Ponovljivost mjeriteljskog instrumenta ključna je u osiguravanju stabilnosti i pouzdanosti mjerenja bez slučajnih pogrešaka.

Čimbenici koji utječu na ponovljivost su mehanička stabilnost mjernog instrumenta, uvjeti okoline, stručnost mjeritelja, pridržavanje normiranih mjernih postupaka, umjeravanje instrumenata itd.

Obnovljivost, s druge strane, ocjenjuje dosljednost mjerenja u slučajevima kada ih izvode različiti mjeritelji, kada se koriste različiti mjerni instrumenti ili kad se mjerenja vrše pod različitim uvjetima. Mjeri se sposobnost sustava da proizvede usporedive rezultate u različitim postavkama, osiguravajući da mjerenja nisu pod pretjeranim utjecajem vanjskih čimbenika ili individualnih tehnika mjeritelja.

Čimbenici koji utječu na obnovljivost isti su kao i kod ponovljivosti.

Parametri ponovljivosti i obnovljivosti ključni su za osiguranje kvalitete, kontrolu procesa i za znanstvena istraživanja, doprinoseći ukupnoj pouzdanosti mjernih sustava.

Važnost ponovljivosti i obnovljivosti u mjeriteljstvu:

Ponovljivost pozicioniranja odnosi se na preciznost s kojom se sustav ili stroj mogu vratiti u određeni položaj pod sličnim uvjetima. To je mjera sposobnosti sustava da više puta dođe u isti položaj. Određuje se provođenjem ponovljenih gibanja stroja do iste pozicije i procjenom varijabilnosti izmjerenih rezultata.

Procjenitelj ponovljivosti jednosmjernog pozicioniranja osi na poziciji (s) je vrijednost koja se koristi pri izračunu određenih vrijednosti ponovljivosti i grešaka pozicioniranja.

Procjenitelj prilaženja meti ($s_i \uparrow$) uz niz od n jednosmjernih pristupa položaju mete P_i računa se kao:

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (4.8)$$

Procjenitelj odmicanja od mete ($s_i \downarrow$) uz niz od n jednosmjernih pristupa položaju mete P_i računa se kao:

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (4.9)$$

Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja na poziciji računa se kao raspon između vrijednosti procjenitelja prilaženja ili odmicanja od mete. Faktor pokrivanja u tom slučaju iznosi $k = 2$. No, kako je riječ o rasponu, u izračunu se koristi broj 4.

Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja za slučaj prilaženja meti ($R_i \uparrow$) u određenom položaju iznosi:

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (4.11)$$

Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja za slučaj odmicanja od mete ($R_i \downarrow$) u određenom položaju iznosi:

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (4.12)$$

Ponovljivost za slučaj dvosmjernog pozicioniranja na poziciji (R_i) je maksimalna vrijednost stoga se u obzir razmatraju vrijednost ponovljivosti jednosmjernog pozicioniranja za slučaj primicanja, kao i za slučaj odmicanja te se one uspoređuju s dolje navedenim izrazom:

$$R_i = \max. [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (4.13)$$

Ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja na osi je parametar koji procjenjuje preciznost pomaka stroja duž određene osi kada mu se pristupa iz jednog smjera. Njen iznos je maksimalna vrijednost od svih izmjerenih u bilo kojem položaju P_i te je različita za slučaj primicanja ($R\uparrow$) i odmicanja ($R\downarrow$) od mete.

$$R \uparrow = \max. [R_i \uparrow] \quad (4.14)$$

$$R \downarrow = \max. [R_i \downarrow] \quad (4.15)$$

Ponovljivost dvosmjernog pozicioniranja na osi (R) je parametar koji mjeri preciznost kretanja stroja dok se približava određenoj poziciji iz pozitivnog i negativnog smjera. Slično kao i kod jednosmjernog pozicioniranja, njen iznos je maksimalna izmjerena vrijednost u bilo kojem položaju P_i duž ili oko osi.

$$R = \max. [R_i] \quad (4.16)$$

6.1.7 Pogreške pozicioniranja

Pogreška pozicioniranja je numerička razlika ili odstupanje između planiranog ili ciljanog položaja i stvarno postignutog položaja sustava ili stroja. Predstavlja točnost sustava u dosezanju željene lokacije. Obično se računa kao razlika između pozicije određene mete i izmjerene ili promatrane pozicije nakon izvršenog gibanja ili operacije.

Sustavna pogreška pozicioniranja odnosi se na dosljedno i predvidljivo odstupanje između planiranog ili zadanog položaja i stvarno postignutog položaja sustava tijekom više ponovljenih gibanja stroja. Takve greške moguće je minimizirati putem kalibracije, podešavanja ili metoda kompenzacije kako bi se poboljšala točnost i ponovljivost sustava.

Sustavna pogreška jednosmjernog pozicioniranja osi računa se kao razlika između maksimuma i minimuma srednjih jednosmjernih devijacija (odstupanja) pozicioniranja te su različite za smjer približavanja ($E\uparrow$) i smjer udaljavanja ($E\downarrow$) na bilo kojem položaju P_i duž ili oko osi.

$$E \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow] \quad (4.17)$$

$$E \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow] \quad (4.18)$$

Sustavna pogreška dvosmjernog pozicioniranja osi (E) računa se kao razlika između maksimuma i minimuma srednjih jednosmjernih devijacija (odstupanja) pozicioniranja za oba smjera prilaženja meti. Odabire se najveća odnosno najmanja vrijednost neovisno o tome je li riječ o smjeru prilaženja ili odmicanja od mete na bilo kojem položaju P_i duž ili oko osi.

$$E = \max. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (4.19)$$

Srednja pogreška dvosmjernog pozicioniranja osi (M) računa se kao razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti srednjih dvosmjernih devijacija (odstupanja) pozicioniranja na bilo kojem položaju P_i duž ili oko osi.

$$M = \max. [\bar{x}_i] - \min. [\bar{x}_i] \quad (4.20)$$

6.1.8 Točnost pozicioniranja

Točnost pozicioniranja odnosi se na sposobnost sustava, stroja ili instrumenta da postigne i održi svoj planirani položaj s visokim stupnjem preciznosti. Koncept točnosti pozicioniranja obuhvaća stupanj bliskosti između željenog položaja i stvarnog položaja koji postiže sustav. Uključuje i sustavne i slučajne pogreške. Na razinu točnosti mogu utjecati različiti čimbenici poput mehaničkih čimbenika, performansa sustava, uvjeta okoline (temperaturne varijacije, vibracije, vlažnost), preciznosti senzora itd. Točnost pozicioniranja obično se procjenjuje pažljivim mjerenjima i postupcima testiranja. Uključuje usporedbu predviđenih položaja sa stvarnim položajima koje je sustav postigao u kontroliranim uvjetima. Izražava se u jedinicama duljine (npr. milimetri, mikrometri) i povezana je sa specifičnim tolerancijama ili dopuštenim odstupanjima od ciljanog položaja mete.

Mjeriteljski laboratoriji pridržavaju se međunarodnih normi kako bi osigurali sljedivost mjerenja. Točno pozicioniranje temeljno je za održavanje sljedivosti mjerenja prema utvrđenim standardima, pružajući povjerenje u pouzdanost rezultata mjerenja.

