

UNIVERZA V LJUBLJANI

FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Miha Vrhovec

**LASERSKI SISTEM ZA MERJENJE
PREČNEGA ODMIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, marec 2009

UNIVERZA V LJUBLJANI

FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Miha Vrhovec

**LASERSKI SISTEM ZA MERJENJE
PREČNEGA ODMIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, marec 2009

Kazalo

Seznam slik	v
Seznam tabel	ix
Povzetek	1
Abstract	3
1 Uvod	5
1.1 Koordinatne meritve roke	6
1.2 Laserske meritve lateralnih premikov	9
1.3 Nov laserski meritni sistem za merjenje prečnih odklonov	12
1.4 Pričakovani izvirni prispevki disertacije	13
2 Analiza vplivov na meritno negotovost KMR	15
2.1 Kinematične napake	19
2.2 Napake kotnih meritnih sistemov	20
2.3 Elastične deformacije	21
2.3.1 Lastna teža gradnikov	21
2.3.2 Sila operaterja in pospeševalne sile	22
2.3.3 Sila merjenja	22
2.4 Napake v sklepih	23
2.4.1 Radialni in aksialni oplet	23
2.4.2 Trenje	23
2.5 Termične deformacije	24
2.5.1 Spremembe temperature okolice	24

2.5.2	Notranji viri toplove	24
2.6	Vplivi okolice	24
2.7	Pregled	25
2.8	Analitični izračun vpliva pomembnejših virov	26
2.8.1	Matematični model	26
2.8.2	Predstavitev podatkov	27
2.8.3	Vpliv posameznih sklepov	28
2.8.4	Skupni vpliv vseh sklepov	33
2.8.5	Vpliv temperature	34
2.8.6	Vpliv težnosti	35
2.8.7	Sklep	35
3	Laserski sistem za merjenje deformacij	37
3.1	Princip delovanja	37
3.2	Zgradba in delovanje merilnega sistema	39
3.3	Eksperimenti	43
3.4	Rezultati	45
3.5	Uporaba sistema	50
4	Merjenje deformacij KMR	53
4.1	Integracija merilnega sistema v KMR	53
4.2	Eksperimenti	58
4.2.1	Statična sila na vrh segmenta	58
4.2.2	Vpliv gravitacije	60
4.2.3	Sile pri vodenju vrha KMR	60
4.2.4	Dinamične obremenitve	63
4.2.5	Kompenzacija deformacij KMR	67

5 Laserski sistem za merjenje premosti	71
5.1 Princip delovanja	71
5.2 Zgradba merilnega sistema	74
5.3 Eksperimenti	75
5.3.1 Kalibracijske meritve	76
5.3.2 Analiza vpliva zračnih turbulenc	79
5.3.3 Verifikacija kalibracije	81
5.3.4 Lezenje	83
5.3.5 Primerjalne meritve	83
5.4 Uporaba sistema	87
6 Zaključek	93
Literatura	97
A Zgradba optičnega dela merilnega sistema	103
A.1 Polarizacijska odvisnost sistema	106
B Kinematični model KMR	107
B.1 Osnovni model	107
B.2 Razširjeni model	109
C Optimizacija kinematičnih parametrov KMR	111
C.1 Izbira modela	111
C.1.1 Matematične lastnosti primerenega modela	111
C.1.2 Opis modela	112
C.2 Zbiranje kalibracijskih podatkov	112
C.3 Identifikacija parametrov	113
D Programska oprema za zajem meritev	117

E Tehnične specifikacije uporabljenih instrumentov	121
E.1 Laserski interferometer Heidenhain ILM-1131	121
E.2 Laserski interferometer Renishaw ML10 + EC10	122
E.3 Elektronska libela Wyler Minilevel NT	123
F Optical deflection measuring system	125

Seznam slik

1.1	Koordinatna merilna roka	6
1.2	Merilni sistem kot ga predlaga Huang	10
1.3	Merilni sistem kot ga predlaga Fan	11
2.1	Model merilne roke	17
2.2	Predpostavljene dimenzijske merilne roke	18
2.3	Vpliv lastne teže na segment	21
2.4	Delež posameznih virov negotovosti v skupni ocenjeni negotovosti KMR .	26
3.1	Deformiran segment	38
3.2	Kvadrantna fotodioda in projiciran žarek	38
3.3	Glavni sestavnini deli merilnega sistema	40
3.4	Projekcija referenčnega žarka, posneta s CCD čipom	41
3.5	Funkcionalni diagram detektorskega vezja	41
3.6	Optična glava in detektorsko vezje	42
3.7	Eksperimentalna postavitev sistema	43
3.8	Kalibracijski sistem med delovanjem	44
3.9	Odziv detektorja v osi X in Y	45
3.10	2D-odziv detektorja	46
3.11	Občutljivost detektorja v merilnem območju	47
3.12	Časovno lezenje sistema	48
3.13	Pozicijska napaka v merilnih točkah	49
3.14	Statistična porazdelitev napake v merilnih točkah	49

3.15 Dva primera mogoče uporabe merilnega sistema	50
4.1 Koordinatna merilna roka AMG-2	54
4.2 Laserski merilni sistem, pritrjen na segment merilne roke	55
4.3 Razlika med indiciranim in dejanskim prečnim odmikom segmenta	56
4.4 Pričakovani odkloni v različnih legah roke	57
4.5 Postavitev sistema pri preizkusu s statično obremenitvijo	58
4.6 Odklon segmenta pri statični obremenitvi	58
4.7 Odklon pri večanju statične obremenitve segmenta	59
4.8 Odklon zaradi sile teže pri različnih kotih v drugem sklepu	59
4.9 Merilna roka, pritrjena na kalibracijsko napravo	61
4.10 Položaj merilne roke pri vodenju s kalibracijsko napravo	61
4.11 Deformacija segmenta zaradi zunanje sile na vrhu	62
4.12 Dinamična deformacija segmenta pri hitrejšem gibu	65
4.13 Dinamična deformacija segmenta pri počasnejšem gibu	66
4.14 KMR in kalibracijska naprava pri zajemanju kalibracijskih točk	68
4.15 Residuumi po optimizaciji kinematičnega modela	69
5.1 Dve vrsti premosti	72
5.2 Linearna stopnja	72
5.3 Različne metode poravnave izmerjenega profila premosti	73
5.4 Zgradba sistema za merjenje premosti	74
5.5 Izdelana glavna gradnika sistema za merjenje premosti	74
5.6 Glavna enota	75
5.7 Kalibracijska postavitev sistema	76
5.8 Odziv detektorja v X-osi v odvisnosti od odmika	77
5.9 Občutljivost detektorja v odvisnosti od X-odmika, Y-odmika ter razdalje od laserskega vira	77

5.10 Občutljivost detektorja pri ničelnem prečnem odmiku v odvisnosti od razdalje od laserskega vira	78
5.11 Statistična porazdelitev odstopanj meritev pri različnih razdaljah laser - detektor	80
5.12 Standardna deviacija in število vzorcev, potrebnih za $\sigma_d=0.5$, v odvisnosti od razdalje	81
5.13 Verifikacijske meritve - Sx in Sy na grafih označujeta standardno deviacijo za os X in Y pri posamezni oddaljenosti.	82
5.14 Lezenja sistema v nekontroliranem okolju	83
5.15 Postavitev prvega primerjalnega preizkusa	84
5.16 Vertikalni profil premosti, izmerjen z novim laserskim sistemom, interferometrom in elektronskim inklinometrom	85
5.17 Standardna deviacija vzorcev v posamezni poziciji	85
5.18 Postavitev drugega primerjalnega preizkusa	86
5.19 Horizontalni profil premosti, izmerjen z novim laserskim sistemom in interferometrom	87
5.20 Merjenje premosti gibanja na CNC brusilnem stroju	88
5.21 Rezultati meritve premosti - CNC brusilni stroj	89
5.22 Rezultati meritve premosti - CNC obdelovalni center	89
5.23 Postavitev sistema pri dinamični meritvi in meritvi ponovljivosti	90
5.24 Dinamična meritev pozicije glave obdelovalnega stroja pri približevanju programirani legi	90
5.25 Meritev ponovljivosti pozicije glave obdelovalnega stroja	91
5.26 Nekateri mogoči načini uporabe sistema za merjenje geometričnih lastnosti objektov oz. gibanja	92
A.1 Optični gradniki merilnega sistema ter njihova namestitev	104
A.2 Zgradba kolimatorskega sklopa Thorlabs F230FC-B	105
A.3 Odziv sistema pri zvijanju optičnega vlakna	106

B.1	Pomen transformacijskih matrik	107
B.2	Lege posameznih koordinatnih sistemov	108
C.1	Potek vrednosti cenilke pri optimizaciji	115
D.1	Merilna aplikacija - časovni prikaz meritev	118
D.2	Merilna aplikacija - XY prikaz pozicije	119
D.3	Merilna aplikacija - kalibracijski zaslon	120

Seznam tabel

2.1	Viri merilne negotovosti KMR	16
2.2	Mehanske lastnosti nekaterih gradnikov modela	18
2.3	Ocene prispevkov posameznih virov negotovosti	25
3.1	Nekatere lastnosti merilnega sistema	51
4.1	Povprečni residuum v kalibracijskih točkah	69
A.1	Specifikacije kolimatorskega sklopa Thorlabs F230FC-B	105
C.1	Obstoječi načini merjenja 3D pozicije in / ali orientacije vrha	113
E.1	Tehnične specifikacije laserskega interferometra Heidenhain ILM-1131 . . .	121
E.2	Tehnične specifikacije laserskega interferometra Renishaw ML10 + EC10 .	122
E.3	Tehnične specifikacije elektronske libele Wyler Minilevel NT	123

Povzetek

Disertacija obravnava meritve lateralnih premikov v preciznih mehanskih sistemih. Njeno jedro je v na novo razvitem laserskem merilnem sistemu, ki za natančno merjenje majhnih odmikov uporablja laserski žarek za vzpostavitev ravne referenčne linije ter na premik občutljivi element za zaznavanje odmika od le-te. Merilni sistem je bil zasnovan kot univerzalen gradnik, namenjen integraciji v poljuben mehanski sistem; razvit pa je bil predvsem z namenom izboljšanja točnosti koordinatnih merilnih rok in drugih podobnih mehanizmov, saj že najmanjše deformacije v kinematični strukturi kvarno vplivajo na njihovo delovanje. V uvodnem delu se zato posvetimo teoretični analizi virov negotovosti v koordinatnih merilnih rokah ter zaključimo z oceno, da elastične deformacije že pri manjših izvedbah merilnih rok prispevajo vsaj 30 odstotkov k celotni merilni negotovosti.

Nadalje je opisan in analiziran nov merilni sistem z dvema ključnima sestavnima deloma: referenčnim laserskim virom ter detektorsko enoto. Referenčni del je osnovan na uporabi laserske diode, sklopljene na enorodovno optično vlakno, kot vira svetlobe ter na vezju za njeno natančno krmiljenje. Rezultat je kvaliteten referenčni žarek, ki ga odlikuje visoka časovna in temperaturna stabilnost. Na nasprotnem koncu merjenega objekta odmike od žarka zaznava vezje, zgrajeno okoli kvadrantne fotodiode. Detektor vsebuje potrebno elektroniko za zajem in digitalizacijo meritev v realnem času, oba elementa pa preko skupnega digitalnega vodila povezuje glavna nadzorna in napajalna enota. Kalibracija in evalvacija sistema je potekala v nadzorovanem okolju klimatske komore. Doseženi sta bili ločljivost $0.1 \mu m$ ter točnost $0.8 \mu m$ v merilnem območju ± 0.3 mm ter pri vzorčni frekvenci 1 kHz. Časovno lezenje sistema je znoraj $2 \mu m$ v obdobju 10 ur.

Sledila je integracija merilnega sistema v obstoječo koordinatno merilno roko. To nam je omogočilo prve neposredne meritve deformacij na takšni napravi in torej kvantifikacijo posameznih prispevkov v deformaciji segmenta merilne roke: odklane zaradi težnosti, dinamično silo na vrh ob pospeševanju in zaviranju, odklane zaradi bližine singularnosti mehanizma ter prehodne pojave zaradi trenja in lepenja v sklepih. Z

uporabo lastnega kinematičnega modela roke smo izvedli tudi identifikacijo kinematičnih parametrov s pomočjo numerične optimizacije. Primerjava z modelom, ki je vključeval izmerjeno deformacijo segmenta, je pokazala do 16 odstotkov boljšo točnost, kljub zgolj nepopolni informaciji o deformaciji - dve neposredno in dve posredno izmerjeni prostostni stopnji v enem samem segmentu.

Nazadnje je bil izdelan še sistem za merjenje premosti. Ta temelji na enakih osnovnih gradnikih, prilagojenih za delo v industrijskem okolju, pri čemer so bistvene lastnosti sistema ostale neokrnjene. Tako je možna tudi hitra pritrditev in uporaba sistema na poljubnih strojnih elementih. Ponovno izvedene kalibracijske in verifikacijske meritve kažejo na maksimalno merilno odstopanje $2 \mu m$ na razdaljah do 2 m ter odlično časovno stabilnost sistema tudi v nekontroliranem okolju. Ker je žarek v nasprotju s predhodno aplikacijo sistema na daljši poti skozi zrak izpostavljen okoliškim vplivom, smo posebno pozornost namenili tudi analizi vpliva zračnih turbulenc na meritve. Natančne primerjalne meritve, hkrati izvedene z novim sistemom in standardno uporabljenim laserskim interferometrom, kažejo na ujemanje v območju $1 \mu m$. Za ilustracijo univezalne narave razvitega sistema pa smo končno izvedli tudi nekaj praktičnih primerov meritve na obdelovalnih strojih: meritve premosti, ponovljivosti ter dinamično meritve približevanja referenčni legi.

Ključne besede: optične meritve odmikov, lasersko merjenje deformacij, kompenzacija deformacij v realnem času, merjenje premosti, geometrične in dinamične meritve strojev

Abstract

The thesis is focused on lateral displacement measurements in precision mechanical systems. It is centered around a novel laser measurement system for accurate measurement of small displacements. The system uses a laser beam to generate a straight reference line and a position-sensing element to measure the deviations from the established reference. It was conceived as a universal component for integration in various mechanical assemblies, but was primarily designed with the purpose of improving coordinate measurement arms (CMA) performance. It is also intended to improve the functionality of similar mechanisms, where the performance can be seriously deteriorated by even the smallest deformations in the kinematic structure. In the introduction, a theoretical analysis of CMA error sources is therefore performed. The contribution of elastic deformations in the overall CMA error budget is estimated to be at least 30 percent even in CMAs with smaller workspace.

Afterwards, the new measurement system is described. It comprises two key components: a reference laser source and a detector unit. The reference unit is based on a laser diode, coupled to a single mode optical fiber and a precision diode driving circuit. As a result, a high-quality reference beam with high temporal and temperature stability is generated. On the opposite side of the measured object, deflections from the reference beam are detected by a circuit built around a quadrant photodiode. The detector unit contains the electronics, necessary to capture and digitize deflection data in real time. Both units are connected to a master control and power supply unit by means of a common digital bus. Calibration and evaluation of the system was performed in a climate controlled chamber. A $0.1 \mu m$ resolution and $0.8 \mu m$ accuracy was attained at 1 kHz sample frequency in a ± 0.3 mm measurement range. Drift of the system was determined to be within $2 \mu m$ in a 10 hour period.

The system was then integrated into an existing CMA and a first attempt of direct CMA link deformations measurements was performed. It was then possible to quantify the various contributions to the total deformation of the link: deflections caused by gravity, dynamic forces to the end-effector due to acceleration and deceleration, forces caused by kinematic singularities and transitional effects induced by friction and

stiction in CMA bearings. Furthermore, identification of CMA kinematic parameters was performed using numeric optimization. Using a model that incorporates deflection measurements, up to 16 percent improvement in accuracy was shown, even with incomplete deformation information - i.e., two directly and two indirectly measured degrees of freedom.

Finally, a straightness measurement system was developed. It is based on similar basic components, adapted for usage in industrial environment, but preserving its key characteristics. It is thus possible to mount the system quickly to arbitrary machine components. The system was calibrated and verified to show a maximum $2 \mu m$ error at distances up to 2 m. It also demonstrated excellent stability in non-controlled environment. As the reference beam is exposed to disturbances from its environment, special attention was paid to the impact of air turbulence on the measurements. Accurate comparative measurements were also performed simultaneously with the newly developed system and a standardly used laser interferometer. Discrepancies were found to be within $1 \mu m$. To illustrate the universal nature of the new system, practical examples of measurements were performed on machine tools: measurements of straightness, repeatability and dynamic positioning.