Točnost jednosmjernog pozicioniranja osi računa se prema formuli izvedenoj iz kombinacije srednjih sustavnih pogrešaka jednosmjernog pozicioniranja i procjenitelja za ponovljivost jednosmjernog pozicioniranja osi uz korištenje faktora pokrivanja u iznosu $k = 2$. Kao i u prethodnim slučajevima, razlikuje se točnost jednosmjernog pozicioniranja osi za slučaj

primicanja meti gdje su svi upotrjebljeni parametri prethodno izračunati za slučaj približavanja ($A \uparrow$) te obratno isto vrijedi za točnost jednosmjernog pozicioniranja osi za slučaj odmicanja od mete ($A \downarrow$).

$$A \uparrow = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (4.21)$$

$$A \downarrow = \max. [\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (4.22)$$

Točnost dvosmjernog pozicioniranja osi računa se prema formuli izvedenoj iz kombinacije srednjih sustavnih pogrešaka dvosmjernog pozicioniranja i procjenitelja za ponovljivost dvosmjernog pozicioniranja osi uz korištenje faktora pokrivanja u iznosu $k = 2$. Odabire se najveća odnosno najmanja izračunata vrijednost kombinacija neovisno o tome je li riječ o smjeru prilaženja ili odmicanja od mete.

$$A = \max. [\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min. [\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (4.23)$$

6.2 Korekcija duljine uzrokovana linearnim toplinskim širenjem

Sva ispitivanja, odnosno mjerenja, bi se trebala provoditi u okruženju kontrolirane temperature 20 °C. Svako odstupanje od ove propisane temperature utječe na rezultate mjerenja. Iz tog razloga potrebno je pri mjerenju bilježiti temperature očitane pomoću termometra i sličnih pomagala. Da bi se postigli ispravniji rezultati, provodi se korekcija za nominalno širenje.

Toplinsko širenje materijala javlja se kada materijal prilikom mijenjanja temperature mijenja svoje dimenzije. Kada se tvar zagrijava, njezine čestice dobivaju energiju i kreću se brže, uzrokujući širenje materijala. Obrnuto, kada se hladi, čestice gube energiju i kreću se sporije, što dovodi do kontrakcije ili skupljanja materijala. Širenje ili skupljanje obično karakteriziraju promjene u duljini, površini ili volumenu.

Toplinsko linearno širenje je specifična vrsta toplinskog širenja koje se događa u čvrstim tijelima kada postoji promjena temperature duž jedne dimenzije – u ovom slučaju duljine. Na ovaj fenomen utjecaj ima koeficijent linearnog širenja (α), koji je konstanta specifična za materijal.

Linearno širenje (ΔL) materijala računa se prema formuli:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (4.24)$$

Gdje je:

- ΔL promjena duljine uzrokovana toplinskim stezanjem [mm];
- α koeficijent toplinskog istezanja [1/K]; za čelik iznosi $\alpha_{\epsilon} = 11,5 \cdot 10^{-6}$ [1/K]
- ΔT temperaturno odstupanje od 20 °C prema izrazu $\Delta T = (20 - T)$ [°C];
- L duljina mjerenja [m];

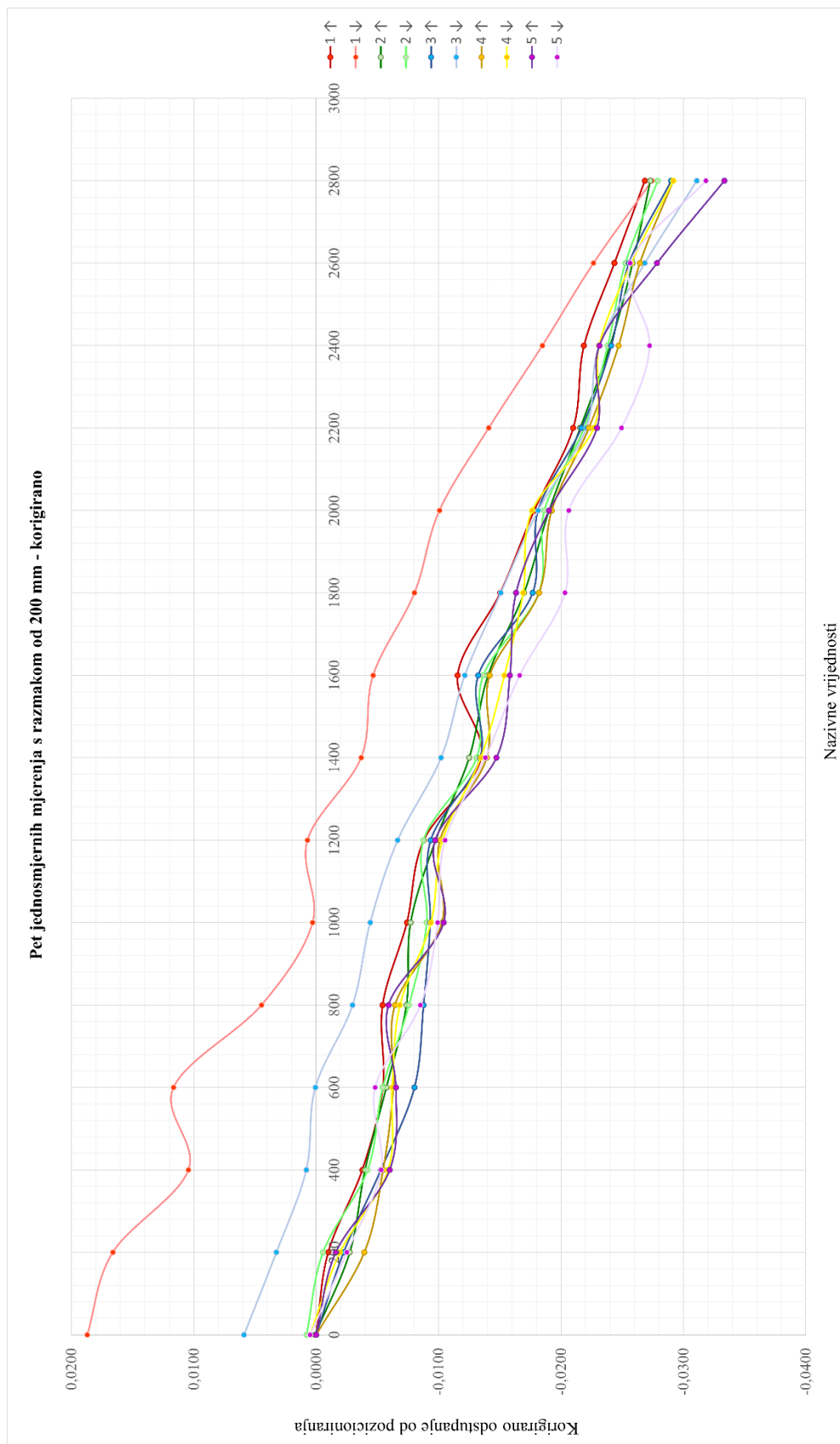
Kako su u izvršenim mjerenjima sve očitane temperature bile manje od 20 °C, može se zaključiti da je stroj bio „kraći“ nego što je u stvarnosti. Iz tog razloga radi se korekcija duljine na način da se izvršenim mjerenjima pribroji ΔL :

$$L_{korigirano(20^{\circ}\text{C})} = L + \Delta L \quad (4.25)$$

Korigirane izmjerene duljine za pet jednosmjernih mjerenja u razmacima od 200 mm priložene su tablično i grafički.