Keywords: optical deflection measurement, laser deformation measurement, real-time deflection compensation, straightness measurement, geometrical and dynamical machine tool measurements

1 Uvod

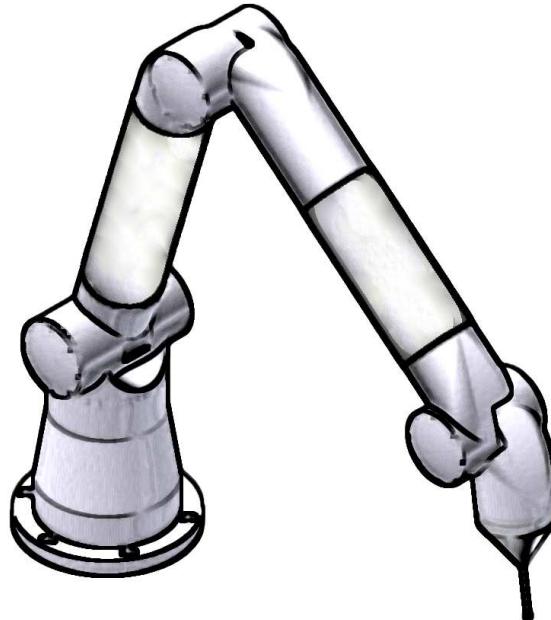
”The trouble with measurement is its seeming simplicity.”

- Neznani avtor

Danes staro spoznanje, da česar ne moremo meriti, ne moremo izpopolniti, velja bolj kot kadarkoli. Delovanje sodobnega sveta podpira obsežna tehnološka infrastruktura, ki je posameznikom pogosto nevidna, a se nanjo nevede zanašajo v vsakdanjem življenju. Eno takih področij je zagotovo znanost merjenja, metrologija. Merjenje je aktivnost, ki človeštvu služi že stoletja, v tem času pa se je obseg merjenih veličin in njihova natančnost nenehno povečevala. Danes je metrologija eden ključnih gradnikov družbenega sodelovanja na področju proizvodnje, trgovine, varovanja okolja, zdravja, telekomunikacij, transporta in ne nazadnje tudi znanosti. Ni nenavadno, da je napredek na teh pa tudi drugih področjih tesno povezan z napredkom na področju metrologije. Tudi globalizacijski procesi ob vseh dobrih in slabih posledicah, ki smo jim priča, temeljijo na natančnih in primerljivih meritvah in bi bili brez njih preprosto nemogoči. Prav sledljivost in primerljivost meritev namreč omogočata svetovno distribuirano proizvodnjo in menjavo, ti pojavi pa so hkrati tudi novo gonilo razvoja metrologije ter širijo zavedanje o njeni pomembnosti.

Tržni uspeh in varnost uporabe proizvodov sta odvisna od kakovosti in meritve imajo tu najpomembnejšo vlogo. Metrologija je ključna na vseh nivojih proizvodnje in distribucije, natančno izmerjeni izdelki in storitve pa so prvi pogoj za ekonomski napredek posameznih gospodarstev. Proizvodne tolerance v vseh domenah industrije so se od leta 1960 vsakih deset let zožale za faktor tri [1]. Posledica tega pojava je po eni strani večja zmogljivost in zanesljivost proizvodov na področju klasičnega strojništva, po drugi pa pojav novih tehnologij, ki jih visoko precizna izdelava omogoča.

Rdeča nit pričajoče disertacije je prav dimenzijska metrologija in širše industrijska metrologija. Zadnja je ena treh metroloških vej - industrijske, znanstvene in zakonske metrologije. V tem delu se po uvodnih poglavjih - opisu stanja tehnike in analize vplivov na negotovost koordinatnih merilnih rok - z razvojem novega merilnega sistema dotaknemo najprej druge, nato pa z njegovo uporabo v industrijskem merilniku še prve.



Slika 1.1: Koordinatna merilna roka

1.1 Koordinatne merilne roke

Industrijska proizvodnja se danes poleg večanja količin sooča z vedno večjo raznolikostjo izdelkov, ta pa zahteva večjo fleksibilnost in odzivnost proizvodnega procesa ter z njim seveda tudi merilnih tehnologij. Na področju dimenzijske metrologije se srečujemo z nekaterimi omejitvami sistemov, kot so npr. kartezični koordinatni merilni stroji. Pojav le-teh je za dimenzijsko metrologijo sicer pomenil revolucionarne spremembe v smislu točnosti in enostavnosti meritev vseh vrst proizvodov, hkrati pa njihove kompleksnosti v primerjavi s tradicionalnimi metodami¹. Sodobna proizvodnja z množico specializiranih področij pa je vir potreb po vedno novih načinih merjenja in vedno večji prilagodljivosti. Z napredkom povezanih tehnologij² so se tako pojavile koordinatne merilne roke (KMR), t. j. merilni mehanizmi s pretežno antropomorfnimi konfiguracijami ter izključno pasivnimi³ rotacijskimi sklepi (slika 1.1).

Katere so bistvene lastnosti KMR, ki jim na posameznih področjih omogočajo prednost pred klasičnimi koordinatnimi merilnimi stroji? Predvsem je to prenosnost naprav in možnost umestitve v delavnško okolje. Koncept, pri katerem merilno napravo

¹Tu govorimo le o kontaktnih merilnih metodah v dimenzijski metrologiji. Te v primerjavi z brezkontaktnimi omogočajo veliko večjo točnost. Med slednjimi so npr. zelo razširjeni različni laserski skenerji, ki omogočajo neposreden zajem kompleksnih 3D oblik, in laserski sledilniki, ki med drugim omogočajo koordinatno merjenje na velikih razdaljah

²Z razvojem računalništva, natančnih kotnih merilnih sistemov, naprednih materialov itd.

³Sklepi praviloma ne vsebujejo nobenih aktuatorjev, mehanizem pa operater premika ročno

prenesemo k merjencu namesto merjenca k merilni napravi, poleg očitnih prednosti prinaša tudi nove možnosti uporabe: merjenje med samim procesom izdelave (na stroju ali v proizvodni liniji); v primeru velikih merjencev namestitev KMR na merjencu ali celo vanj in možnost poljubnega razširjanja merilnega območja s prestavljanjem; merjenje izdelkov in njihove medsebojne lege, ko se ti že nahajajo v sestavu (npr. v avtomobilski in letalski industriji); lažje merjenje kompleksnih izdelkov zaradi redundantnosti mehanizma; fleksibilnost pri ročnem laserskem skeniranju itd.

Po drugi strani pa je mehanska zasnova KMR tudi vzrok za največjo pomanjkljivost današnjih naprav - manjšo dosegljivo točnost meritev. Ta prirojena slabost je posledica kinematične strukture roke, ki je relativno občutljiva na zunanje vplive in notranje nepravilnosti. Posredno merjenje pozicije vrha preko več kotov v sklepih, omejena togost rotacijskih sklepov in segmentov, ki morajo biti optimirani na težo, ter nedoločljivi človeški faktor so le nekateri od teh dejavnikov. Ti v končni posledici pripomorejo k merilni negotovosti, ki je od klasičnih merilnih strojev večja vsaj za en velikostni razred. Izboljšanje ponovljivosti in absolutne točnosti je zato v središču razvojnih naporov na področju KMR.

Ker gre za relativno mlado področje, prve merilne roke pa so bile plod razvoja tržno usmerjenih podjetij, je znanstvena obravnava KMR precej pičla. Analitične obravnave in razvoja nove KMR se je tako lotil Kovač [2], ki izhaja iz dejstva, da omenjene naprave še ne dosegajo točnosti, ki se zahteva v proizvodnem strojništvu. Razvita je bila antropoidna merilna naprava "AMG-1" s petimi rotacijskimi sklepi, ki vsebujejo kotne merilne sisteme z dvema čitalnima glavama in vmesniškimi karticami v osebnem računalniku. Sklepi so narejeni iz AL zlitine in prilepljeni na kompozitne segmente. V [3] predvideva tri možne uporabe KMR:

- ročna, prenosna koordinatna merilna naprava,
- robotska vodena koordinatna merilna naprava⁴,
- naprava za testiranje industrijskih robotov⁵,

v [5] pa kategorizira glavne vire napak in ugotovi, da je večina le-teh sistematske narave in jih je zato mogoče zmanjšati s kalibracijo KMR. Tako predstavi novo kalibracijsko napravo [4], ki naj bi prinesla izboljšanje rezultatov v primerjavi s klasičnimi metodami kalibracije ("ball-bar", različne šablone, artefakti itd.). Ustrezno rešitev ponuja v obliki

⁴Robot vodi KMR pri njenem vrhu ter jo tako poljubno pozicionira

⁵Vrh KMR je ponovno pritrjen na vrh robota, čigar natančno lego lahko meri v namen ocenjevanja zmogljivosti robota

robustne mehanske opreme za vodenje in merjenje pozicije vrha KMR vzdolž referenčne črte, ki jo je mogoče v prostoru poljubno usmerjati. Omogočati mora pozicioniranje z natančnostjo, ki je vsaj za velikostni razred boljša od merilnih lastnosti KMR. Ta glede na prejšnje raziskave na "AMG-1" znaša $2,5 \mu\text{m}$ za statistično verjetnost $\pm 2\sigma$ v najbolj ugodnem delu delovnega prostora. Merilni sistem kalibracijske naprave sestavlja laserski interferometer za merjenje položaja v glavni osi gibanja in nadzorni sistem za merjenje premikov sani v prečnih smereh. Zbrani podatki se nato uporabijo v postopkih identifikacije kinematicnih parametrov mehanizma, ki so znani s področja robotike oz. robotske kalibracije. Ti postopki so bili v literaturi večkrat obravnavani [44],[45], [46] in omogočajo izboljšavo absolutne natančnosti mehanizmov z rotacijskimi osmi blizu meje ponovljivosti. Uporabljeni optimizacijski algoritmi običajno zmanjšujejo razdalje oz. evklidske norme med dejanskimi (izmerjenimi) ter izračunanimi položaji vrha mehanizma. Kakovost razpozname kinematicnih parametrov razberemo iz statistične analize prav teh razlik. Dosežene maksimalne vrednosti odstopanj po kalibraciji so bile tako 0.04 mm v vodoravni legi in 0.1 mm v nagnjeni (50°) legi [4]. Zaradi različnih obremenitev v obeh primerih je izveden sklep, da je ta razlika posledica elastičnih deformacij v mehanizmu. Dodatne meritve so kazale na odstopanja, manjša od 0.1 mm, razen v ekstremnih primerih, ko je mehanizem v singularni konfiguraciji. Takrat namreč nastopijo velike notranje sile in momenti, ta izsledek pa se ujema s predpostavko o vplivu elastičnih deformacij. Da imajo dinamične deformacije prevladujoč vpliv na točnost KMR, je Kovač ugotavljal tudi v [3], kjer je hkrati meril odstopanje pozicije ter silo na vrhu AMN med njenim premikanjem. Pri tem sta se ti dve veličini izkazali za zelo dobro korelirani, kar znova potrjuje gornjo domnevo.

Tudi Blaschun razvije novo KMR [7]; v delu se posveča konstrukcijskim in teh-nološkim vidikom izgradnje KMR, predvsem pa predstavi metodo za merjenje vseh odstopanj od krožnega gibanja zaradi opleta ležajev v posameznih sklepih. Meritve se izvajajo s šestimi linearnimi merilniki, ki omogočajo popolno informacijo o prostorskem odstopanju vektorja rotacije sklepa. Najpomembnejša okoliščina pri tem je, da se meritve izvajajo, ko so sklepi že del sestavljenega KMR, in tako zajamejo napake, ki nastanejo pri njihovi montaži v mehanizem. Za kompenzacijo teh napak predlaga vpogledno tabelo in z meritvami na prvi osi KMR zmanjša odklone od idealne krožnice z $\pm 0.13 \text{ mm}$ na $\pm 0.04 \text{ mm}$, natančnejših meritev lastnosti celotne merilne roke in vpliva kompenzacije nanje pa se žal ne loti. Na koncu kot možnost izboljšave KMR navede tudi meritev upogiba segmentov z laserskim sistemom.

Loetze je avtor koordinatne merilne naprave "ScanMax" [6], ki ni antropomorfne, marveč SCARA konfiguracije, vendar jo zaradi uporabe rotacijskih osi prav tako

omenjamo. Sestavlja jo vertikalna translacijska os z linearnim enkoderjem, dva segmenta, povezana z rotacijskimi sklepi, in tipalo 3D na vrhu mehanizma. Posebnost naprave je senzor sile, ki zaznava obremenitev na vrhu naprave. Povzroča jo sila operaterja, ki je hkrati sila merjenja na vrhu tipala. Deformacijo le-tega zaradi sile merjenja tako kompenzira v realnem času. Tudi Loetze ugotavlja, da je rotacijski mehanizem zelo občutljiv na napake v kinematičnih parametrih ter se nadalje posveča kalibraciji le-teh in analizi drugih sistematskih in naključnih napak. Za končno točnost naprave navede⁶ vrednost $5 \mu\text{m}$.

Med komercialno dostopimi KMR v času pisanja na trgu prevladujejo izdelki podjetij "Faro" in "Romer". Podrobnosti o tem, kako naslavljajo omenjene probleme, seveda niso dostopne. Merilne roke "Faro" uporabljajo dve ali več čitalnih glav enkoderjev za izboljšanje točnosti meritve kotov, v [9] pa je opisan tudi sistem z več senzorji aksialnih premikov v sklepih. Ti naj bi merili tri translacijske in dve rotacijski komponenti odklonov v posameznem sklepu, ki nastanejo zaradi obremenitve le-tega; vloga teh meritev v kompenzaciji shemi roke pa ni jasna. Veliko zmedo na tem področju povzročajo tudi deklarirane zmogljivosti trženih KMR (navajanje točnosti do $5 \mu\text{m}$), ki so predmet različnih metodologij, v praksi pa so bile večkrat ovržene. Temu je botrovala tudi odsotnost enotnih standardov s tega področja. Šele nedavno so bili namreč sprejeti ustrezni standardi [10, 11], ki določajo preizkuse za določanje in ponovne overitve zmogljivosti KMR.

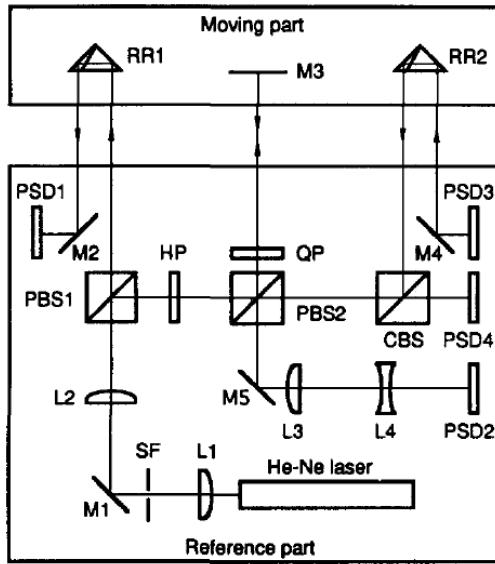
1.2 Laserske meritve lateralnih premikov

Optične metode so na področju merjenja majhnih prečnih premikov in premosti⁷ uveljavljene že dlje časa. Uporaba laserskega žarka za vzpostavitev ravne referenčne črte na eni in na premik občutljivega detektorja na drugi strani je pogosta v napravah, kot so npr. avtokolimatorji [13, 14]. Kot detektorski element se lahko uporabijo segmentne (kvadrantne) fotodiode, lateralni fotodetektorji [12] in detektorji CCD oz CMOS [33], pri čemer so zaradi dosegljive ločljivosti in enostavnosti uporabe najbolj pogoste segmentne fotodiode. Nekatere cenene rešitve so vključevale tudi uporabo CD [15] ali DVD [28] laserskih glav.

Merjenje majhnih premikov je bilo tudi del nekaterih poskusov kompenzacije na-

⁶Loetze kot merilo za določanje točnosti uporabi največje odstopanje pozicije izmerjene okrogle izvrtine v plošči dimenzij $300 \times 200 \text{ mm}$.

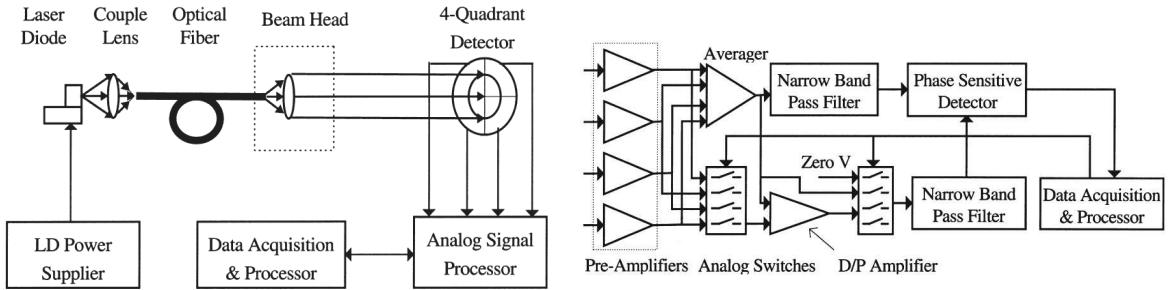
⁷Premost gibanja opisuje translacijske odklone od premice, ki ustreza glavni smeri gibanja, v ravnini, ki je pravokotna na to premico.



Slika 1.2: Merilni sistem kot ga predлага Huang

pak preciznih strojev [42]. V nasprotju s pristopom, ko se napakam skušamo izogibati, so ti sistemi namenjeni merjenju odstopanj v realnem času ter ustreznih kinematičnih kompenzacij. Huang [26] tako predstavi prototipni sistem za merjenje petih komponent napake (horizontalno in vertikalno premost ter kote pitch, roll in yaw) na dveh oseh horizontalnega merilnega stroja. Sestavlja ga stacionarni del s stabilnim He-Ne laserjem in detektorskimi elementi ter premični del z zrcali (slika 1.2). Uporabljena je kompleksna optika, ki žarek razcepi na štiri dele; dva se v premičnem delu odbijeta od retroreflektorja in sta namenjena merjenju premosti in kota roll, tretji se odbije od ravnega zrcala in po principu avtokolimacije služi merjenju kotov pitch in yaw, četrти pa je namenjen zgolj kompenzaciji lezenja laserskega vira. Zaradi teže in velikosti sistema (400×200 mm) je enota za Z os poenostavljena in namesto He-Ne laserja vsebuje diodnega, meri pa le dve premosti gibanja. Kljub temu vsebuje veliko optičnih elementov za preoblikovanje žarka (ta ima na izhodu diode eliptično obliko), zopet pa je potrebna kompenzacija lateralnega lezenja. Sistem je dosegel točnost $1''$ pri merjenju kota in $5 \mu\text{m}$ pri merjenju premosti; diagonalni test⁸ merilnega stroja pa je pokazal izboljšanje točnosti na $14 \mu\text{m}$. Fan [27] pa je avtor sistema za merjenje vseh šestih geometričnih napak hkrati. Vsebuje tri laserske Dopplerjeve merilnike razdalje, ki zaznavajo razdaljo do treh retroreflektorjev; na ta način izmerijo vsa odstopanja z izjemo premosti, katere merjenju sta namenjena še dva dodatna detektorska elementa. Dosežena točnost pozicijskega

⁸Preizkus, pri katerem se stroj premika po eni od diagonal delovnega prostora, pri čemer je z diagonalo poravnani tudi referenčni žarek laserskega inteferometra. Ta meri prostorska odstopanja v določenih točkah vzdolž diagonale.



Slika 1.3: Merilni sistem kot ga predlaga Fan

dela je znašala $5 \mu m$ na območju ± 0.1 mm, orientacijskega dela pa $\pm 1''$. Pri tem je treba omeniti, da je bil sistem predviden za kalibracijo, ne pa za meritve v realnem času.

Čeprav opisani sistemi hkrati merijo več prostostnih stopenj prostorske napake linearne stopnje stroja, so za dejansko integracijo v industrijske naprave preveč okorni in občutljivi. Ob težnji, da se pri tovrstnih sistemih namesto He-Ne laserja uporablajo laserske diode, pa je težavna predvsem stabilnost laserskega žarka in posledično časovno lezenje meritve. Ta inherentna slabost laserskih diod je bila elegantno rešena z uvedbo optičnega vlakna kot vmesnega elementa med svetlobnim virom in izhodno optiko. Takšni sistemi lahko učinkovito opravljajo nekatere meritve, ki so doslej zahtevale uporabo mnogo dražjih laserskih interferometrov [32]. Fan [29] prvi opiše sistem za merjenje premosti z uporabo laserske diode, sklopljene na optično vlakno. Uporabi diodni laser, katerega moč modulira z izbrano frekvenco, sprejemni sistem pa vsebuje predajačevalnike fototokov, vezja za povprečenje, ozkopasovne filtre, fazno občutljivi detektor, 12-bitni A/D pretvornik ter sistem za zajemanje in obdelavo podatkov (slika 1.3). Namen precej zapletenega detektorskega sistema je predvsem v izločanju motenj, ki jih povzročajo okoliška svetloba (luči) in enosmerni električni drifti. Kalibrirani sistem je na območju $\pm 100 \mu m$ in razdalji 1 m za največ $0.3 \mu m$ odstopal od linearne karakteristike, prav toliko pa je znašala tudi časovna stabilnost v 12-urnem obdobju.

Poenostavljen sistem zgradi Feng [30]; vsi aktivni elementi sistema so v stacionarnem delu, premični del pa vsebuje le retroreflektor. Na ta način je le-ta neožičen, kar je ugodno predvsem za meritve pri daljših razdaljah; poleg tega je podvojena tudi občutljivost sistema. Največje odstopanje po linearni kompenzaciji je bilo približno $10 \mu m$, standardna deviacija pri meritvi lezenja laserskega žarka v obdobju 35 min pa je znašala $0.9 \mu m$. Kuang [31] pa predstavlja optični sistem za merjenje štirih prostostnih stopenj napake hkrati. Stacionarni del vsebuje na optično vlakno sklopljen laserski vir, polarizacijski delilnik žarka in dva kvadrantna fotodetektorja, premični del pa

retroreflektor in druge optične elemente. Največje odstopanje translacijskega dela po kalibraciji je znašalo $3 \mu m$ na območju $\pm 500 \mu m$, orientacijskega pa $5 \mu m$ na območju $\pm 400^\circ$.

V robotiki so bili podobni sistemi predlagani v povezavi s fleksibilnimi manipulatorji. Sicer običajna predpostavka o togosti robotskih segmentov tu ne velja, elastične deformacije v le-teh pa je za učinkovito vodenje - tako izboljšanje statične točnosti kot dinamičnih lastnosti manipulatorja - potrebno meriti. Obstaječe metode vključujejo posredno merjenje s pospeškometri, uporavnimi lističi in senzorji z optičnimi vlakni, vendar pa ti načini vključujejo kompleksne preračune pogosto zelo šumnih in netočnih meritev lokalnih deformacij materiala ali pospeškov. Tudi tu se kot ustreznejša rešitev kaže neposredno merjenje deformacije segmentov.

Takšen sistem prva predlagata Demeester in Van Brussel [17]. Sestavlja ga tri laserske diode in trije na premik občutljivi detektorji. Sistem uporabi Swevers [18] za vodenje enosegmentnega fleksibilnega manipulatorja s čim večjo hitrostjo in minimalno sledilno napako. Kasneje Xu [19] predlaga sistem z laserjem in dvema detektorjema za merjenje odklonov v ravnini, v kateri se segment giba, podobno tudi Yang [20] in Tso [21]. Vsi poskušajo izmerjeno deformacijo s pomočjo primernega modela manipulatorja tudi kompenzirati z ustrezno korekcijo v spremenljivkah sklepov. Podobne sisteme zasledimo še v drugih raziskavah fleksibilnih manipulatorjev [22, 24]. Skupna slabost omenjenih merilnih sistemov je predvsem v njihovi neprimernosti za uporabo v funkcionalnih manipulatorjih v realnem okolju; namestitev občutljivih komponent večjih dimenzij zunaj samega segmenta lahko namreč ovira normalno delovanje tako manipulatorja, kot tudi samega merilnega sistema.

1.3 Nov laserski merilni sistem za merjenje prečnih odklonov

Osnova te disertacije je nov laserski sistem za merjenje lateralnih premikov. Kot smo doslej že pokazali, bi tak merilni sistem lahko relevantno pripomogel k napredku na več področjih, če bi le izpolnjeval naslednje zahteve:

1. visoka ločljivost in majhna končna merilna negotovost;
2. ustrezne mehanske lastnosti (fizične dimenzijs in teža gradnikov), ki bi zagotavljale zmožnost enostavne integracije v ciljni mehanski sistem;
3. visoka časovna stabilnost meritve tudi v nestabilnem (nereguliranem) okolju;
4. dovolj visoka vzorčna frekvenca za zaznavanje dinamičnih pojavov v mehanizmih;

5. enostavna povezljivost sistema v nadrejeni sistem in možnost merjenja v realnem času za kompenzacijo deformacij ciljnega sistema v realnem času;
6. možnost poljubne razširitve - merjenja več prostostnih stopenj hkrati.

Hitro lahko ugotovimo, da sistem, ki bi hkrati združeval vsaj nekatere od omenjenih lastnosti, še ne obstaja. V nadalnjih poglavjih sprva teoretično utemeljimo smiselnost takega sistema v povezavi s koordinatnimi merilnimi rokami. Nato predstavimo razviti laserski merilni sistem in ga sprva analiziramo v vlogi natančnega merilnika deformacij poljubnih mehanskih segmentov, kasneje pa ga uporabimo za merjenje deformacij v KMR. Nazadnje ga modificiramo še v učinkovit sistem za merjenje geometričnih in drugih lastnosti industrijskih naprav.

1.4 Pričakovani izvirni prispevki disertacije

- **Metoda merjenja deformacij segmentov preciznih merilnih in drugih naprav s pomočjo laserja, sklopljenega na optično vlakno, ter detektorja s kvadrantno diodo.** Metoda omogoča merjenje dveh prostostnih stopenj deformacije poljubnega segmenta v realnem času. Temelji na nekaterih že znanih principih optičnega merjenja prečnih premikov, odlikujejo pa jo univerzalnost, relativna enostavnost gradnikov, nameščenih v samem segmentu, ter visoka dosegljiva točnost.
- **Razvoj laserskega sistema z minimalnimi dimenzijami in težo, uporabnega za natančno merjenje prečnih premikov ali deformacij v realnem času.** Razvit je bil lasten prilagodljiv sistem za natančno merjenje prečnih premikov. Sistem združuje lastnosti, potrebne za kompenzacijo deformacij preciznih mehanizmov v realnem času: dobra časovna stabilnost, visoka ločljivost, absolutna točnost in dosegljiva vzorčna frekvenca. Merilni sistem je poljubno razširljiv in omogoča enostavno povezovanje v nadrejeni sistem, njegove fizične lastnosti pa omogočajo enostavno integracijo v poljuben mehanizem, kjer lahko pričakujemo izboljšanje delovanja z uporabo informacije o deformaciji.
- **Uporaba razvitega laserskega sistema v napravi za merjenje premosti linearnih stopenj.** Laserski merilni sistem je bil nadgrajen v napravo za merjenje premosti, namenjeno uporabi v proizvodnem strojništvu. Ta na učinkovit način omogoča merjenje premosti gibanja oz. objektov ter drugih geometričnih lastnosti strojev in naprav v industriji. Sistem je bil prilagojen za delo v nekontroliranem

okolju, obenem pa ohranja vse zmogljivosti osnovne izvedbe. Z natančnimi meritvami je bila pokazana primerljivost rezultatov s tistimi, ki jih sicer pridobimo z uveljavljenimi mnogo kompleksnejšimi merilnimi sistemi.

- **Teoretična analiza in ovrednotenje vplivov na merilno negotovost koordinatnih merilnih rok.** Sistematično so bili analizirani posamezni prispevki k merilni negotovosti koordinatnih merilnih rok ter možnosti za njihovo kompenzacijo z trenutno znanimi metodami. Za pomembnejše prispevke so bili narejeni analitični izračuni v delovnem prostoru modelirane koordinatne merilne roke. Teoretična analiza identificira elastične deformacije v segmentih mehanizma kot enega glavnih virov negotovosti koordinatnih merilnih rok, za katerega metoda kompenzacije še ni bila razvita.
- **Izboljšanje točnosti preciznih koordinatnih merilnih rok z laserskim sistemom za merjenje deformacij segmentov.** Sistem za merjenje deformacij je bil integriran v obstoječo merilno roko in tako omogočil prve tovrstne meritve. Ne-posredne meritve deformacij v statičnih in dinamičnih razmerah sedaj omogočajo zaznavanje posameznih motilnih vplivov v realnem času. Poskusi kompenzacije le-teh so pokazali opazno zmanjšanje napake merilne roke ter začrtali nekatere smernice prihodnjim raziskavam na tem področju.

2 Analiza vplivov na meritno negotovost KMR

Kot smo že uvodoma omenili, je osrednja pozornost na področju KMR namenjena izboljšanju njihove točnosti. Podobno kot pri nekaterih sorodnih problemih tudi tukaj ločimo dva splošna pristopa:

- Izogibanje oz. odprava virov napak. To ponavadi vključuje natančno izdelavo in togo mehansko zasnovo. Za ta tradicionalni pristop je značilna eksponentna odvisnost cene od točnosti naprave. Poleg tega je v veliki meri v nasprotju s konceptom KMR kot prenosne, ročno vodene naprave.
- Kompenzacija napak; tu ločimo kompenzacijo po meritvi in sprotno kompenzacijo. Pri prvi meritve korigiramo s pomočjo matematičnega modela - njegova vzpostavitev je lahko zelo zapletena - ali predhodno izmerjenih kalibracijskih podatkov. Ti metodi sta relativno učinkoviti in dopuščata izboljšanje točnosti približno za velikostni red. Sprotna kompenzacija pa vključuje zajemanje podatkov o vplivnih veličinah v realnem času ter ustrezno korekcijo meritve. To je tudi edina rešitev za zmanjšanje naključnih neponovljivih napak, ki izvirajo iz obremenitev naprave, vplivov okolice itd.

Za učinkovit pristop k odpravljanju napak je treba analizirati vire posameznih prispevkov k skupni meritni negotovosti KMR. Te lahko kategoriziramo, kot sledi v tabeli 2.1. Ta prikazuje posamezne vire pogreškov skupaj z oceno njihovega velikostnega razreda ter možnostjo njihove kompenzacije v skladu z zdajšnjim stanjem tehnike. V nadaljevanju obravnavamo vsakega od virov pogreška, ga poskušamo natančneje ovrednotiti in ugotoviti, ali in kako ga je mogoče kompenzirati. Pri tem nas zanima le groba ocena povzročenega pogreška, t. j. razlike med indicirano in dejansko lego vrha (tipala) KMR v najslabši mogoči legi v delovnem prostoru; torej konfiguraciji mehanizma, ko je pogrešek največji. Zato tudi velja, da ocenjenih vrednosti ni mogoče preprosto seštetи, da bi ocenili meritno negotovost celotne KMR, saj obstaja močna odvisnost vpliva posameznega vira od trenutne lege mehanizma ter drugih okoliščin.

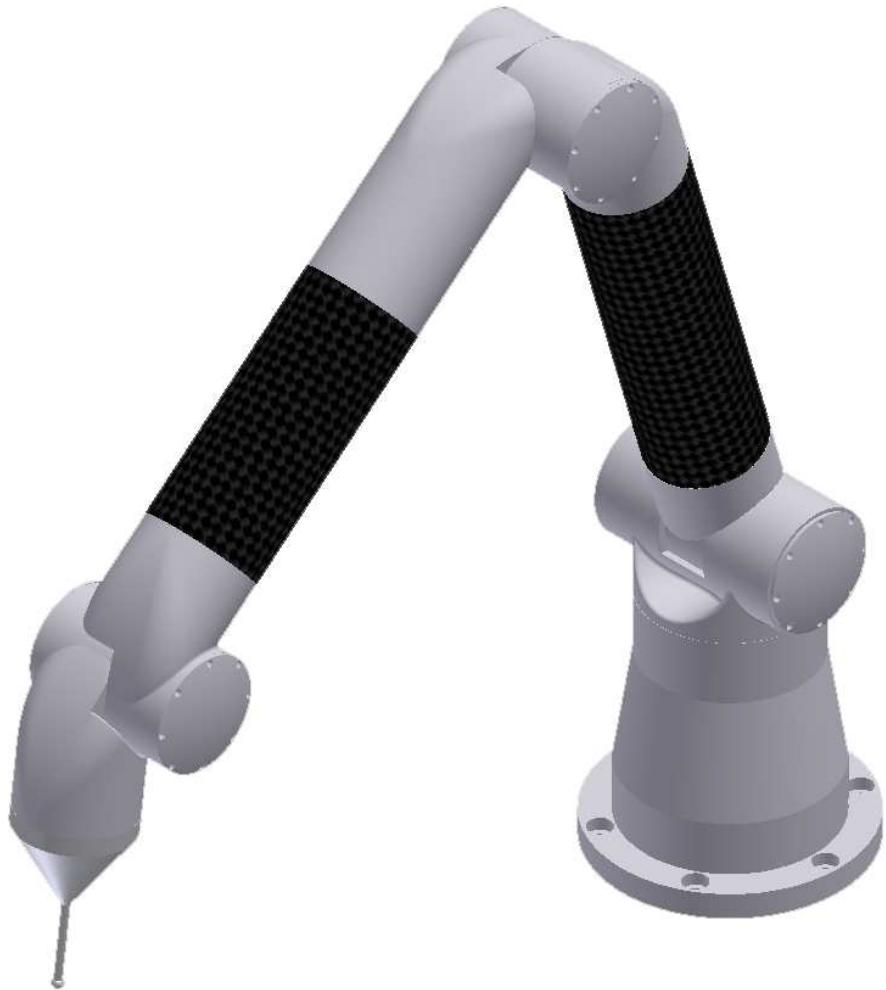
Tabela 2.1: Viri merilne negotovosti KMR

Kategorija	Vir pogreška	Tip kompenzacije	Možnost kompenzacije	Velikostni razred [μm]
Kinematicne napake	Odstopanja dolžin segmentov	S	OFF	$1 \sim 2 \cdot 10^2$
	Inklinacija, zamik osi sklepov			
	Zamik izhodišča merjenja kota			
Napake dajalnikov kota	Ločljivost merjenja	S	-	$1 \sim 5$
	Nelinearnost		OFF	$10 \sim 50$
	Ekscentričnost montaže			$\sim 10^2$
Elastične deformacije	Lastna teža gradnikov	S	OFF/ON*	$10 \sim 10^2$
	Sila operaterja pri premikanju	N	ON*	$10 \sim 50$
	Sila merjenja			
Termične deformacije	Pospesevalne sile			
	Spremembe temperature okolice	S	ON	$\sim 10/{\circ}C$
	Notranji viri topote		OFF	
Napake v sklepih	Radialni, akstalni oplet	S	OFF	$\sim 10^2$
	Trenje & lepenje	N	ON*	
Vplivi okolice	Vibracije, prah, vlaga	N	-	
	Drugi obr. pogoji	N		