Tablica 6.1 Korigirane vrijednosti duljine za 5 mjerenja s razmakom od 200 mm

1. mjerenje		2. mjerenje		3. mjerenje		4. mjerenje		5. mjerenje	
↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
0,0000	0,0187	0,0001	0,0008	0,0000	0,0059	0,0000	0,0005	0,0000	0,0005
199,9990	200,0166	199,9973	199,9995	199,9978	200,0033	199,9961	199,9981	199,9984	199,9975
399,9962	400,0104	399,9960	399,9958	399,9947	400,0008	399,9945	399,9941	399,9940	399,9947
599,9946	600,0117	599,9943	599,9946	599,9920	600,0001	599,9937	599,9938	599,9935	599,9952
799,9946	800,0045	799,9926	799,9924	799,9912	799,9970	799,9936	799,9932	799,9941	799,9915
999,9926	1000,0003	999,9923	999,9910	999,9907	999,9956	999,9897	999,9906	999,9896	999,9901
1199,9912	1200,0007	1199,9902	1199,9912	1199,9906	1199,9933	1199,9899	1199,9897	1199,9903	1199,9895
1399,9865	1399,9963	1399,9875	1399,9869	1399,9866	1399,9898	1399,9861	1399,9866	1399,9853	1399,9862
1599,9885	1599,9954	1599,9860	1599,9864	1599,9868	1599,9879	1599,9858	1599,9846	1599,9842	1599,9834
1799,9850	1799,9920	1799,9830	1799,9818	1799,9823	1799,9849	1799,9818	1799,9831	1799,9837	1799,9797
1999,9822	1999,9899	1999,9810	1999,9814	1999,9819	1999,9819	1999,9808	1999,9824	1999,9810	1999,9794
2199,9790	2199,9859	2199,9784	2199,9781	2199,9783	2199,9779	2199,9777	2199,9773	2199,9771	2199,9751
2399,9781	2399,9815	2399,9760	2399,9762	2399,9759	2399,9769	2399,9753	2399,9769	2399,9769	2399,9728
2599,9756	2599,9773	2599,9742	2599,9748	2599,9745	2599,9732	2599,9736	2599,9743	2599,9722	2599,9744
2799,9732	2799,9726	2799,9727	2799,9721	2799,9710	2799,9689	2799,9708	2799,9708	2799,9667	2799,9682

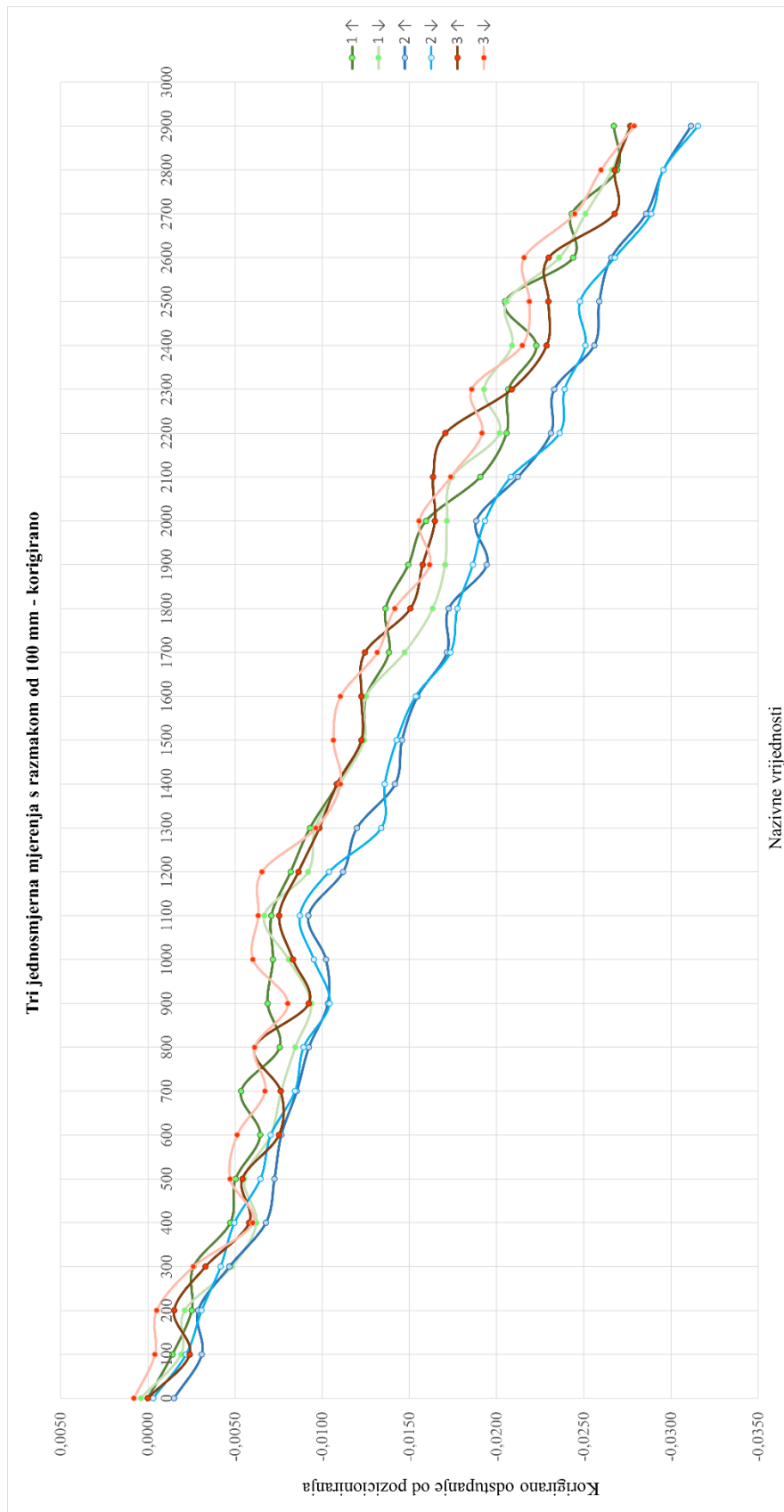


Slika 6.1 Pet jednosmjernih mjerenja s razmakom od 200 mm - korigirano

Korigirane izmjerene duljine za tri jednosmjerna mjerenja u razmacima od 100 mm priložene su tablično i grafički.

Tablica 6.2 Korigirane vrijednosti duljine za 3 mjerenja s razmakom od 100 mm

1. mjerenje		2. mjerenje		3. mjerenje	
↑	↓	↑	↓	↑	↓
0,0000	0,0004	-0,0015	-0,0003	0,0000	0,0008
99,9986	99,9981	99,9609	99,9978	99,9976	99,9996
199,9975	199,9979	199,9971	199,9969	199,9985	199,9995
299,9974	299,9952	299,9953	299,9958	299,9967	299,9974
399,9953	399,9938	399,9932	399,9950	399,9942	399,9940
499,9950	499,9945	499,9927	499,9935	499,9946	499,9953
599,9936	599,9930	599,9924	599,9930	599,9925	599,9949
699,9946	699,9923	699,9915	699,9916	699,9924	699,9933
799,9924	799,9915	799,9908	799,9911	799,9939	799,9939
899,9931	899,9906	899,9897	899,9896	899,9908	899,9920
999,9928	999,9919	999,9898	999,9905	999,9917	999,9940
1099,9929	1099,9933	1099,9908	1099,9913	1099,9925	1099,9937
1199,9918	1199,9908	1199,9888	1199,9896	1199,9914	1199,9935
1299,9907	1299,9904	1299,9880	1299,9866	1299,9902	1299,9904
1399,9891	1399,9890	1399,9858	1399,9864	1399,9892	1399,9890
1499,9877	1499,9876	1499,9854	1499,9857	1499,9878	1499,9894
1599,9875	1599,9875	1599,9845	1599,9846	1599,9878	1599,9890
1699,9862	1699,9853	1699,9828	1699,9826	1699,9875	1699,9868
1799,9864	1799,9837	1799,9828	1799,9823	1799,9849	1799,9858
1899,9851	1899,9830	1899,9806	1899,9814	1899,9842	1899,9838
1999,9840	1999,9828	1999,9812	1999,9807	1999,9835	1999,9844
2099,9809	2099,9825	2099,9788	2099,9792	2099,9836	2099,9826
2199,9794	2199,9798	2199,9769	2199,9764	2199,9829	2199,9808
2299,9793	2299,9807	2299,9767	2299,9761	2299,9791	2299,9814
2399,9777	2399,9791	2399,9744	2399,9749	2399,9771	2399,9785
2499,9795	2499,9794	2499,9741	2499,9752	2499,9770	2499,9781
2599,9756	2599,9764	2599,9734	2599,9732	2599,9770	2599,9784
2699,9757	2699,9749	2699,9714	2699,9711	2699,9732	2699,9755
2799,9731	2799,9734	2799,9704	2799,9704	2799,9732	2799,9740
2899,9733	2899,9724	2899,9688	2899,9684	2899,9723	2899,9721