OFF - "offline" kompenzacija po meritvi; ON - "online" sprotna kompenzacija

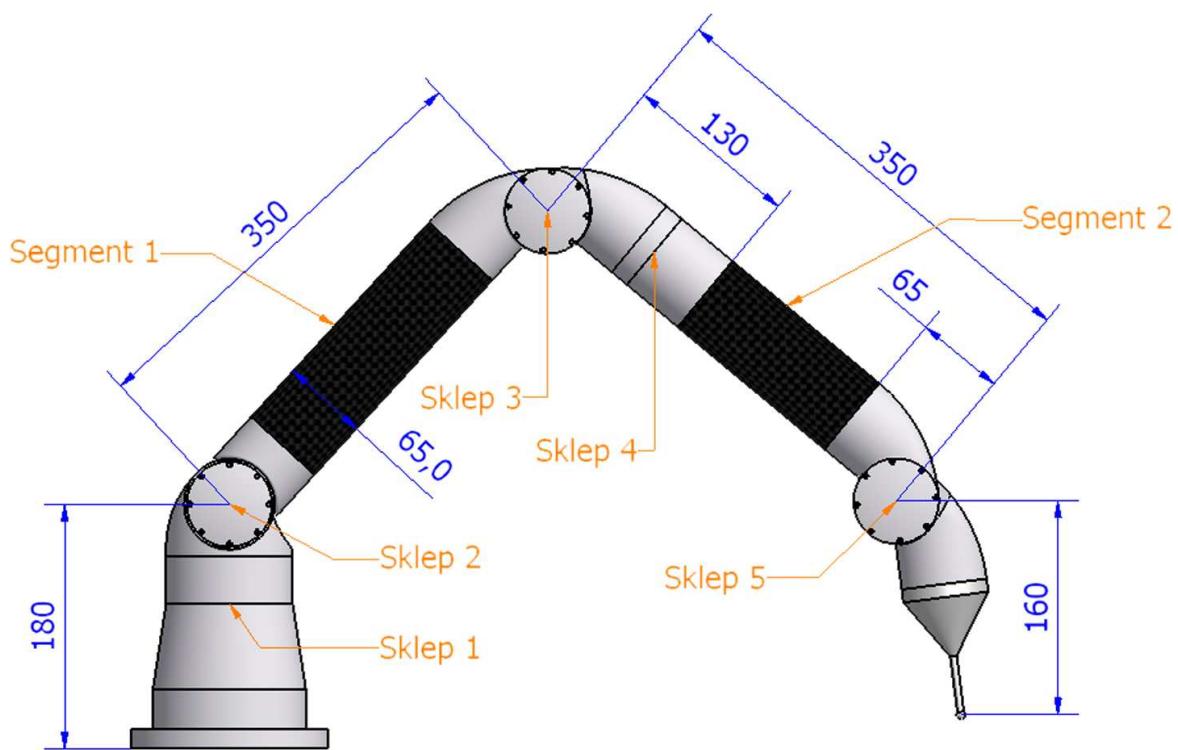
S - sistematski pogrešek; N - naključni pogrešek

(*) Metoda kompenzacije do sedaj ni bila na voljo.



Slika 2.1: Model merilne roke

Za oceno si pomagajmo s konkretnim modelom KMR (slika 2.1). Modelirana KMR ima pet prostostnih stopenj in delovno območje polmera 700 mm. Model vsebuje nekatere predpostavke o zgradbi, dimenzijah (slika 2.2), materialih in drugih lastnostih posameznih gradnikov (tabela 2.2). V veliki meri je idealiziran in tako izračunane vrednosti bi lahko veljale le za merilno napravo enakovredne zgradbe. Kljub temu ima velikostni razred dobljenih vrednosti oz. njihova razmerja univerzalen pomen za naprave podobne velikosti.



Slika 2.2: Predpostavljeni dimenziji merilne roke

Tabela 2.2: Mehanske lastnosti nekaterih gradnikov modela

Segmenti	
Material	Kompozit - karbonska vlakna
Youngov modul	100 GPa
Debelina stene	4 mm
Temp. razteznostni koeficient	$-1,2 \cdot 10^{-6}/C^\circ$
Masa	
- Segment 1	300 g
- Segment 2	220 g
Sklepi	
Material	Aluminijeva zlitina
Youngov modul	70 GPa
Temp. razteznostni koeficient	$2.4 \cdot 10^{-5}/C^\circ$
Masa	
- Sklep 3,5	900 g
- Sklep 4	450 g

2.1 Kinematične napake

Kinematične napake so posledica nenatančne izdelave posameznih sestavnih delov (segmentov, sklepov) in njihovega sestavljanja. Kljub zelo ozkim tolerancam sodobnih obdelovalnih procesov je zadostno dimenzijsko točnost posameznih delov praktično nemogoče doseči. Napake posameznih delov se zaradi zaporedne kinematične strukture roke namreč seštevajo, tudi najmanjša odstopanja pritrdilnih površin (pravokotnost, vzporednost) na posameznih sestavnih delih pa zaradi velike ročice povzročijo večje odklone na vrhu mehanizma. Naslednje vrednosti bodo izračunane za popolnoma iztegnjeno roko v horizontalnem položaju.

Odstopanje dolžin segmentov E_{Kl} . Pričakujemo lahko opazna odstopanja pri izdelavi in montaži kompozitnih segmentov. Ocenimo¹ jih na približno $20 \mu m$ za segment, kar pri dveh uporabljenih segmentih znaša

$$E_{Kl} \approx 40 \mu m.$$

Inklinacija in zamik osi sklepov E_{Ki} . Obdelava delov sklepa poteka v več zaporednih operacijah, zato lahko pričakujemo¹ zamike osi reda velikosti $10 \mu m$ in odstopanja v pravokotnosti ali vzporednosti (ležaj - segment) reda velikosti 0.001° . Pri približnih oddaljenostih od vrha mehanizma najbolj izpostavljenih sklepov 2 in 3, 860 mm ter 510 mm ocenimo prispevek na

$$E_{Ki} \approx 70 \mu m.$$

Zamik izhodišča merjenja kota E_{Ko} . Izhodišča enkoderja v sklepu ("home" pozicije) ni mogoče dovolj natančno uskladiti z dejanskim ničelnim kotom sklepa, kot ga predvideva kinematični model. Zato je vedno potrebna eksperimentalna določitev izhodišča. Denimo, da pri tem za vsak sklep naredimo $15 \mu rad$ napake. Tako je skupni prispevek

$$E_{Ko} \approx 30 \mu m.$$

Kinematične napake so relativno velike, vendar so kljub temu lahko obvladljive. Priporočo namreč izključno k sistematskemu pogrešku in so časovno nespremenljive². Kompenzacija napak v kinematičnih parametrih se izvede ob obvezni kalibraciji meritne naprave,

¹Na osnovi meritev na obstoječih napravah.

²V omejenem časovnem odbdobju. Običajne so rekalibracije na eno ali dve leti, razen v primeru izjemnih dogodkov (npr. večjih mehanskih obremenitev).

in največkrat obsega postopke, znane s področja robotske kalibracije. Njihov cilj je identifikacija parametrov matematičnega modela merilne naprave oz. njihova uskladitev z dejanskim stanjem mehanizma. Tu naletimo tudi na problematiko zajemanja podatkov o poziciji vrha mehanizma, ki pa presega obseg tega dela in je tudi sicer že bila obravnavana v literaturi [44].

2.2 Napake kotnih merilnih sistemov

Kotni merilni sistemi oz. enkoderji so najpomembnejši del merilnega sistema, saj predstavljajo temeljno omejitev za dosegljivo točnost. Pri določanju njihovih osnovnih lastnosti se lahko opremo na podatke najzmožljivejših tržno dostopnih sistemov še sprejemljive velikosti. Ti dosegajo ločljivost približno $1 \mu\text{rad}$ ter točnost približno $20 \mu\text{rad}$. Skupni vpliv na vrhu roke zaradi omejene ločljivosti je torej:

$$E_{Er} \approx 2 \mu\text{m}.$$

Na točnost merjenja kota vplivajo lokalne nelinearnosti v delitvenem vzorcu enkoderja in drugi specifični vplivi na njegovo absolutno točnost in posledično izhodnem signalu. Skupni prispevek na vrhu obravnavanega mehanizma zaradi omejene točnosti enkoderjev je

$$E_{Ea} \approx 40 \mu\text{m}.$$

Velik vpliv na točnost ima tudi ekscentričnost montaže enkoderskega diska glede na os sklepa. Tu se že najmanjša odstopanja izražajo v velikih odstopanjih na vrhu mehanizma. Če privzamemo maksimalno ekscentričnost montaže $1 \mu\text{m}$ in upoštevamo premer diskov 60 in 30 mm, je skupni doprinos pri uporabi ene čitalne glave

$$E_{Ee} \approx 80 \mu\text{m}.$$

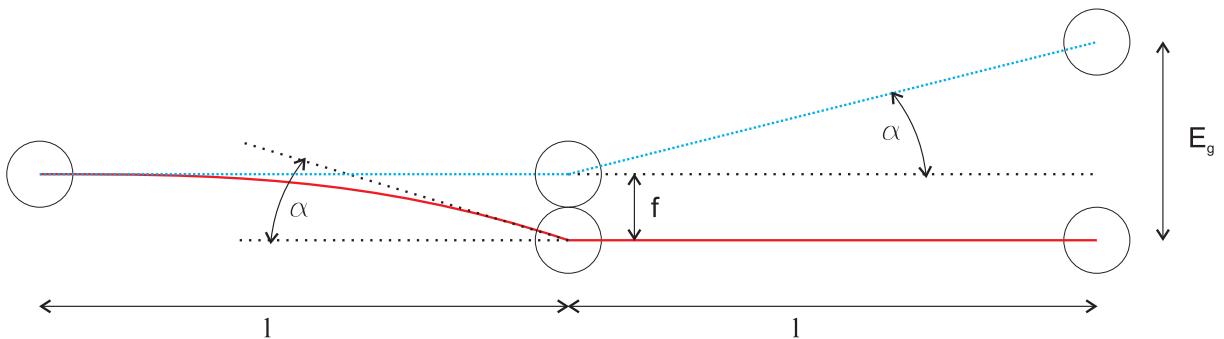
Absolutna točnost enkoderja E_{Ea} in ekscentričnost montaže E_{Ee} torej pomembno vplivata na skupni pogrešek meritve. Medtem ko je mogoče ekscentričnost dokaj uspešno kompenzirati z uporabo in s povprečenjem signalov dveh (ali celo več) nasproti ležečih čitalnih glav, pa je absolutno točnost enkoderja le težko (npr. s posebno kalibracijo po vgradnji) izboljšati [36, 35]. Na ta način se teoretično lahko približamo točnosti najbolj zmogljivih enkoderjev reda velikosti $5 \mu\text{rad}$.

2.3 Elastične deformacije

Ker so KMR ročno gnane naprave, je zaželeno, da imajo čim manjšo maso. Tako so laže prenosljive, predvsem pa so inercijske sile pri premikanju mehanizma majhne. Doseganje tega cilja zahteva optimirano konstrukcijo in uporabo materialov z dobim razmerjem togosti in specifične teže. Za učinkovit kompromis med togostjo mehanizma in skupno težo pa je treba poznati obseg deformacij med uporabo naprave.

2.3.1 Lastna teža gradnikov

Vpliv gravitacije na mehanizem KMR je močno odvisen od njene zasnove. Kljub temu lahko ugotovimo, da je vedno potreben nekakšen mehanizem za kompenzacijo teže vsaj v drugem sklepu naprave. Ne glede na njegovo izvedbo - vzmetni, pnevmatski, protiutežni ali kateri drug sistem - bo le-ta povzročil deformacijo v drugem segmentu KMR, ki je obremenjen s težo nadaljnjih segmentov. Če privzamemo, da vrh mehanizma podpira operater naprave, ter horizontalno lego roke, kjer je vpliv gravitacije najbolj izražen, lahko obravnavamo situacijo, prikazano na sliki 2.3. V tem položaju je prvi segment podprt v začetni, drugi pa v končni točki. Temeljita analiza bi zahtevala uporabo metode končnih elementov (FEM analizo) za določitev deformacij, vendar je za oceno velikosti le-teh dovolj poenostavljen analitični izračun. Sklepe bomo poenostavili v točkaste mase, pri deformacijah pa upoštevali le povezovalne segmente cevastega profila. Poleg tega je v opisani situaciji drugi segment obremenjen le z lastno težo, zato lahko predpostavimo, da je njegova deformacija zanemarljivo majhna.



Slika 2.3: Vpliv lastne teže - rdeče dejanska lega segmentov, modro navidezna lega pri neupoštevanju težnosti

Enačbi (2.1) in (2.2) opisujeta odklon pozicije in kota pri enakomerinem profilu segmenta, ki je na enem koncu togo vpet. Tu je F sila na drugi konec segmenta, l njegova dolžina, E Youngov modul in I_Y vztrajnostni moment prerezja segmenta.

$$f = \frac{Fl^3}{3EI_Y} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{Fl^2}{2EI_Y} \quad (2.2)$$

Za cevast profil je površinski moment enak

$$I_Y = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4) \quad (2.3)$$

Če vstavimo predpostavljene vrednosti v gornje enačbe, dobimo za odklon pozicije in kota

$$f \approx 10 \mu m$$

$$\alpha \approx 3.7 \cdot 10^{-6} rad.$$

Skupna napaka pozicije je torej

$$E_g = f + l \cdot \tan\alpha$$

$$E_g \approx 10 \mu m.$$

2.3.2 Sila operaterja in pospeševalne sile

Operater pri premikanju na roko izvaja sile, ki lahko posledično povzročijo deformacije v njeni strukturi. Za te sile je praktično nemogoče predvideti njihovo velikost³ prijemuščenih, zato tudi ne moremo predvideti rezultirajočih deformacij ter posledično vpliva na točnost. Za grobo oceno oz. velikostni razred vzemimo kar podobno vrednost kot pri vplivu gravitacije, saj tudi ne pričakujemo večjih pospeškov kot 1 g:

$$E_o \approx 10 \mu m.$$

2.3.3 Sila merjenja

Silo merjenja razumemo kot silo med merjencem in tipalom merilne roke. V primeru na dotik občutljivega tipala je sila v trenutku sproženja meritve blizu nič in jo lahko zanemarimo. Če uporabljamo fiksno tipalo in meritev prožimo ročno, pa moramo pri dotiku uporabiti določeno silo. Ta je zopet odvisna od človeškega dejavnika, vendar jo ocenimo na maksimalno $F_d = 1 N$. Če privzamemo še, da uporabljamo tipično jekleno

³Lahko jih le ocenimo na podlagi nekaterih poskusov, npr. merjenju sile pri mehanskem vodenju KMR [3]. Natančno ovrednotenje deformacij pa je sedaj možno z meritvami, kot so opisane v poglavju 4.

tipalo dolžine 10 mm in debeline 2 mm, lahko izračunamo, da je njegov največji upogib

$$E_m \approx 2 \mu m.$$

Ugotovimo lahko, da so elastične deformacije pretežno naključne narave in jih zato težko učinkovito kompenziramo. Še najlaže je modelirati oz. upoštevati odstopanja zaradi lastne teže, vendar je tudi tu navzoč nedoločljiv človeški dejavnik zaradi spremenljive točke podpore; še bolj to velja za silo merjenja in seveda silo operatorja. Za učinkovito kompenzacijo bi bilo torej treba deformacije meriti v realnem času in jih upoštevati pri kinematičnem izračunu pozicije vrha.

2.4 Napake v sklepih

Napake sklepov so odvisne od načina vležajenja oz. odstopanja vležajenja od idealne rotacije okrog fiksne osi. Sklepi so za doseganje čim manjše zračnosti ponavadi izvedeni s parom kroglečnih ležajev s poševnim dotikom. Pri oceni napak bomo upoštevali lastnosti kroglečnih ležajev najvišjega tolerančnega razreda.

2.4.1 Radialni in aksialni oplet

Radialni oplet je odvisen od preciznosti ležaja in njegove montaže. Za primer vzemimo deklariran oplet tržno dostopnih visoko preciznih ležajev - $2.5 \mu m$ aksialno in $2.5 \mu m$ radialno. V najbolj neugodnem primeru seštevka vseh napak ocenimo:

$$E_l \approx 80 \mu m.$$

Radialni oplet posameznih sklepov je mogoče prej izmeriti in ga nato upoštevati pri kinematičnih izračunih. Upoštevanje opleta pri vrtenju sklepov, predvsem pa meritev tega pojava je zahtevna, saj gre na ravni sklepa za zelo majhne premike. Metoda merjenja opleta izdelanega sklepa je bila predstavljena v [7]. Pričakujemo lahko, da bomo s kompenzacijo napake odstopanja na vrhu zmanjšali na približno $20 \mu m$.

2.4.2 Trenje

Sile oz. navora trenja in posledične deformacije teoretično ni mogoče izračunati, mogoča je le kasnejša eksperimentalna ugotovitev. Zavedati se moramo predvsem pomena t. i. stick-slip pojava, ki nastopi na začetku in koncu premika ter pri majhnih hitrostih. Ker so ti pojavi dolgoročno tudi časovno spremenljivi (odvisni od obratovalnih pogojev,

vzdrževanja itd.), je edina rešitev v merjenju njihovih neposrednih posledic, t. j. deformacij segmentov KMR.

2.5 Termične deformacije

Termične razmere kritično vplivajo na vse merilne naprave, pri koordinatnih merilnih napravah pa moramo biti nanje še posebej pozorni. S primernim konstruiranjem (izbiro materialov, termično simetrične konstrukcije) skušamo zmanjšati vpliv temperature na lastnosti merilne naprave, hkrati pa preostale termične pojave na osnovi merjenja temperature programsko čim bolje kompenzirati. Metode modeliranja, merjenja in kompenzacije termičnih napak so zelo raznovrstne in so bile v literaturi pogosto obravnavane [42].

2.5.1 Spremembe temperature okolice

Uporaba kompozita s karbonskimi vlakni ima poleg velike togosti tudi prednost majhnega koeficiente temperaturnega raztezanja. Izračunajmo spremembo pozicije vrha, t. j. dolžine roke, če je ta popolnoma iztegnjena, pri spremembi temperature okolice za 1 K:

$$E_t = 10 \mu m.$$

Te spremembe je mogoče relativno natančno kompenzirati s spremeljanjem temperature sestavnih delov KMR, pri čemer je pravilna postavitev senzorjev in kompenzacijске sheme lahko zelo zahtevna, pomembna pa je tudi natančna določitev koeficientov temperaturnega raztezka

2.5.2 Notranji viri toplotne energije

Lastni viri toplotne energije (npr. elektronika) povročajo lokalne elongacije mehanske strukture roke, ki jih je težko modelirati in zaradi specifičnih razmer tudi težko oceniti. Zato se je tovrstnim virom toplotne energije najbolje izogniti oz. jih minimizirati in jih pri tej analizi ne bomo upoštevali.

2.6 Vplivi okolice

Drugi vplivi okolice, kot so vibracije, prah, vlaga itd., seveda tudi kvarno vplivajo na točnost merilne naprave. Vendar pa je njihov učinek težko določljiv, zato je pri meritvah

treba zagotoviti razmere, pri katerih bodo tovrstni motilni vplivi kar najmanjši; tukaj pa jih ne bomo obravnavali.

2.7 Pregled

Dosedaj opisani viri napak so zbrani v tabeli 2.3. Še enkrat omenimo, da neposredna vsota vseh napak ne predstavlja realne vrednosti, saj je vsak prispevek izračunan za najslabši mogoči primer oz. najmanj ugoden položaj roke. V večini primerov lahko tako pričakujemo manjše vrednosti ali delno medsebojno kompenzacijo. Za vire napak, pri katerih metoda kompenzacije že obstaja, smo to upoštevali v zadnjem stolpcu tabele; grafični prikaz proporcionalnih delžev v ocenjeni skupni negotovosti pa je na sliki 2.4. Vidimo, da elastične deformacije predstavljajo približno tretjinski prispevek k negotovosti. Hkrati je to edini vir negotovosti, katerega kompenzacija je mogoča, vendar primerna metoda zanj še ne obstaja.

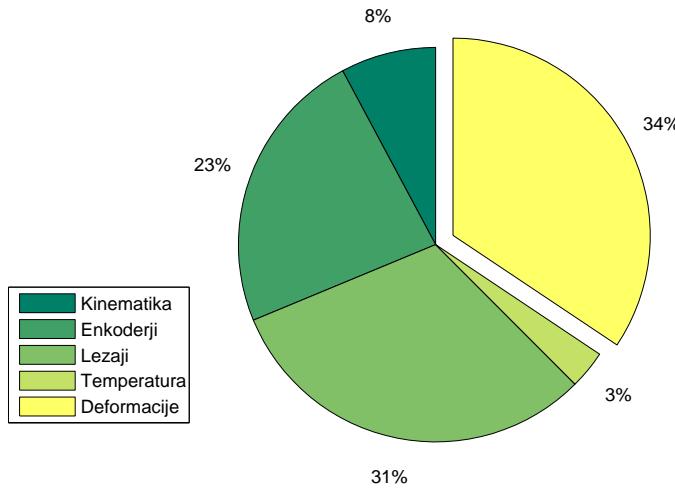
Tabela 2.3: Ocene prispevkov posameznih virov negotovosti

Vir napake	Ocenjena vrednost [μm]	Možnost kompenzacije	Ocenjena vredn. po kompenz. [μm]
Kinematične napake	140	DA	5
Ločljivost enkoderjev	2	NE	2
Točnost enkoderjev	40	DA	10
Ekscentričnost enkoderjev	80	DA	5
Lastna teža gradnikov	10	DA ¹	10
Sile operaterja	10	NE	10
Sila merjenja	2	NE	2
Oplet ležajev	80	DA	20
Temperatura okolice	10 ²	DA	2
Skupaj			70

Opombe:

¹ Popolna kompenzacija je mogoča le z neposrednim merjenjem napake v realnem času

² Napaka pri spremembi temperature okolice za 1 K



Slika 2.4: Delež posameznih virov negotovosti v skupni ocenjeni negotovosti KMR

2.8 Analitični izračun vpliva pomembnejših virov

2.8.1 Matematični model

Za analitičen pristop k ocenjevanju prispevkov posameznih virov pogreškov potrebujemo čim popolnejši matematični model naprave. Za izhodišče bomo uporabili Sheth-Uickerjev model in ga razsirili tako, da bo upošteval še vpliv temperature in gravitacije⁴ (v skladu s predpostavkami in z enačbami v 2.3.1).

Model zdaj vsebuje 5 spremenljivk vrednosti kotov v sklepih, nekatere konstante kinematične opisa pa so postale funkcije dodatne spremenljivke spremembe temperature. Koordinate pozicije vrha so tako:

$$\left(\begin{array}{l}
 (1 + dT \cdot TKal) \cdot a5_{-} \cdot \sin[q1] \cdot \sin[q4] \cdot \sin[q5] + \cos[q1] \cdot (\cos[q2] \cdot (2 \cdot (1 + dT \cdot TKal) \cdot a2_{-} + (1 + dT \cdot TKcf) \cdot a2_{-}) + \cos[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}] \cdot (2 \cdot (1 + dT \cdot TKal) \cdot a3_{-} + \\
 (1 + dT \cdot TKcf) \cdot a3_{-} + (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q5] \cdot a5_{-}) + \frac{36 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^3 \cdot \sin[q2]}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)} - (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q4] \cdot a5_{-} \cdot \sin[q5] \cdot \sin[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}]) \\
 \cos[q2] \cdot (2 \cdot (1 + dT \cdot TKal) \cdot a2_{-} + (1 + dT \cdot TKcf) \cdot a2_{-}) \cdot \sin[q1] + \cos[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}] \cdot (2 \cdot (1 + dT \cdot TKal) \cdot a3_{-} + (1 + dT \cdot TKcf) \cdot a3_{-} + (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q5] \cdot a5_{-}) \cdot \sin[q1] + \\
 \frac{36 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^3 \cdot \sin[q1] \cdot \sin[q2]}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)} - (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q1] \cdot a5_{-} \cdot \sin[q4] \cdot \sin[q5] - (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q4] \cdot a5_{-} \cdot \sin[q1] \cdot \sin[q5] \cdot \sin[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}] \\
 - \frac{36 \cdot Pg \cdot \cos[q2]^2 \cdot a2^3}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)} + (1 + dT \cdot TKal) \cdot d1_{-} + (2 \cdot (1 + dT \cdot TKal) \cdot a2_{-} + (1 + dT \cdot TKcf) \cdot a2_{-}) \cdot \sin[q2] + (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q4] \cdot \cos[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}] \cdot a5_{-} \cdot \sin[q5] + \\
 (2 \cdot (1 + dT \cdot TKal) \cdot a3_{-} + (1 + dT \cdot TKcf) \cdot a3_{-}) \cdot \sin[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}] + (1 + dT \cdot TKal) \cdot \cos[q5] \cdot a5_{-} \cdot \sin[q2 + q3 - \frac{18 \cdot Pg \cdot \cos[q2] \cdot a2^2}{Em \cdot \pi \cdot (-Ri^4 + Ro^4)}]
 \end{array} \right)$$

Pri tem so:

⁴Natančnejši opis kinematičnega modela je v dodatku B.

$q_1 \dots q_5$...	spremenljivke kotov v sklepih
dT	...	spremenljivka spremembe temperature
TK_{Al}	...	temperaturni razteznosti koeficient sklepov
TK_{kv}	...	temperaturni razteznosti koeficient segmentov

2.8.2 Predstavitev podatkov

Pozicija vrha je torej funkcija 6 spremenljivk:

$$POS = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = f(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, T).$$

Z odvodom modela po posamezni notranji spremenljivki lahko ponazorimo vpliv le-te na merilno negotovost pozicije vrha, t. j. občutljivost modela na določen vpliv v dani poziciji. Z odvajanjem po spremenljivkah $q_1 \dots q_5$ je torej razvidna sprememba oz. napaka pozicije tipala ob diferencialni spremembi izmerjenega kota v sklepu. S tem so zaobjete predvsem napake merjenja z enkoderji - vpliv omejene ločljivosti, točnosti oz. nelinearnosti in zamik izhodišča. Z odvajanjem po temperaturi prikažemo pogrešek v ustaljenem stanju ob spremembi temperature okolice, s primerjavo modela, ki upošteva sile težnosti, in modela z ničelno težnostjo pa določimo pogrešek zaradi gravitacije. To je še vedno precej poenostavljen model resnične naprave, vendar zajema najpomembnejše vire merilnega pogreška za mehanizem s privzetimi lastnostmi.

Grafi v nadaljevanju prikazujejo absolutne vrednosti odvoda vektorja pozicije, ki predstavljajo 3D pogrešek (3D razdaljo med pravo in izmerjeno vrednostjo). Predstavitev rezultatov je enostavnejša zaradi neredundantnosti mehanizma, saj je vsaka lega dosegljiva le z eno kombinacijo notranjih spremenljivk. Kljub temu je potrebna dodatna omejitev - izračuni bodo narejeni za konstantno orientacijo tipala, vertikalno v negativni smeri Z-osi. Ker je delovni prostor simetričen glede na prvo os merilne roke, ki sovpada z Z-osjo baznega koordinatnega sistema, lahko podatke predstavimo le v prerezu, npr. XZ ravnine.

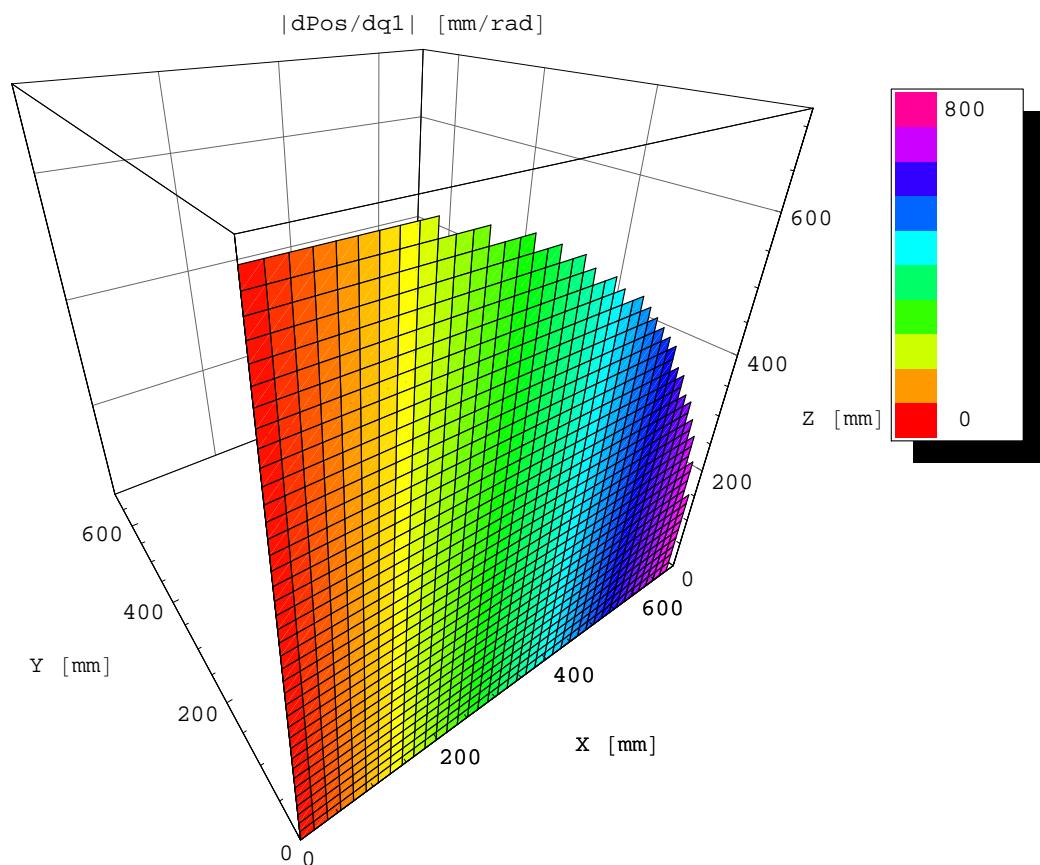
2.8.3 Vpliv posameznih sklepov

Sklep 1

Funkcijo pozicije odvajajmo po spremenljivki prvega sklepa:

$$S_{q1} = \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_1} \right\|$$

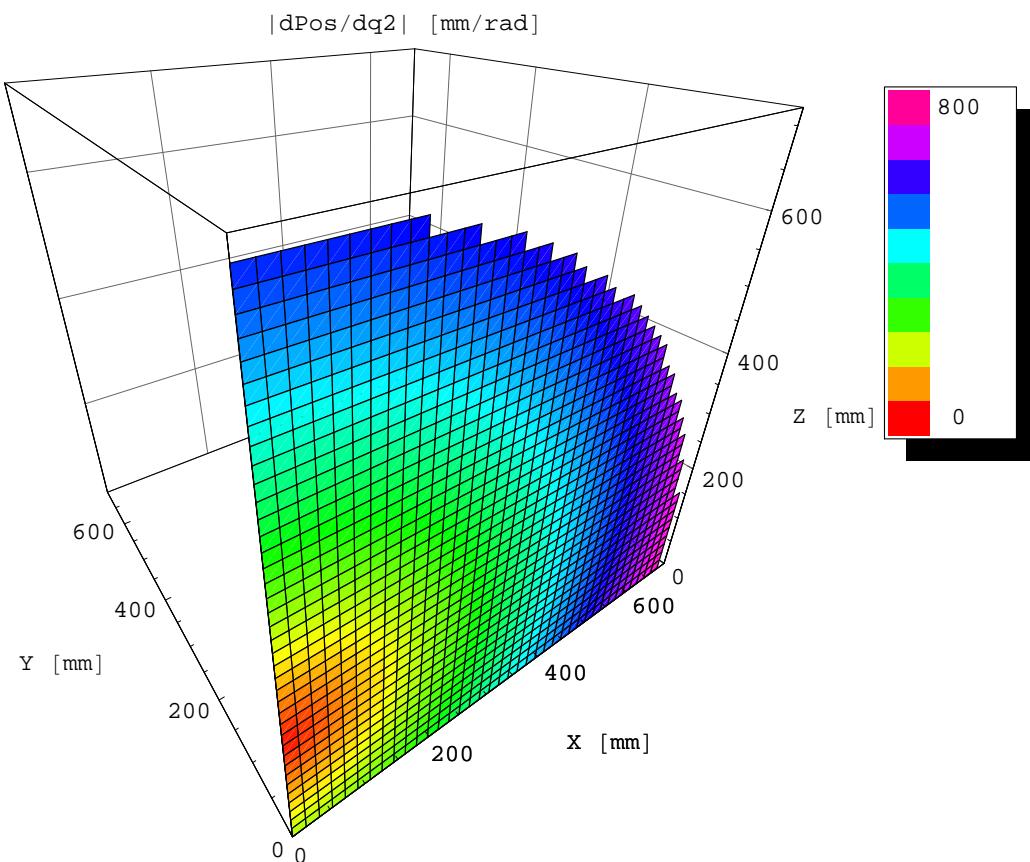
Na grafu je občutljivost predstavljena v enotah $\frac{mm}{rad}$ oz. $\frac{nm}{\mu rad}$ in predstavlja napako v poziciji vrha mehanizma, ki jo povzroči enota napake pri izmerjenem kotu v prvem sklepu. Ker je prvi sklep nepremičen, vpliv narašča linearno z oddaljevanjem od Z osi baze KMR.



Sklep 2

Tudi drugi sklep je nepremičen, rezultirajoča občutljivost pa narašča z oddaljevanjem od točke presečišča Z osi baze KMR in osi sklepa.