Slika 6.2 Tri jednosmjerna mjerenja s razmakom od 100 mm - korigirano

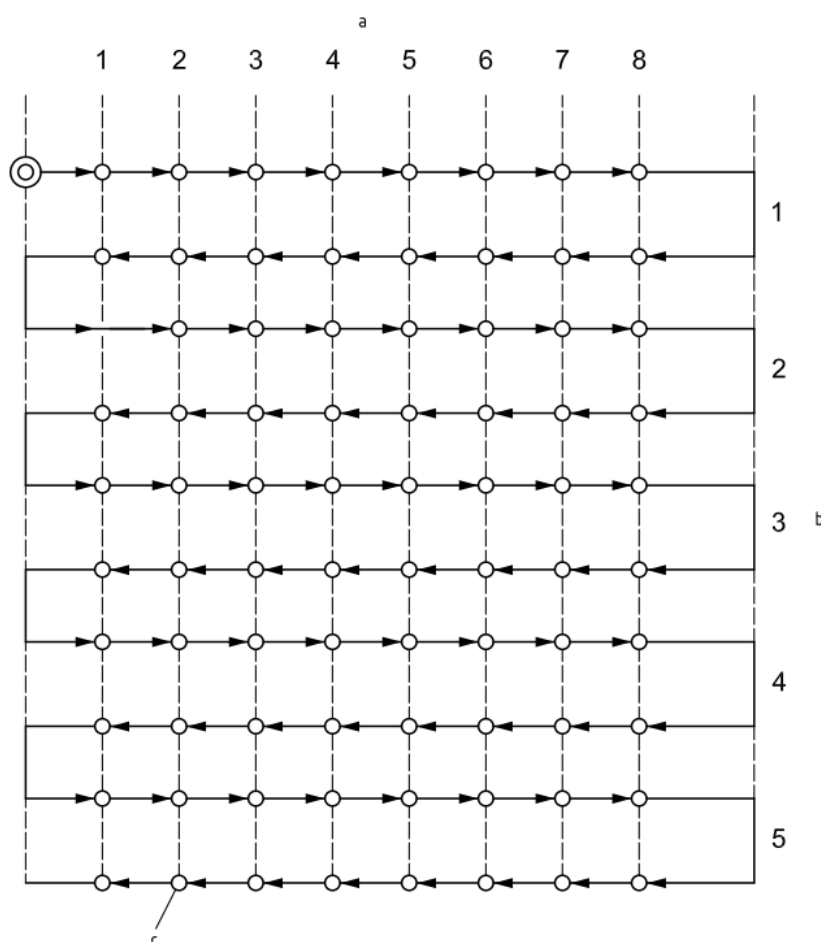
U području preciznog mjeriteljstva, točno mjerenje duljina od najveće je važnosti. Jedan od kritičnih čimbenika koji može značajno utjecati na pouzdanost mjerenja duljine je linearno toplinsko širenje. U mjeriteljstvu, gdje su precizna mjerenja kritična, varijacije u temperaturi mogu unijeti pogreške u mjerenja duljine. Kako mjerni instrumenti i objekti koji se mjere prolaze kroz promjene temperature, njihove se dimenzije mogu promijeniti u skladu s tim što dovodi do netočnosti u zabilježenim duljinama. Korekcija duljine je proces kompenzacije dimenzijskih promjena izazvanih linearnim toplinskim širenjem i ključna je za održavanje točnosti mjerenja, ispunjavanje industrijskih standarda i osiguravanje pouzdanosti podataka u različitim primjenama. Kako bi postigli točna mjerenja, mjeritelji koriste različite tehnike i formule za korekciju varijacija duljine izazvanih temperaturom. Iako korekcija duljine smanjuje utjecaj toplinske ekspanzije na mjerenja, potrebno je uzeti u obzir i varijacije materijala, temperaturne fluktuacije i dinamička okruženja.

Iz rezultata je vidljivo da se odstupanja od nazivne vrijednosti nakon korekcije duljine smanjuju. Za slučaj pet jednosmjernih mjerenja iz grafa može se vidjeti da ako se izuzme prvo mjerenje približavanja ka krajnjoj ciljnoj poziciji koje malo odstupa, sva ostala mjerenja kao i odstupanja se relativno dobro preklapaju. Iz toga se može zaključiti da su rezultati mjerenja pouzdani. U ovom slučaju problem odstupanja leži u nekontroliranim uvjetima temperature duž osi 1D mjernog uređaja i nedovoljna podešenost laserskog sustava duž osi 1D mjernog uređaja. Na ovaj ciklus mjerenja će se primijeniti norma ISO 230-2 [poglavlje 6.3].

S druge strane, što se tiče tri jednosmjerna mjerenja, iz grafičkog prikaza se može zaključiti da nema značajnijih odstupanja histereza među mjerenjima. Iz tog razloga mogu se u obzir uzeti podaci o aritmetičkim sredinama. Najprije se uzimaju sredine u smjeru primicanja i odmicanja za svako od mjerenja te konačno sredina sve 3 sredine svih mjerenja. Na ovaj ciklus mjerenja primijenit će se metoda najmanjih kvadrata [poglavlje 6.4].

6.3 Analiza mjerenja prema normi ISO 230-2

Područje linearnih mjernih sustava daje prednost preciznosti i točnosti, zahtijevajući protokole testiranja i evaluacije za osi strojeva. Prema normi ISO 230-2 potrebno je izvršiti najmanje pet odabranih pozicija mjerenja po metru s ukupno najmanje pet ciklusa mjerenja. Mjerenja se provode na svakoj poziciji slijedeći normirani ciklus ispitivanja koji nalaže da svakoj poziciji mjerenja treba prići pet puta u svakom smjeru. Postupak mjerenja prikazan je na slici [Slika 6.3].



Slika 6.3 Normirani ciklus mjerenja [5]

Provodi se proračun izmjerenih podataka prema jednadžbama iz poglavlja 6.1 čije su vrijednosti prikazane u nastavku tablično.

Tablica 6.3 Odstupanja od pozicioniranja na poziciji i procjenitelji ponovljivosti [mm]

Nazivna vrijednost	$\bar{x}_i \uparrow$	$\bar{x}_i \downarrow$	\bar{x}_i	$s_i \uparrow$	$s_i \downarrow$
0	0,00002	0,0053	0,0027	0,00005	0,0078
200	-0,0023	0,0030	0,0003	0,0011	0,0079
400	-0,0049	-0,0008	-0,0029	0,0010	0,0068
600	-0,0064	-0,0009	-0,0037	0,0010	0,0075
800	-0,0068	-0,0043	-0,0055	0,0013	0,0053
1000	-0,0090	-0,0065	-0,0078	0,0014	0,0044
1200	-0,0095	-0,0071	-0,0083	0,0005	0,0046
1400	-0,0136	-0,0108	-0,0122	0,0008	0,0043
1600	-0,0138	-0,0125	-0,0131	0,0016	0,0047
1800	-0,0168	-0,0157	-0,0163	0,0012	0,0047
2000	-0,0186	-0,0170	-0,0178	0,0006	0,0040
2200	-0,0219	-0,0211	-0,0215	0,0007	0,0041
2400	-0,0236	-0,0231	-0,0234	0,0011	0,0031
2600	-0,0260	-0,0252	-0,0256	0,0013	0,0016
2800	-0,0291	-0,0295	-0,0293	0,0026	0,0019

Tablica 6.3 prikazuje odstupanja i procjenitelje rasipanja ponovljivosti čiji će svi iznosi biti potrebni za proračun parametara prikazanih u narednim tablicama prema poglavlju 6.1.