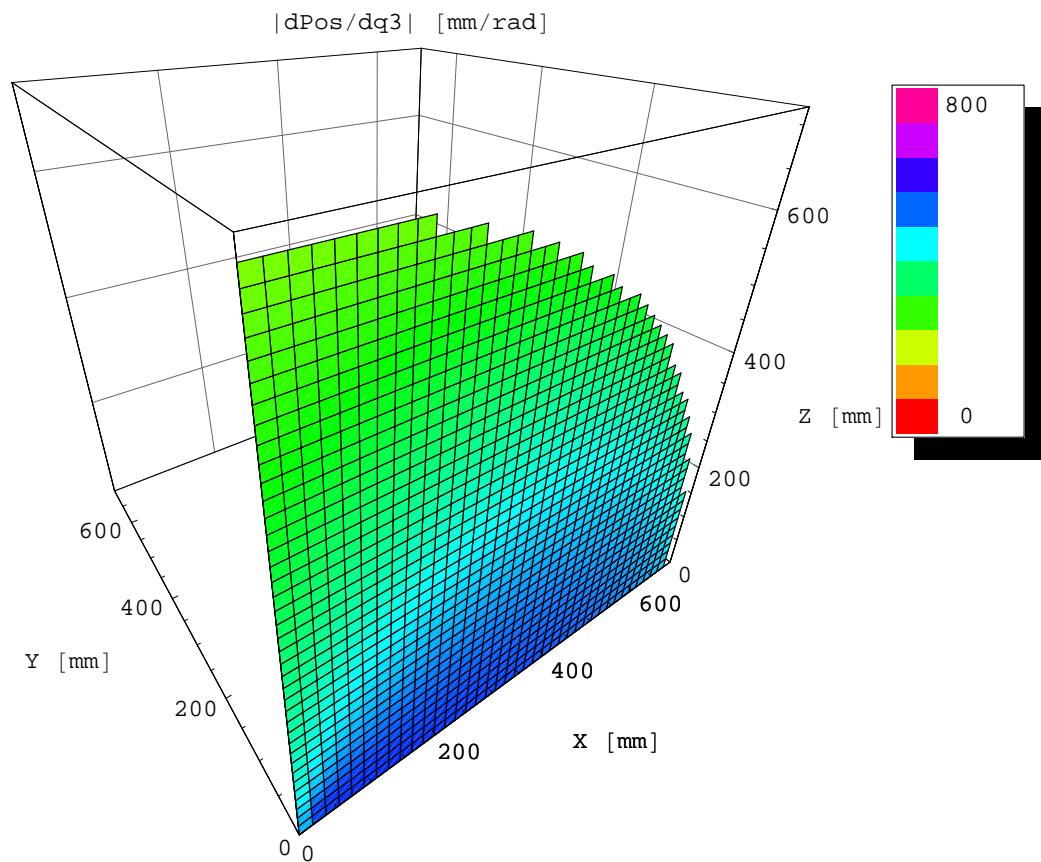
$$S_{q2} = \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_2} \right\|$$



Sklep 3

Položaj tretjega sklepa je odvisen od lege vrha mehanizma, zato ploskve, ki povezujejo točke z enako občutljivostjo, tu niso pravilnih oblik.

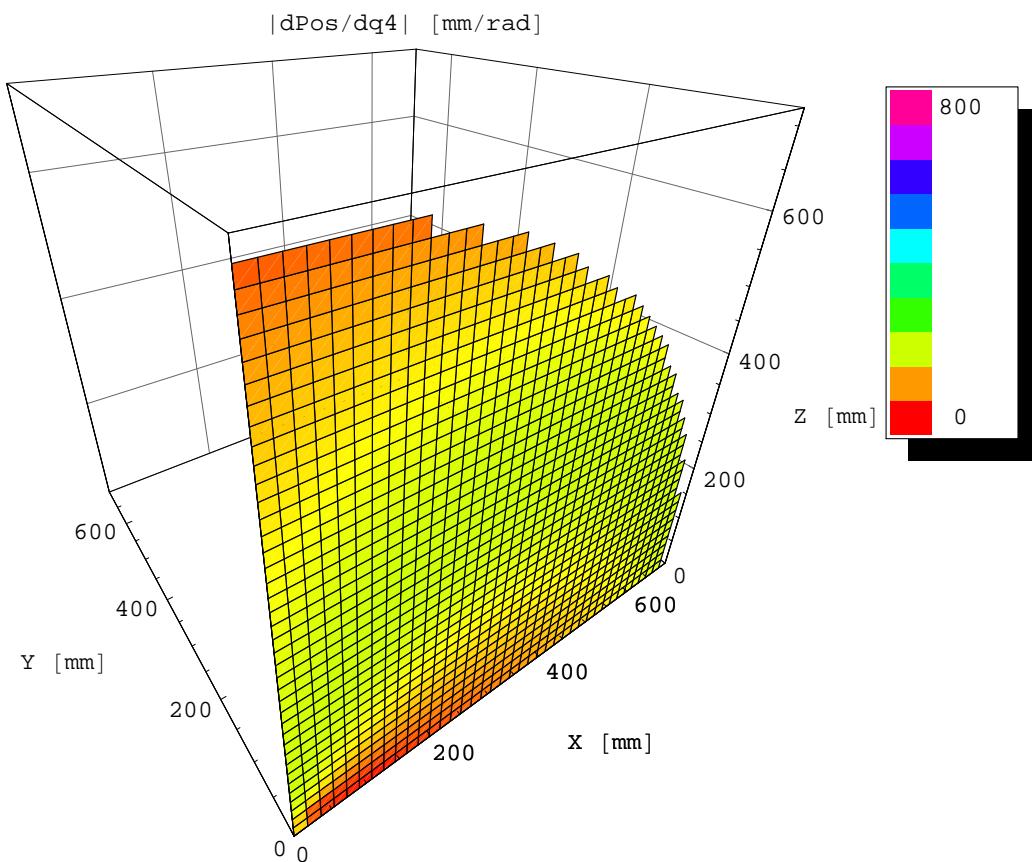
$$S_{q3} = \left\| \frac{\delta P_{os}}{\delta q_3} \right\|$$



Sklep 4

Občutljivost pozicije na spremembe v četrtem sklepu je odvisna zgolj od lege petega sklepa, saj ta določa oddaljenost vrha mehanizma od osi četrtega sklepa. V legah, ko je zadnji sklep skoraj iztegnjen, je zato le-ta blizu nič.

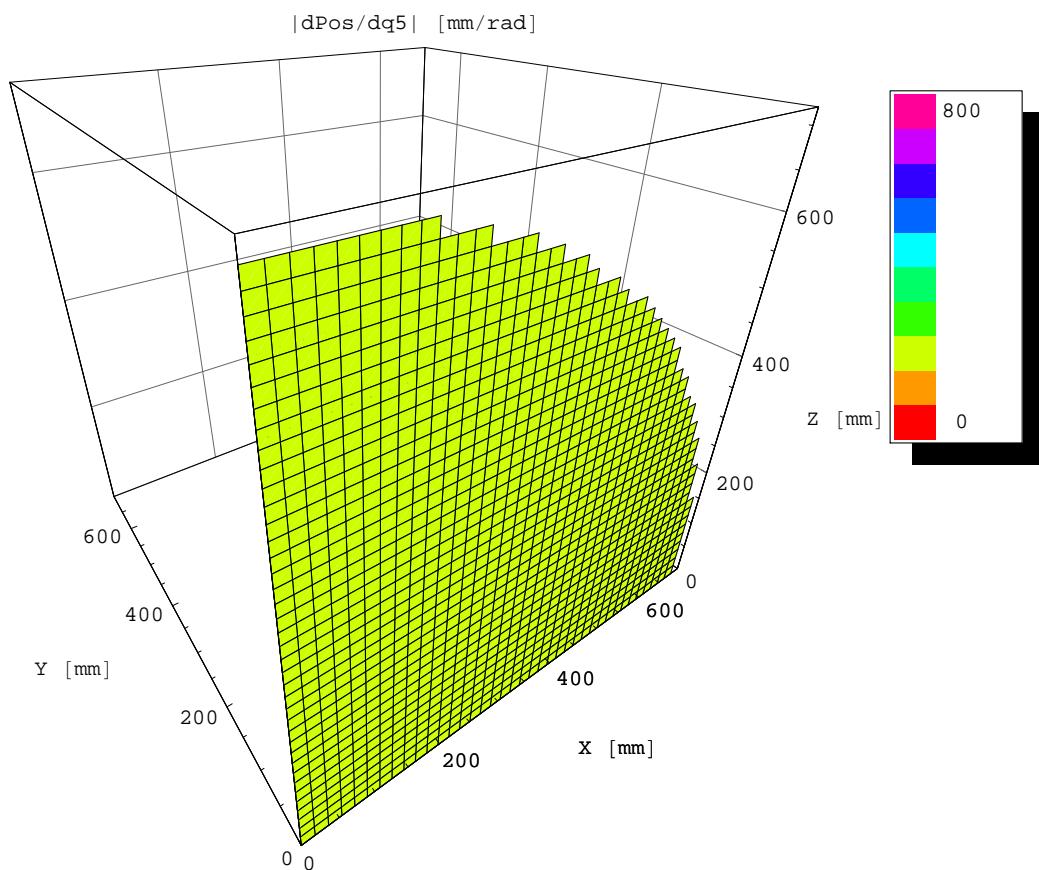
$$S_{q4} = \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_4} \right\|$$



Sklep 5

Ker je oddaljenost vrha od osi zadnjega sklepa seveda konstantna, je tudi občutljivost na odstopanja v njem enaka v vsem delovnem območju mehanizma.

$$S_{q5} = \left\| \frac{\delta P_{os}}{\delta q_5} \right\|$$



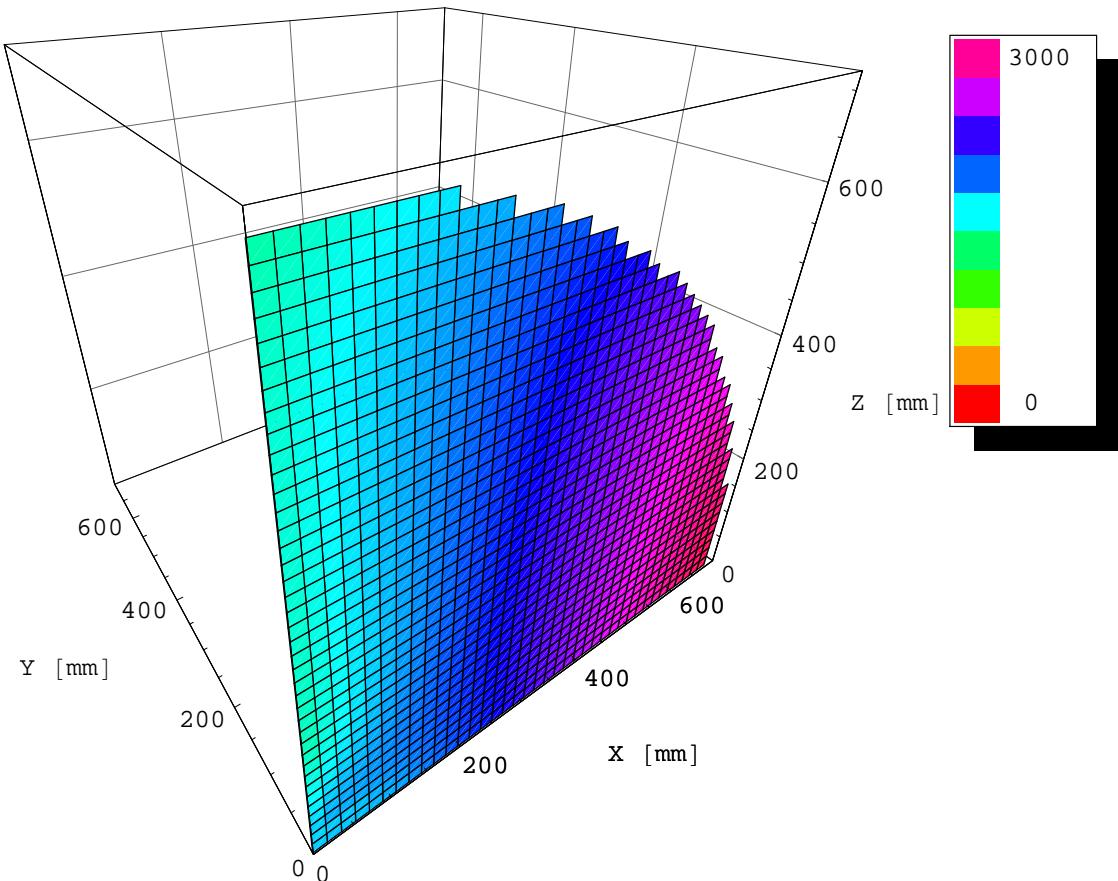
2.8.4 Skupni vpliv vseh sklepov

Graf prikazuje kombinirano občutljivost za vse sklepe v najslabšem primeru - torej seštevek absolutnih občutljivosti z upoštevanjem predpostavke o enkoderjih z dvojno zmogljivostjo v prvih dveh sklepih.

Ob dobi kompenzaciji preostalih virov pogreška (oz. - glede na njihov velikostni razred - neupoštevanju) slika prikazuje tudi **končno izračunano merilno negotovost** merilne roke v danih legah tipala. Njena podoba je pričakovana, saj jo določata predvsem vpliva prvih dveh sklepov. Ob upoštevanju drugih virov negotovosti (razen deformacij) pa glede na oceno iz odseka 2.7 lahko sklepamo, da bo dejanska skupna negotovost pri podobnih mehanizmih lahko odstopala kvečjemu po magnitudi. Oblika grafa ji bo ustrezala, saj dominantni viri negotovosti izhajajo iz sklepov in imajo zato nanjo podoben vpliv.

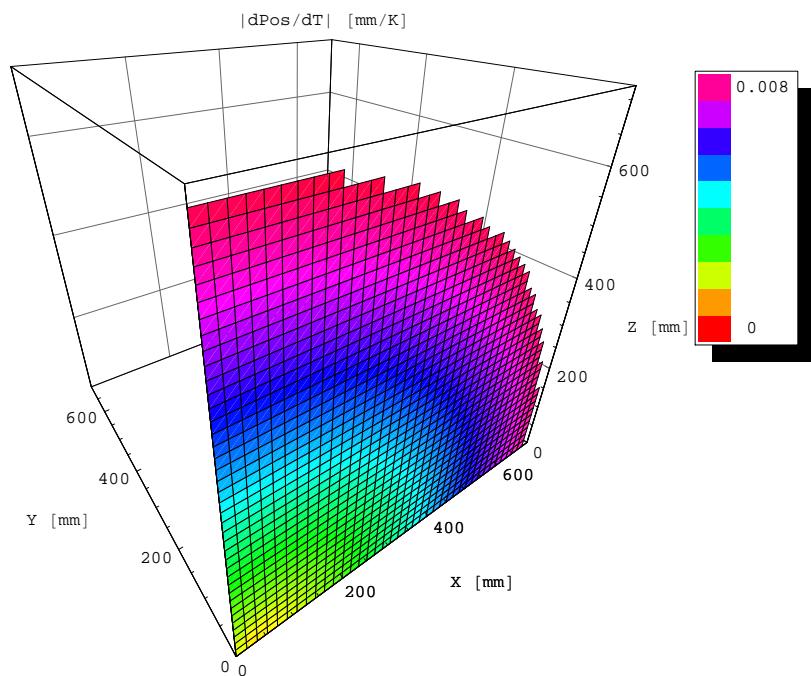
$$S_{q1} = \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_1} \right\| + \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_2} \right\| + 2 \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_3} \right\| + 2 \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_4} \right\| + 2 \left\| \frac{\delta Pos}{\delta q_5} \right\|$$

$$|dPos/dq_1+dPos/dq_2+2dPos/dq_3+2dPos/dq_4+2dPos/dq_5| \text{ [mm/rad]}$$



2.8.5 Vpliv temperature

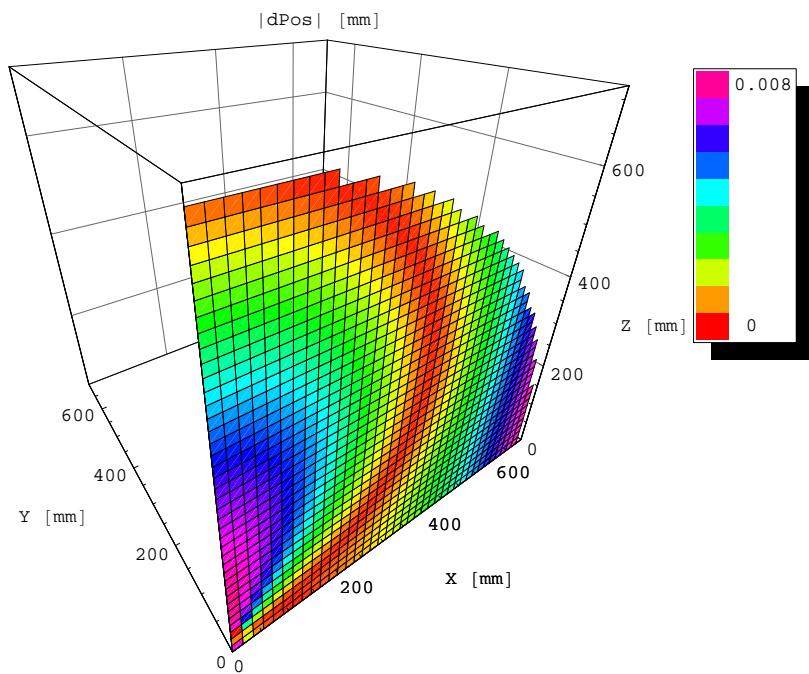
Nekoliko poenostavljen model vpliva temperature okolice na mehanizem predpostavlja temperaturno homogenost in izotropno raztezanje vseh gradnikov. Realno obnašanje sistema od tega sicer odstopa, kljub temu pa bo vpliv na negotovost podoben, kot je spodaj izračunani. Ta pričakovano narašča z oddaljenostjo od točke pritrditve KMR na podlago. $S_T = \|\frac{\delta P_{os}}{\delta T}\|$



2.8.6 Vpliv težnosti

Oglejmo si še, kakšen pogrešek prispeva v dani legi deformacija mehanizma zaradi gravitacije. Graf prikazuje razliko med pozicijo, izračunano z upoštevanjem vpliva težnosti, in tisto, izračunano z ničelno gravitacijo.

$$S_G = \|Pos - Pos|_{g=0}\|$$



2.8.7 Sklep

Iz gornjih grafov je že na prvi pogled očitno, da so nekateri vplivi na merilno negotovost močno odvisni od položaja tipala v delovnem prostoru KMR. Nelinearna zveza med notranjimi spremenljivkami in vplivnimi parametri ter položajem vrha mehanizma pomeni, da bo obvladovanje virov negotosti veliko bolj zahtevno, kot je pri kartezičnih mehanizmih; obenem pa se zavedamo, da je njihova kompenzacija zaradi narave zaporedne kinematične verige še toliko bolj kritična pri doseganju željene točnosti naprave. To velja za sistematske vire negotovosti (ki so vsi tudi merljivi), še bolj pa za naključne. Nekatere od slednjih je bilo do sedaj težko ali nemogoče izmeriti in ni znana niti njihova približna velikost. Prihodnje meritve njihovih vplivov na KMR bodo zato še pomembnejše.

3 Laserski sistem za merjenje deformacij

V prejšnjih poglavjih smo pokazali, da na področju koordinatnih merilnih rok obstaja znatna potreba po merjenju elastičnih deformacij v realnem času in da sistem, ki bi ga bilo mogoče v tak ali katerikoli podoben mehanizem vgraditi, da bi merili deformacije posameznih segmentov, še ne obstaja. To poglavje obravnava na novo razviti laserski sistem za merjenje prečnih premikov, ki predstavlja jedro te disertacije. Sistem je v svoji osnovni zgradbi univerzalen in poleg svojega prvotnega namena omogoča tudi povsem drugačne meritve, ki se jim bomo posvetili v nadaljevanju.

3.1 Princip delovanja

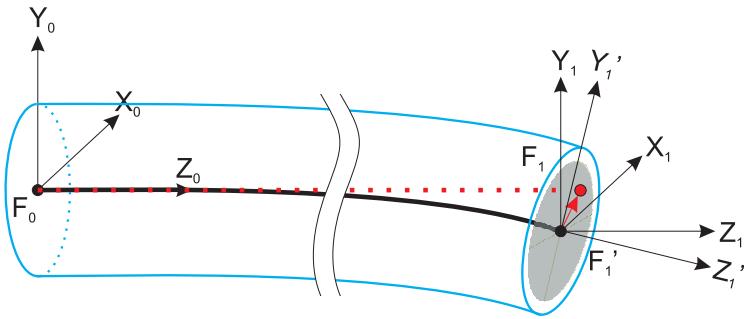
Zamislimo si upogljiv segment poljubnega mehanizma, kot je shematsko prikazan na sliki 3.1. Koordinatni sistem F_0 je postavljen v enem koncu segmenta in se ujema z virom laserske svetlobe, ki proizvaja popolnoma raven referenčni žarek. Koordinatni sistem F'_1 se nahaja na drugem koncu segmenta in se ujema z detektorjem, ki je sposoben zaznave položaja projiciranega žarka v ravnini XY detektorja.

Če F_1 predstavlja drugi konec nedeformiranega segmenta, lahko poljubno deformacijo opišemo kot transformacijo iz koordinatnega sistema F_1 v F'_1 . Ta ima šest prostostnih stopenj, od katerih detektor direktno zaznava dve, t. j. translaciji v smeri X in Y. Če je znana narava obremenitve segmenta (denimo pri približno točkasti obremenitvi konca segmenta, pri gravitacijski obremenitvi, pri upoštevanju dominantne oblike nihanja itd.), pa lahko iz teh dveh podatkov sklepamo tudi na rotacije okrog osi X in Y. Zaznamo lahko torej največ štiri od šestih prostostnih stopenj deformacije, pri čemer se moramo zavedati, da je vzdolžni raztezek segmenta za majhne¹ odklone vzdolž Z osi običajno zanemarljiva².

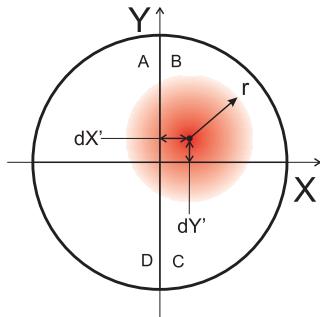
Tudi osnovni princip delovanja detektorja je razmeroma preprost. Senzorski ele-

¹Ko je prečna komponenta odklona majhna v primerjavi z dolžino segmenta.

²Znotraj definiranih temperaturnih pogojev - torej kolikor je deformacija posledica mehanske obremenitve segmenta in ne temperaturnih sprememb, za katere pa v preciznih napravah ponavadi že obstajajo druge kompenzacijске sheme.



Slika 3.1: Deformirani segment



Slika 3.2: Kvadrantna fotodioda in projiciran žarek

ment je kvadrantna fotodioda³, t. j. fotodioda, razdeljena na štiri kvadrante, ločene z majhno režo (slika 3.2). Ta proizvaja štiri ločene fototokove, ki so proporcionalni občutljivosti fotodiode pri valovni dolžini uporabljeni svetlobe ter osvetljenosti posameznega kvadranta. Pri popolnoma neobremenjenem segmentu referenčni žarek zadane sredino detektorja in fototokovi so enaki. Vsak odmik detektorja v ravnini, pravokotni na žarek, pa bo povzročil premik projicirane svetlobe na detektorju in neravnovesje tokov. Preprosto merilo za odmik lahko zapišemo kot

$$dX' = \alpha \frac{(V_B + V_C) - (V_A + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (3.1)$$

$$dY' = \alpha \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D}, \quad (3.2)$$

³Kot smo že uvodoma omenili, je za tovrsten namen mogoče uporabiti tudi lateralne fotodiode ali CCD oz. CMOS čipe. Medtem ko s prvimi ni mogoče doseči zahtevanih točnosti, pa je prednost kvadrantne fotodiode pred slikovnimi čipi predvsem v enostavnosti uporabe - odpade relativno kompleksna obdelava zajete slike, ki bi v vezju zahtevala digitalni signalni procesor, s tem pa je manjša poraba energije pa tudi mnogo višja dosegljiva vzorčna frekvanca.

kjer so V_A , V_B , V_C and V_D vrednosti, proporcionalne osvetljenosti posameznih kvadrantov, α pa je obratno sorazmeren premeru žarka r . Z r je omejen tudi maksimalni odmik žarka, ki ponavadi znaša $< 0.9r$.

Enačbi 3.1 in 3.2 bi natančno veljali le ob pravokotnem preseku žarka in popolnoma enakomerni porazdelitvi svetlobne moči. V praksi pa okrogla oblika žarka in njegova porazdelitev povzročita znatne odklone od teh idealiziranih enačb, opazni pa so tudi nedoločljivi vplivi zaradi razpršene svetlobe in nepravilnosti v optičnih elementih. Za natančne meritve bo torej potrebna eksperimentalna kalibracija.

Na tem mestu se vprašajmo še, kakšen je vpliv kotnega odklona segmenta na detektor. Ko je ravnina le-tega nagnjena glede na referenčni žarek, se bo njegova občutljivost na prečne premike spremenila in v meritev dejansko vnesla kosinusno napako. Ocenimo jo za segment enakomernega prereza. Enačbi 3.3 in 3.4 opisujeta prečni in kotni odmik takega segmenta pri točkasti obremenitvi na njegovem koncu [39]:

$$f = \frac{Fl^3}{3EI_Y} \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{Fl^2}{2EI_Y}. \quad (3.4)$$

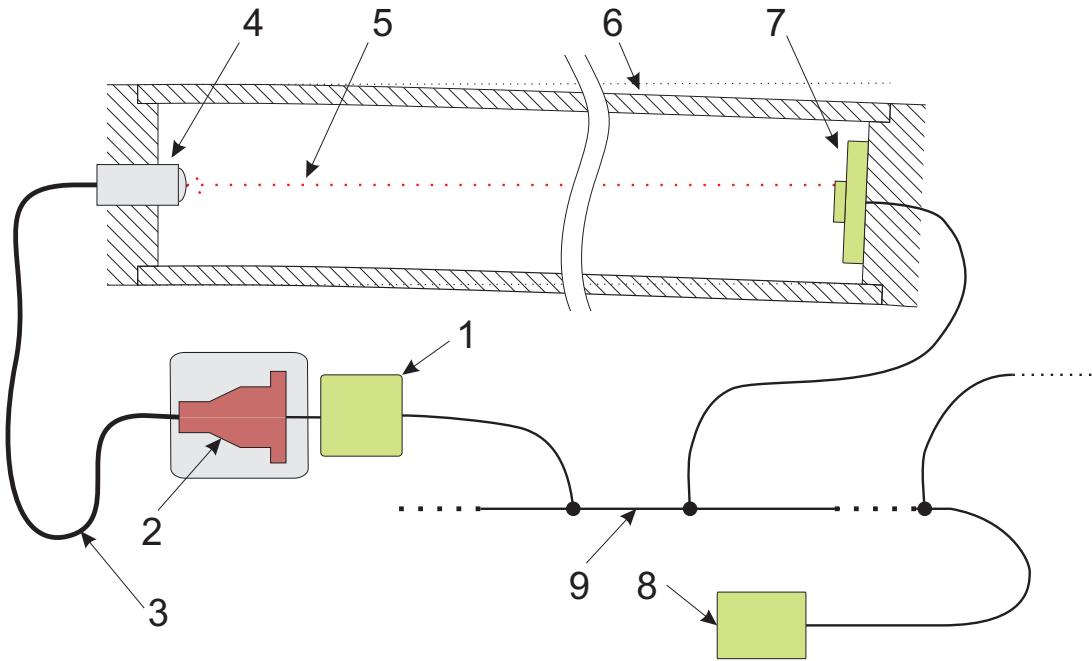
Tu f in α predstavlja prečni in kotni odmik konca segmenta, F uporabljeno silo, l dolžino segmenta in I_Y vztrajnostni moment njegovega preseka. Razmerje med kotnim in prečnim odmikom je tako

$$\frac{\alpha}{f} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{l}. \quad (3.5)$$

Iz zadnje enačbe vidimo, da je razmerje kotnega odklona proti prečnemu obratno sorazmerno z dolžino segmenta. Zelo podobno razmerje velja tudi pri enakomerno porazdeljeni obremenitvi (npr. gravitacijski). Izračun pokaže, da je pri dolzinah segmentov, večjih od 30 mm, spremembra občutljivosti že manj kot 0.01 % in torej zanemarljiva.

3.2 Zgradba in delovanje merilnega sistema

Ključni deli sistema so prikazani na sliki 3.3. Krmilna enota laserja skrbi za ustrezeno napajanje in nadzor laserske diode. Tu pomembno vlogo igra precizno načrtovano povratnozančno vezje, ki s pomočjo ustreznega gonilnega čipa zagotavlja kar najbolj konstantno optično moč na izhodu laserske diode. Ta je sklopljena na enorodovno stekleno optično vlakno s premerom jedra $4 \mu\text{m}$, ki proizvedeno svetlobo (vidne valovne dolžine 670 nm) vodi do optične glave. Žarek se tu kolimira v vzporeden snop premera 1



Slika 3.3: Glavni sestavni deli merilnega sistema: 1 - krmilna enota laserja, 2 - laserska dioda, 3 - optično vlakno, 4 - optična glava, 5 - referenčni žarek, 6 - upogljiv segment, 7 - detektorska enota, 8 - glavna enota, 9 - digitalno vodilo

mm z divergenco približno 0.5 mrad⁴.

Uporaba koncepta z optičnim vlaknom ima več prednosti. Najpomembnejša je vsekakor izboljšanje prostorske stabilnosti žarka. Prečno in kotno lezenje izhodnega žarka je sicer značilno za vse laserske diode in je zelo problematično v preciznih merilnih sistemih⁵. Izhod iz enorodovnega optičnega vlakna pa ima konstantno Gaussovo⁶ porazdelitev moči in je skoraj brez prostorskega drifta. Rezultat je torej zelo kvaliteten referenčni žarek (rezultat njegove projekcije na CCD čip je prikazan na sliki 3.4). Ločitev

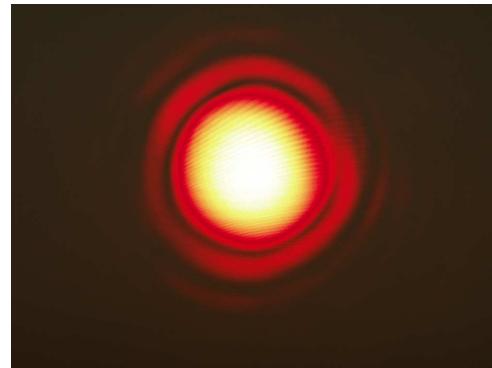
⁴Žarek z najmanšo mogočo divergenco je uklonsko omejen. Minimalna divergencia idealnega Gaussovega snopa je opisana z enačbo

$$\Theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w}, \quad (3.6)$$

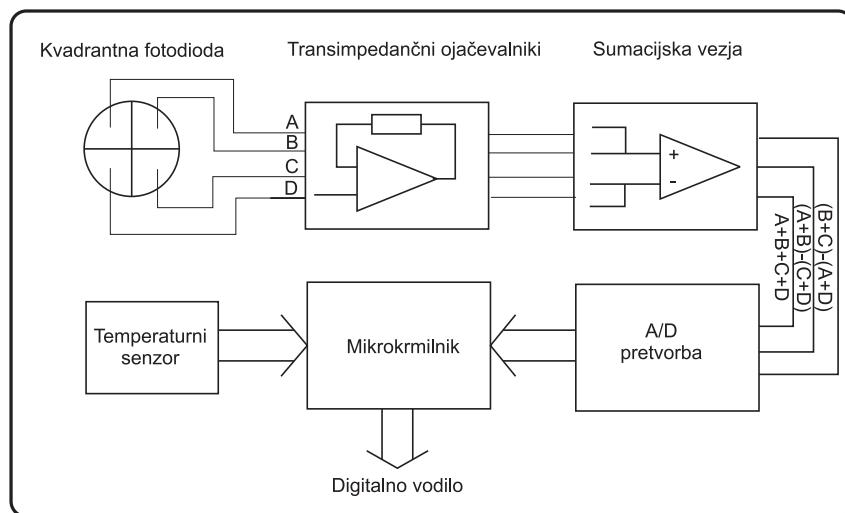
kjer je Θ polovični kot minimalne divergence, λ valovna dolžina svetlobe in w polmer grla (najmanjšega premera). V našem primeru znaša $\Theta = 0.2 \text{ mrad}$. Z večjim premerom žarka bi dosegli manjšo divergenco, vendar je v tej situaciji (ob nespremenljivi dolžini žarka) pomembnejša čim večja občutljivost sistema, ki jo dosežemo s čim manjšim premerom žarka pri danem maksimalnem odklonu.

⁵Delno je ta problem mogoče rešiti z uporabo dodatnega kompenzacijskoga detektorja, ki je nameščen ob laserskem viru in zaznava le njegovo lezenje; vendar to vključuje dodatne optične elemente ter veča velikost in ceno sistema

⁶Gaussova porazdelitev je le približek dejanske porazdelitve optične moči po izhodu iz vlakna, vendar na merilni sistem to ne vpliva, saj je eksperimentalno kalibriran. To je potrebno zaradi ostalih vplivov na žarek - aberacije zaradi geometrije kolimacijske optike, morebitne nečistoče na optičnih elementih in posledično pojav razpršene svetlobe itd.



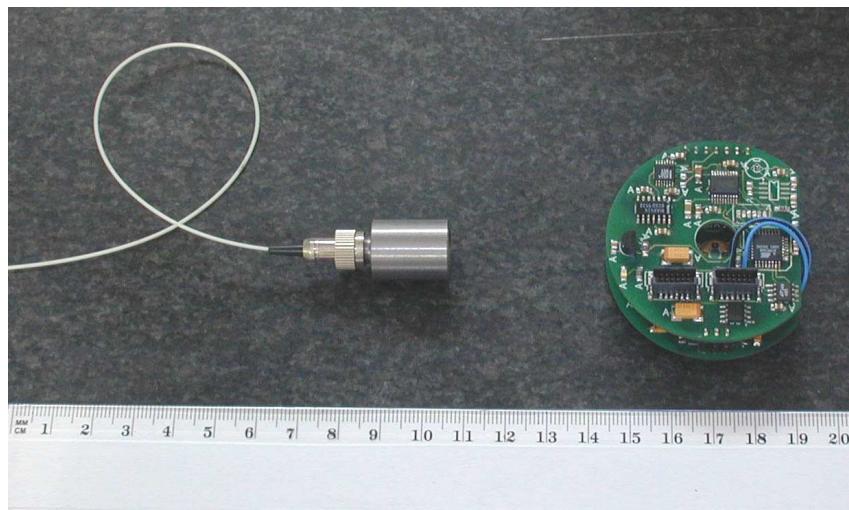
Slika 3.4: Projekcija referenčnega žarka, posneta s CCD čipom



Slika 3.5: Funkcionalni diagram detektorskega vezja

laserskega vira in optične glave pomeni tudi, da je vir toplote lahko bolj oddaljen od kritičnih (merjenih) komponent mehanizma. Poleg tega so fizične dimenzije optične glave lahko zelo majhne, kar je pomembno pri praktični montaži v mehanizem. Podrobnejši opis optičnih gradnikov je v dodatku A.