Tablica 6.4 Pogreške uzrokovane reverzijom [mm]

Nazivna vrijednost	B_i	B	\bar{B}
0	-0,0053	0,0055	-0,0024
200	-0,0053		
400	-0,0041		
600	-0,0055		
800	-0,0025		
1000	-0,0025		
1200	-0,0024		
1400	-0,0028		
1600	-0,0013		
1800	-0,0011		
2000	-0,0016		
2200	-0,0008		
2400	-0,0004		
2600	-0,0008		
2800	0,0004		

Iz tablice [Tablica 6.4] je vidljivo da razlika između dva smjera mjerenja za pogreške uzrokovane reverzijom izuzetno mala i ne prelazi 5,5 μm iz čega se zaključuje da ne postoji značajna promjena očitavanja duljine s obzirom na smjer. Aritmetička sredina ovih pogrešaka je također manjeg iznosa i iznosi -2,4 μm . Iz tog razloga za vrijednost ukupnog odstupanja od pozicioniranja izračunata je aritmetička sredina oba smjera [poglavlje 6.4].

Tablica 6.5 Ponovljivosti pozicioniranja [mm]

Nazivna vrijednost	$R_i \uparrow$	$R_i \downarrow$	R_i	$R \uparrow$	$R \downarrow$	R
0	0,0002	0,0314	0,0314	0,0103	0,0318	0,0318
200	0,0045	0,0318	0,0318			
400	0,0039	0,0273	0,0273			
600	0,0040	0,0298	0,0298			
800	0,0053	0,0213	0,0213			
1000	0,0056	0,0175	0,0175			
1200	0,0020	0,0185	0,0185			
1400	0,0033	0,0170	0,0170			
1600	0,0062	0,0188	0,0188			
1800	0,0050	0,0188	0,0188			
2000	0,0025	0,0162	0,0162			
2200	0,0030	0,0165	0,0165			
2400	0,0044	0,0125	0,0125			
2600	0,0051	0,0062	0,0064			
2800	0,0103	0,0077	0,0103			

Iz tablice [Tablica 6.5] je vidljivo da je ukupna ponovljivost mjerenja na razini 10,3 μm samo za jedan smjer, dok ukupna ponovljivost za dva smjera dostiže 31,8 μm . Razlog za to leži u značajnom pomaku prvog mjerenja u negativnom smjeru kao što je vidljivo na slici [Slika 6.1]. Iz tog razloga ova analiza će se ponoviti bez kompletnog prvog mjerenja. Između mjerenja je teško održati iste uvijete i za očekivati je da postoji određena greška u ponovljivosti rezultata, međutim greške ponovljivosti bi trebale biti slične između dva smjera mjerenja, što ovdje nije slučaj. Zato se analizom utvrdilo da se značajno odstupanje pojavilo prilikom mjerenja 1 u negativnom smjeru.

Tablica 6.6 Sustavne linearne pogreške očitavanja [mm]

$E \uparrow$	0,0291
$E \downarrow$	0,0348
E	0,0348
M	0,0320

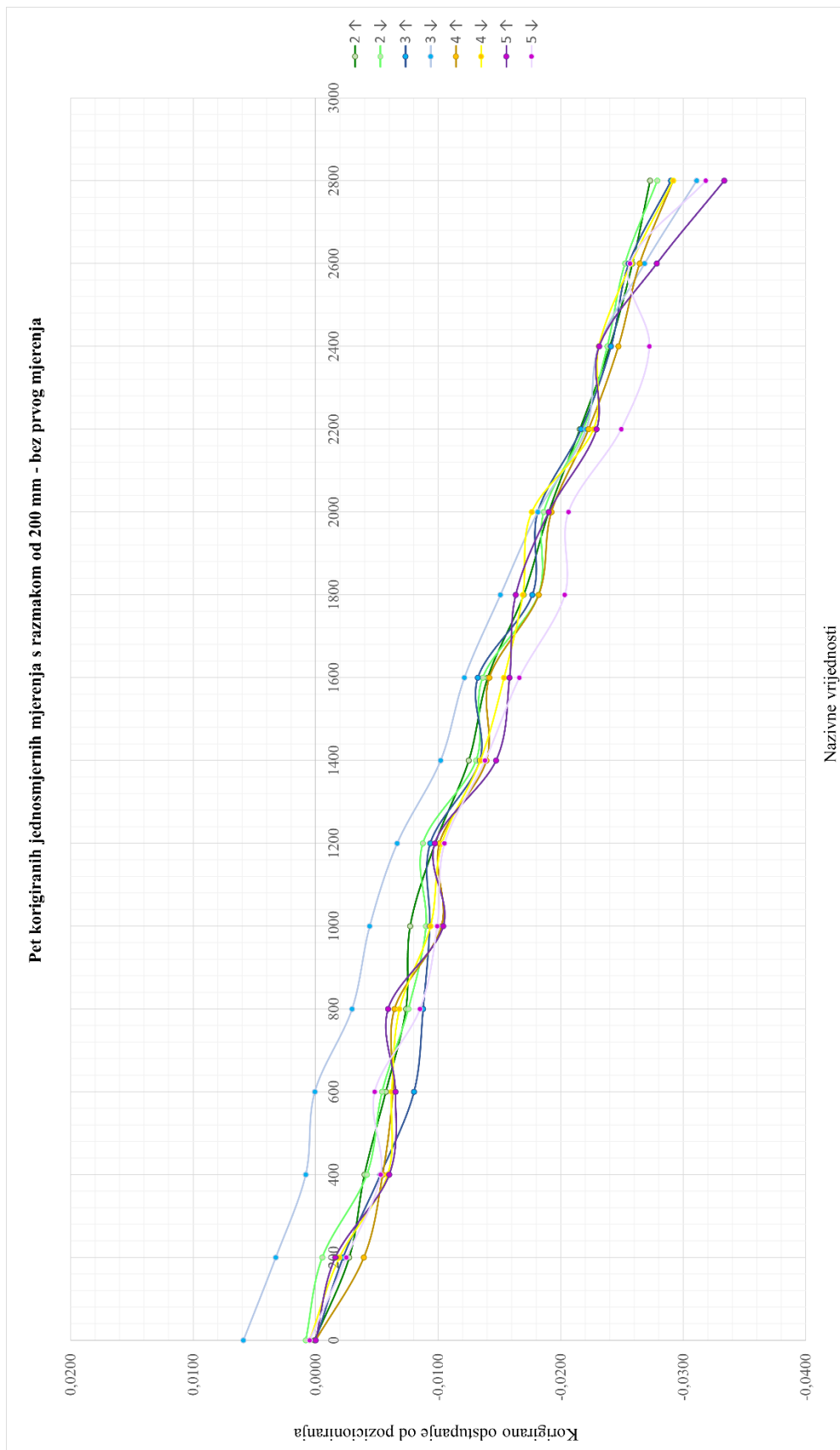
Iz tablice [Tablica 6.6] je vidljivo je da razlika između dva smjera mjerenja za sustavne pogreške očitavanja iznosi 34,8 μm što je ujedno i iznos smjera odmicanja koje se smatra kritičnim zbog prvog mjerenja. Razlika maksimalnih i minimalnih srednjih odstupanja iznosi 32 μm . Ove pogreške posljedica su odstupanja linearnog trenda.

Tablica 6.7 Pogreške očitavanja [mm]

$A \uparrow$	0,0344
$A \downarrow$	0,0543
A	0,0552

Iz tablice [Tablica 6.7] vidljivo je da pogreška očitavanja za pozitivan smjer iznosi 34,4 μm , dok je za negativan smjer riječ o iznosu od 54,3 μm . Ovolika razlika u pogreškama za različite smjerove ne bi trebala biti ovolika te će se smanjiti odbacivanjem prvog mjerenja čiji smjer odmicanja remeti proračun. Ukupna greška za oba smjera iznosi 55,2 μm . Također, iznosi iz ove dvije tablice bi trebali biti približni budući da se kod ovih pogreški očitavanja osim odstupanja linearnog trenda uzima u obzir i rasipanje procjenitelja koje je kao što je vidljivo u tablici [Tablica 6.3] izuzetno malo. Kako je u interesu da ovi parametri teže nuli jer teže poklapanju s linearnim trendom, nakon odbacivanja prvog mjerenja bit će vidljivo da se ovaj iznos smanjio odnosno da pokazuje bolju točnost. Nove vrijednosti su prikazane tablicama u nastavku.

Iz slike u nastavku također je vidljivo da među preostalim mjerenjima ne postoje značajnije razlike u odstupanjima.



Slika 6.4 Grafički prikaz korigiranih mjerjenja s odbačenim prvim mjerenjem

Tablica 6.8 Odstupanja od pozicioniranja na poziciji i procjenitelji ponovljivosti (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]

Nazivna vrijednost	$\bar{x}_i \uparrow$	$\bar{x}_i \downarrow$	\bar{x}_i	$s_i \uparrow$	$s_i \downarrow$
0	0,00002	0,0019	0,0010	0,00005	0,0027
200	-0,0026	-0,0004	-0,0015	0,0010	0,0026
400	-0,0052	-0,0036	-0,0044	0,0009	0,0030
600	-0,0066	-0,0041	-0,0054	0,0010	0,0028
800	-0,0071	-0,0065	-0,0068	0,0013	0,0024
1000	-0,0094	-0,0082	-0,0088	0,0012	0,0025
1200	-0,0097	-0,0091	-0,0094	0,0003	0,0018
1400	-0,0136	-0,0126	-0,0131	0,0009	0,0017
1600	-0,0143	-0,0144	-0,0144	0,0011	0,0020
1800	-0,0173	-0,0176	-0,0175	0,0008	0,0022
2000	-0,0189	-0,0188	-0,0188	0,0005	0,0013
2200	-0,0221	-0,0229	-0,0225	0,0006	0,0014
2400	-0,0240	-0,0243	-0,0242	0,0006	0,0020
2600	-0,0264	-0,0259	-0,0261	0,0010	0,0007
2800	-0,0297	-0,0300	-0,0298	0,0026	0,0018

Tablica 6.8 prikazuje odstupanja i procjenitelje rasipanja ponovljivosti čiji će svi iznosi biti potrebni za proračun parametara prikazanih u narednim tablicama prema poglavlju 6.1.

Tablica 6.9 Pogreške uzrokovane reverzijom (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]

Nazivna vrijednost	B_i	B	\bar{B}
0	-0,0019	0,0026	-0,0007
200	-0,0022		
400	-0,0016		
600	-0,0026		
800	-0,0007		
1000	-0,0013		
1200	-0,0007		
1400	-0,0010		
1600	0,0001		
1800	0,0003		
2000	-0,0001		
2200	0,0008		
2400	0,0003		
2600	-0,0006		
2800	0,0003		

Iz tablice [Tablica 6.9] vidljivo je da se razlika između dva smjera mjerenja za pogreške uzrokovane reverzijom dodatno smanjila te sada ne prelazi 2,6 μm iz čega se ponovno može zaključiti da ne postoji značajna promjena očitavanja duljine s obzirom na smjer. Aritmetička sredina ovih pogrešaka sada iznosi -2,4 μm . Može se primijetiti da su ove pogreške manje nego one prethodne [Tablica 6.4].

Tablica 6.10 Ponovljivosti pozicioniranja (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]

Nazivna vrijednost	$R_i \uparrow$	$R_i \downarrow$	R_i	$R \uparrow$	$R \downarrow$	R
0	0,0002	0,0106	0,0106	0,0103	0,0122	0,0122
200	0,0039	0,0104	0,0104			
400	0,0034	0,0122	0,0122			
600	0,0039	0,0113	0,0113			
800	0,0050	0,0097	0,0097			
1000	0,0050	0,0102	0,0102			
1200	0,0012	0,0071	0,0071			
1400	0,0037	0,0066	0,0066			
1600	0,0043	0,0079	0,0079			
1800	0,0033	0,0088	0,0088			
2000	0,0020	0,0053	0,0053			
2200	0,0025	0,0056	0,0056			
2400	0,0026	0,0079	0,0079			
2600	0,0041	0,0027	0,0041			
2800	0,0103	0,0072	0,0103			

Iz tablice [Tablica 6.10] je vidljivo da je ukupna ponovljivost mjerenja za smjer primicanja ostala nepromijenjena odnosno i dalje iznosi 10,3 μm . S druge strane, ponovljivost za smjer odmicanja kao i ukupna ponovljivost za dva smjera se smanjuje na iznos 12,2 μm što je više nego upola manje nego prethodno [Tablica 6.5]. Sada je vidljivo da ne postoji značajna razlika u smjerovima mjerenja što bi i trebao biti slučaj s obzirom da se radi o 1D mjernom uređaju koji bi trebao imati jednaka očitavanja za svaku točku neovisno iz kojeg smjera joj se prilazi.

Tablica 6.11 Sustavne pogreške očitavanja (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]

$E \uparrow$	0,0297
$E \downarrow$	0,0319
E	0,0319
M	0,0308

Iz tablice [Tablica 6.11] vidljivo je da se razlika između dva smjera mjerenja za pogreške pozicioniranja malo smanjila pa sada iznosi 31,9 μm . Razlika maksimalnih i minimalnih srednjih odstupanja se time također malo smanjuje pa sada iznosi 30,8 μm .

Tablica 6.12 Pogreške očitavanja (s odbačenim prvim mjerenjem) [mm]

$A \uparrow$	0,0350
$A \downarrow$	0,0408
A	0,0421

Iz tablice [Tablica 6.12] vidljivo je da je pogreška očitavanja za smjer primicanja ostala približno ista te iznosi 35 μm , dok se za smjer odmicanja smanjila te sada iznosi 40,8 μm . Ukupna točnost za oba smjera sada iznosi 42,1 μm što znači da se smanjila za 13,1 μm . Vrijednosti pogrešaka ovih tablica su sada bliža po vrijednostima što pokazuje da je bila ispravna odluka odbaciti mjerenje čije odstupanje pretjerano odskače.

Kao što se moglo predvidjeti, odbacivanjem prvog mjerenja rezultati su bolji nego u prethodnom slučaju. Problem izvedbe mjerenja su nekontrolirani uvjeti koje se nije moglo održati pod kontrolom s obzirom na prostor u kojem se provodilo mjerenje. Za slučaj mogućnosti boljeg kontroliranja okolišnih uvjeta (prvenstveno usklađivanje temperature zraka i temperature stroja) mjerni uređaj bi vrlo vjerojatno pokazivao veću točnost i manje pogreške.

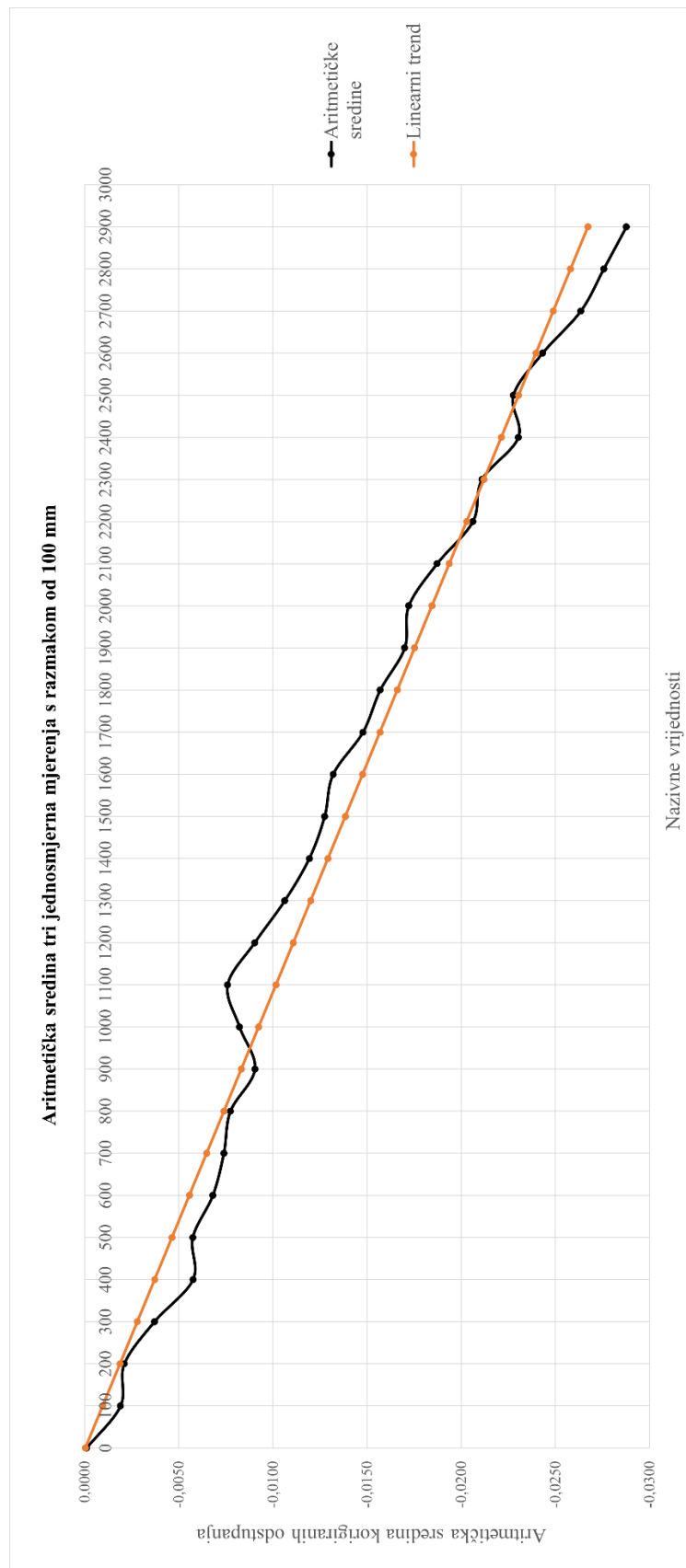
6.4 Analiza mjerenja korištenjem metode najmanjih kvadrata

S Obzirom da se i nakon temperaturne korekcije uočava negativni trend u rezultatima mjerenja. Može se zaključiti da 1D mjerni uređaj nije bio dobro temperiran i da očitavanje temperature zraka nije odgovaralo stvarnoj temperaturi 1D mjernog uređaja. Postojanje ovog trenda također može biti posljedica nepodešenosti laserske zrake s osi 1D mjernog uređaja. Uvidom u prijašnje podatke umjeravanja, uočeno je da ne postoji linearna pogreška koja bi bila posljedica loše podešene mjerne skale 1D mjernog uređaja u odnosu na smjer pomaka mjernih kolica. Iz ovih razloga pristupilo se matematičkoj eliminaciji linearne pogreške metodom najmanjih kvadrata.

Metoda najmanjih kvadrata je statistička metoda koja se koristi za procjenu parametara matematičkog modela minimiziranjem zbroja kvadrata razlika između izmjerenih i izračunatih vrijednosti. Najprije je potrebno odrediti matematički model koji predstavlja odnos između zavisne i nezavisne varijable. Taj model može biti linearan ili nelinearan. Kako se iz slike 6.3 može uočiti, grafički prikaz aritmetičkih sredina teži k ponašanju pravca stoga će se odabrati slučaj linearnog modela što je u principu jednadžba pravca. Za odabrani skup podataka kao nezavisnu varijablu uzimaju se nazivne vrijednosti mjerenja, a zavisnu varijablu će predstavljati aritmetičke sredine odstupanja.

$$y_i = ax_i + b \quad (4.26)$$

Kako je spomenuto u prethodnom poglavlju [poglavlje 6.3] budući da je iznos pogrešaka reverzije zanemarivo malen, ova metoda može se primijeniti na aritmetičkim sredinama šest mjerenja (po tri u svakom smjeru). Na slici je vidljiv graf tih sredina skupa sa svojim linearnim trendom.



Slika 6.5 Aritmetičke sredine odstupanja s linearnim trendom

Vrijednosti parametara nagiba pravca (a) i odsječak na ordinati (b), koji minimiziraju zbroj kvadrata za razliku između promatranih i predviđenih vrijednosti, izračunavaju se provedbom linearne regresije. Za linearni model, to uključuje izjednačavanje parcijalnih derivacija funkcije cilja s obzirom na svaki parametar s nulom i rješavanje sustava jednažbi.

Izračunate vrijednosti su:

$$a = -9,20522 \cdot 10^{-6} \quad (4.27)$$

$$b = -3,61437 \cdot 10^{-5} \quad (4.28)$$

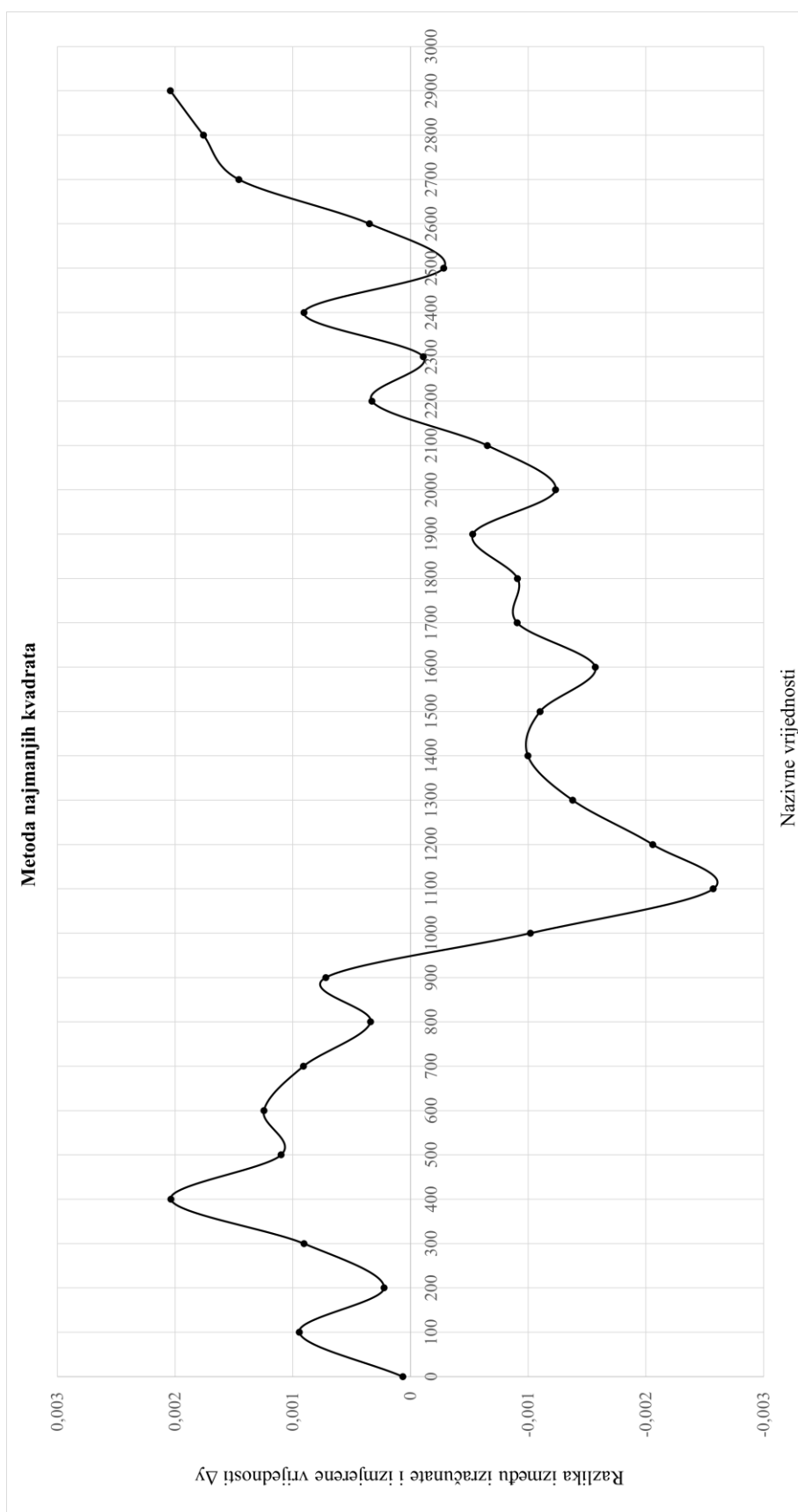
Uvrštavanjem vrijednosti parametara (4.27) i (4.28) u jednažbu (4.26) dobiva se opći oblik jednažbe pravca koji se poklapa s linearnim trendom.

$$y_i = -9,20522 \cdot 10^{-6} x_i - 3,61437 \cdot 10^{-5} \quad (4.29)$$

Uvrštavanjem nezavisne varijable odnosno nazivnih vrijednosti u jednažbu (4.29) izračunavaju se vrijednosti y_i . Razlika između tih izračunatih vrijednosti i izmjerenih vrijednosti odstupanja predstavlja izračun korištenjem metode najmanjih kvadrata. Rješenja su prikazana tablično i grafički.

Tablica 6.13 Podaci dobiveni primjenom metode najmanjih kvadrata

Nazivna vrijednost	y [mm]	y_i [mm]	$\Delta y = y_i - y$
0	-0,0001	0,00003	0,0001
100	-0,0019	-0,0010	0,0009
200	-0,0021	-0,0019	0,0002
300	-0,0037	-0,0028	0,0009
400	-0,0058	-0,0037	0,0020
500	-0,0057	-0,0046	0,0011
600	-0,0068	-0,0056	0,0012
700	-0,0074	-0,0065	0,0009
800	-0,0077	-0,0074	0,0003
900	-0,0090	-0,0083	0,0007
1000	-0,0082	-0,0092	-0,0010
1100	-0,0076	-0,0102	-0,0026
1200	-0,0090	-0,0111	-0,0021
1300	-0,0106	-0,0120	-0,0014
1400	-0,0119	-0,0129	-0,0010
1500	-0,0127	-0,0138	-0,0011
1600	-0,0132	-0,0148	-0,0016
1700	-0,0148	-0,0157	-0,0009
1800	-0,0157	-0,0166	-0,0009
1900	-0,0170	-0,0175	-0,0005
2000	-0,0172	-0,0184	-0,0012
2100	-0,0187	-0,0194	-0,0007
2200	-0,0206	-0,0203	0,0003
2300	-0,0211	-0,0212	-0,0001
2400	-0,0230	-0,0221	0,0009
2500	-0,0228	-0,0230	-0,0003
2600	-0,0243	-0,0240	0,0003
2700	-0,0263	-0,0249	0,0015
2800	-0,0276	-0,0258	0,0018
2900	-0,0288	-0,0267	0,0020



Slika 6.6 Metoda najmanjih kvadrata primijenjena na mjerenje

Iz tablice kao i iz grafa uočljivo je da najveće pozitivno odstupanje dobiveno metodom najmanjih kvadrata iznosi 0,0020 mm i postiže za nazivne vrijednosti 400 mm i 2900 mm. S druge strane, najveće negativno odstupanje iznosi -0,0026 mm i postiže se za nazivnu vrijednost od 1100 mm.

7 Zaključak

Interferometrija je precizna metoda za provjeru točnosti 1D mjernih uređaja kojom je moguće osigurati veliko mjerno područje uz zadržavanje visoke točnosti mjerenja. Koristeći principe interferencije valova, ova tehnika nudi rezoluciju ispod mikrometra, beskontaktno mjerenje, dinamičke mogućnosti uz direktno ostvarivanje sljedivosti s primarnim etalonom duljine (odnos stabiliziranim He-Ne laserom). Primjena interferometrije u provjeri točnosti osigurava da 1D mjerni uređaji ispunjavaju stroge mjeriteljske zahtjeve, pridonoseći pouzdanosti i pouzdanosti dimenzijskih mjerenja u raznim znanstvenim, industrijskim i proizvodnim primjenama.

U eksperimentalnom dijelu ispitana su dva različita postava optike od kojih je odabran postav s pomičnim interferometrom kojim je uvelike olakšan mjerni postupak.

Na početku je provedeno pet ponovljenih mjerenja u pozitivnom i negativom smjeru svakih 200 milimetara. Na tom setu podataka izvršena je temperaturna korekcija s obzirom da je izmjerena temperatura okoliša bila različita od 20 °C. Nad dobivenim rezultatima provedena je analiza ponovljivosti i točnosti prema normi ISO 230-2. Iako je ova norma zamišljena za provjeru pozicioniranja alatnih strojeva, primjenom iste dobiven je uvid u greške mjerenja. Analiza je pokazala da ne postoji značajno odstupanje koje je posljedica različitih smjerova mjerenja, također je utvrđena značajna pogreška ponovljivosti rezultata koja je pripisana prvom mjerenju u negativnom smjeru. Pretpostavlja se da je došlo do značajne promjene temperature okoliša za vrijeme trajanja prvog mjerenja. To mjerenje je isključeno i nova analiza je napravljena te je potvrđen zanemarivo odstupanje dva smjera mjerenja i postojanje linearne sustavne pogreške kao posljedica nestabilnosti okolišnih uvjeta i moguće greške postavljanja lasera. S obzirom za dostupne rezultate umjeravanja istog 1D uređaja kroz čitav niz prijašnjih godina zaključeno je da ova greška nije posljedica 1D uređaja već samog procesa mjerenja. Nakon toga, pristupilo se mjerenju s manjim korakom od 100 mm. Ponovljena su tri mjerenja u oba smjera. Rezultati su prikazani kao aritmetičke sredine šest ponovljenih mjerenja (3 za svaki smjer) nakon izvršene temperaturne korekcije. Ukupno odstupanje izračunato je nakon provedene korekcije linearne pogreške metodom najmanjih kvadrata. Brojke sa zadnjeg grafa pokazuju da najveće pozitivno odstupanje iznosi 0,0020 mm, najveće negativno odstupanje iznosi -0,0026 mm.

LITERATURA

- [1] Interferometry explained, Renishaw, [Interferometry explained \(renishaw.com\)](http://www.renishaw.com/interferometry-explained), pristupljeno: 5.12.2023.
- [2] Linear measurement User guide, Renishaw, <https://jitaruaugustin.files.wordpress.com/2010/01/liniaritate1.pdf>, pristupljeno: 7.12.2023.
- [3] The benefits of remote interferometry for linear, angular and straightness measurements, Renishaw, 2000.
- [4] Međunarodna norma ISO 230-1, Ispitni kod za alatne strojeve – 1. dio: Geometrijska točnost strojeva koji rade u uvjetima praznog hoda ili u kvazistatičkim uvjetima, 2012.
- [5] Međunarodna norma ISO 230-2, Ispitni kod za alatne strojeve – 2. dio: Određivanje točnosti i ponovljivosti pozicioniranja numerički upravljanih osi, 2014.
- [6] Thermal expansion, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion, pristupljeno: 17.12.2023.
- [7] Interferencija svjetlosti, <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/fa4cd5a4-17e1-47c2-a2db-545721e1cce5/interferencija-svjetlosti.html>, pristupljeno: 18.12.2023.
- [8] Basics of Estimating Measurement Uncertainty, National Library of Medicine, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2556585/>, pristupljeno: 20.12.2023.
- [9] Mjerna nesigurnost, Klinički zavod za kemiju, KBC Sestre milosrdnice, https://kongresrijeka2015.hdmblm.hr/images/predavanja/Celap_Mjerna_nesigurnost.pdf, pristupljeno: 20.12.2023
- [10] Što su ponovljivost i obnovljivost?, Thpanorama, https://hr.thpanorama.com/articles/ciencia/qu-son-la-reproducibilidad-y-repetibilidad.html#google_vignette, pristupljeno: 27.12.2023.