Detektorsko vezje se nahaja na drugem koncu segmenta in je shematsko predstavljeno na sliki 3.5. Vpadni žarek zadane kvadrantno fotodiido, ki generira štiri fototokove, proporcionalne optični moči nad posameznim kvadrantom. Ti majhni tokovi (reda 100 μA) se s pomočjo transimpedančnih ojačevalnikov ojačajo in pretvorijo v napetosti. V skladu z enačbami 3.1 in 3.2 s pomočjo operacijskih ojačevalnikov tvorimo napetosti $(V_B + V_C) - (V_A + V_D)$, $(V_A + V_B) - (V_C + V_D)$ ter $(V_A + V_B + V_C + V_D)$. Mikrokrmlnik Atmel AVR s pomočjo 16-bitnega A/D pretvornika te napetosti digitalizira in nadalje



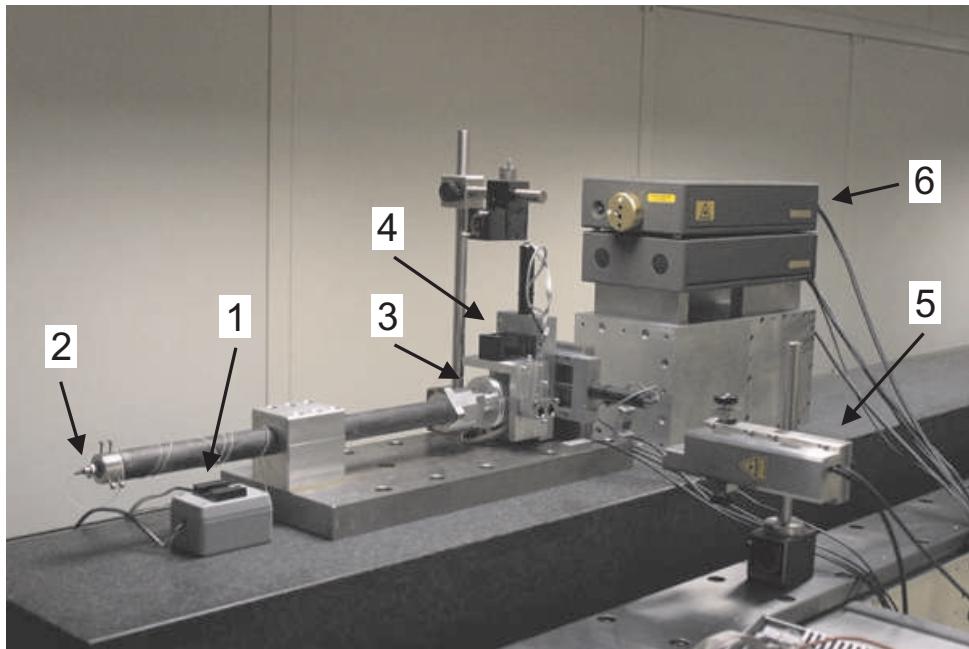
Slika 3.6: Optična glava in detektorsko vezje

obdela. Kvantizacijski korak v našem primeru ustreza ločljivosti približno $0.01 \mu\text{m}$.

Najpomembnejši kriteriji pri izbiri elementov in načrtovanju vezja so bili majhen merilni šum, časovna stabilnost in prostorska učinkovitost. Detektorsko vezje je tako sestavljeno iz dveh štiriplastnih tiskanih ploščic, spodnje analogne in zgornje analogno-digitalne. Majhne dimenzijske razlike med optično glavo in detektorsko vezjo (izgotavljeni prototipni komponenti sta prikazani na sliki 3.6) nam omogočajo, da ju namestimo popolnoma v notranjost merjenega segmenta. Celotna optična pot referenčnega žarka se tako nahaja v zaprtem prostoru. Nekateri kvarni vplivi na meritve - npr. različna osvetlitev ambienta, predvsem pa zračne turbulence -, ki sicer pestijo podobne sisteme, so na ta način minimizirani.

Na skupno podatkovno vodilo, ki ga nadzoruje glavna enota, je lahko priključenih poljubno število parov laser - detektor; meritve je torej mogoče upogibati v več segmentih mehanizma oz. več prostostnih stopenj upogiba posameznega segmenta. Natančen trenutek, ko se vrednosti odklona zajamejo in shranijo, je določen s skupnim prožilnim signalom, ki je del digitalnega vodila. Meritve so tako lahko natančno sinhronizirane. Omogočeno je tudi programsko proženje z ukazom glavni enoti ali pa se izmerjene pozicije kontinuirano pošiljajo z največjo vzorčno frekvenco. Zadnji način delovanja je tako uporaben tudi pri meritvah prehodnih pojavov, vibracij ipd.

Glavna enota vsebuje vezja za napajanje in nadzor drugih komponent, skrbi pa tudi za komunikacijo z zunanjim krmilnikom oz. računalnikom. V ta namen ima vgrajen USB vmesnik, preko katerega sistem trenutno komunicira z namensko razvito programsko opremo v osebnem računalniku. Ta je namenjena zajemu podatkov ter upravljanju in



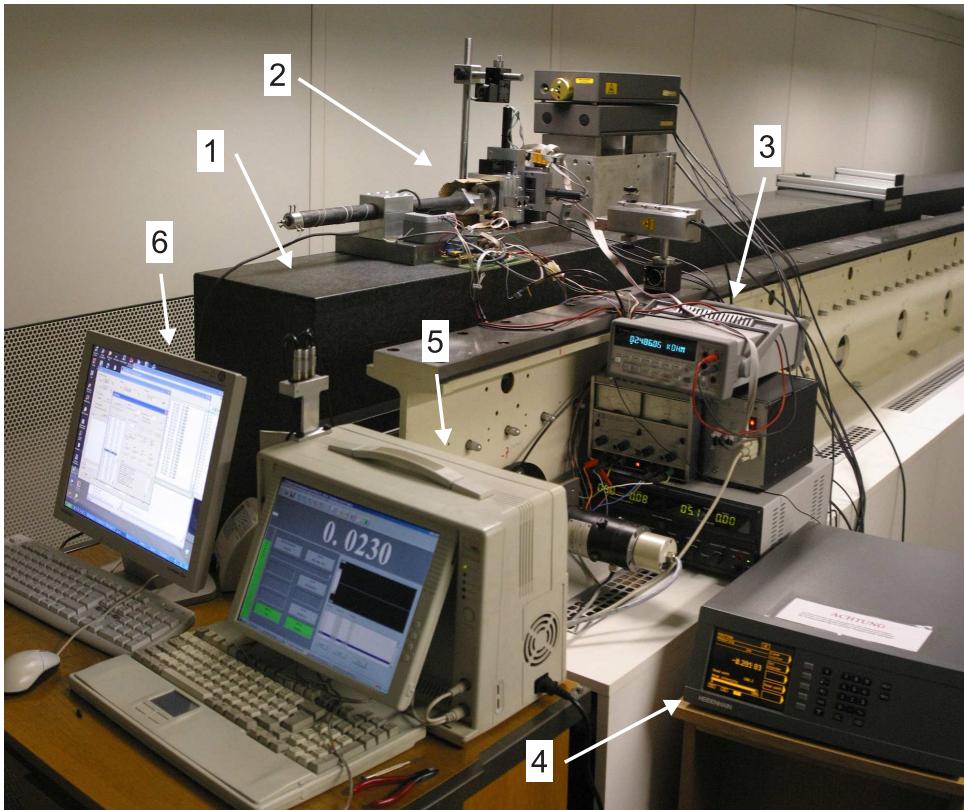
Slika 3.7: Eksperimentalna postavitev sistema: 1 - laserski vir, 2 - optična glava, 3 - detektor, 4 - mikropozicionirne stopnje, 5 - laserski interferometer X-osi, 6 - laserski interferometer Y-osi

nadziranju posameznih komponent (obratovalni parametri laserskega vira, natančne temperature vseh enot itd.). Podrobnejši opis razvite programske opreme je v dodatku D.

3.3 Eksperimenti

Da bi natančno kalibrirali in nato ovrednotili novi merilni sistem, smo izvedli niz eksperimentov. Vsi so potekali v nadzorovanem okolju posebne klimatske komore [41], ki omogoča natančno regulacijo atmosferskih razmer meritve (temperature in vlage zraka). Pri meritvah v mikrometrskem območju je to nujno potrebno, da se izognemo vplivu temperaturnih deformacij mehanskih gradnikov in zagotovimo stabilnost referenčnih merilnih inštrumentov v daljšem časovnem obdobju.

Postavitev merilnega sistema v merilni komori je vidna na sliki 3.7. Optična glava je bila pritrjena na koncu kompozitne cevi s karbonskimi vlakni dolžine 600 mm, zunanjega premera 32 mm in notranjega premera 23 mm. Praktičen pomen cevi je bil predvsem v tem, da popolnoma obdaja laserski žarek v stabilnem (neturbulentnem) okolju. Cev pri tem eksperimentu ni bila aktivno deformirana. Detektor je bil namesto tega pritrjen na dve mikropozicionirni stopnji Physik-Instrumente M-150.10 v XY

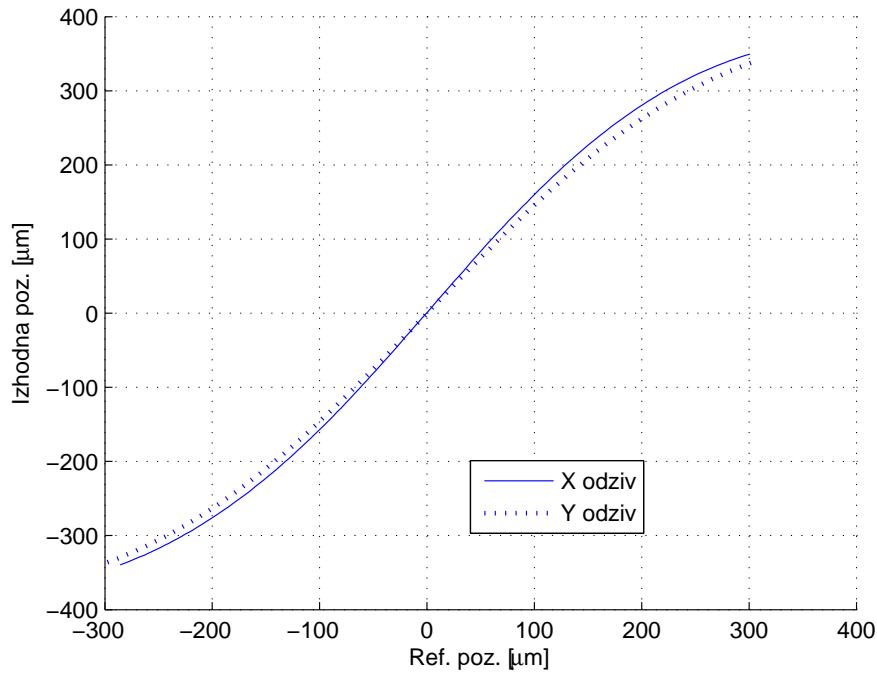


Slika 3.8: Kalibracijski sistem med delovanjem: 1 - granitna miza, 2 - merilni sistem, 3 - napajanje sistema, krmiljenje mikropozicionirnih stopenj, Ω -meter za beleženje temperature, 4 - krmilna enota Heidenhain interferometra, 5 - nadzorni računalnik Renishaw interferometra, 6 - nadzorni računalnik celotnega kalibracijskega sistema

konfiguraciji, ki sta ga premikali v merilni ravnini. Izmerjena ločljivost pozicionirnikov je bila $0.2 \mu\text{m}$, dvosmerna ponovljivost pa $2 \mu\text{m}$. Detektor se je nahajal v aluminijastem ohišju, ki je bilo pritrjeno na pozicionirnike, ti pa na brušeno jekleno ploščo debeline 40 mm, skupaj s cevjo in optično glavo. Celoten sistem je stal na masivni granitni podlagi, ki je zagotavljala stabilno podporo vsem inštrumentom.

Za natančno merjenje dejanske pozicije detektorja v merilni ravnini smo uporabili dva laserska interferometra - Heidenhain ILM-1131 za meritev horizontalnega (X) ter Resnishaw ML10 za meritev vertikalnega (Y) gibanja. Ločljivosti omenjenih sistemov naj bi znašali 0.1 in 1 nm - v laboratorijskem okolju pa sta bili približno $0.1 \mu\text{m}$, kar je zadostovalo za načrtovane preizkuse. Retroreflektorja laserskih interferometrov sta bila togo pritrjena na ohišje detektorja v oseh kvadrantnega fotodetektorja, da bi se izognili odklonom zaradi Abbejeve⁷ napake.

⁷Prečni odklon premične stopnje v določeni točki, ki je posledica kotnega odklona pri vodenju stopnje in odmika te točke od vodil oz. merilnega sistema.



Slika 3.9: Odziv detektorja v osi X in Y

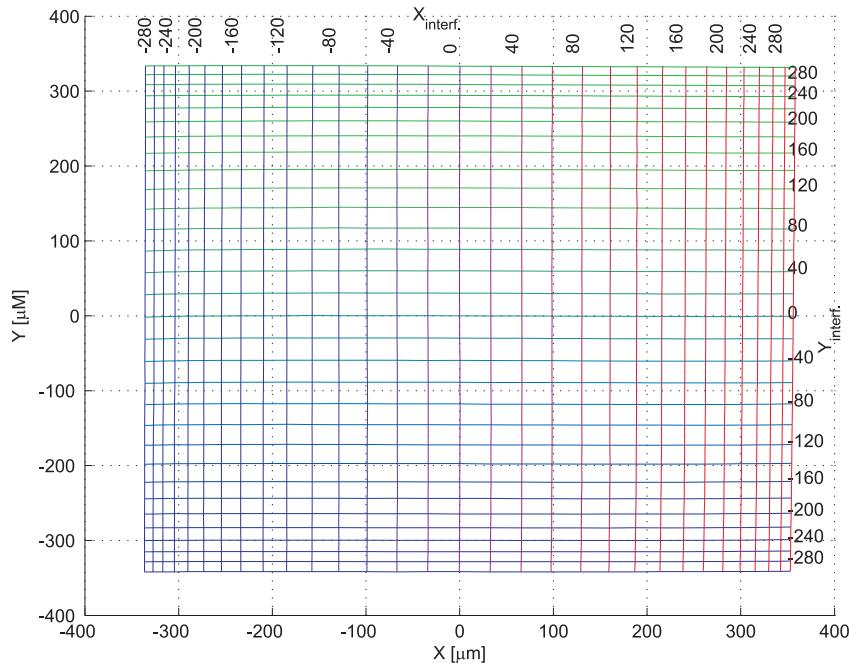
Za nadzor celotnega sistema smo uporabili osebni računalnik, ki je krmilil mikropozicionirne stopnje in zajemal meritve iz laserskega merilnega sistema kot tudi iz referenčnih laserskih interferometrov. Vsi merilni sistemi so bili sinhronizirani s skupnim prožilnim signalom. Hkrati so se zajemali tudi podatki o temperaturi okoliškega zraka in jeklene podložne plošče⁸. Za osebni računalnik je bila razvita aplikacija, ki je omogočala popolnoma avtomatsko izvajanje vseh omenjenih dejavnosti⁹. Kalibracijski sistem (slika 3.8) je tako lahko deloval nenadzorovano in brez motenj (temperturna nihanja, vibracije itd.), ki bi jih v merilni sobi povzročal človek.

3.4 Rezultati

Cilj prvih preizkusov je bil oceniti osnovne lastnosti sistema. Sprva je bil posnet enodimensionalni odziv detektorja v osi X (z osjo Y v srednji poziciji) in osi Y (z osjo X v srednji poziciji). Izmerjene krivulje (na sliki 3.9) so v skladu s teoretičnimi napovedmi [48]. Z naraščajočo razdaljo od središčnega območja z dobro linearnostjo se občutljivost

⁸Temperatura v merilni komori je pri vseh meritvah, razen pri meritvi časovnega drifta, znašala približno 20.5 °C, pri čemer se je v času meritve spremnjala za manj kot ± 0.03 K.

⁹Več o programski opremi v dodatku D



Slika 3.10: 2D-odziv detektorja

zmanjuje zaradi okrogle oblike žarka in njegove porazdelitve. Razlika v občutljivosti osi X in Y izhaja iz nepopolne oblike žarka (ovalnosti), ki je posledica kolimacijske optike ter manjših razhajanj med analognimi elektronskimi komponentami.

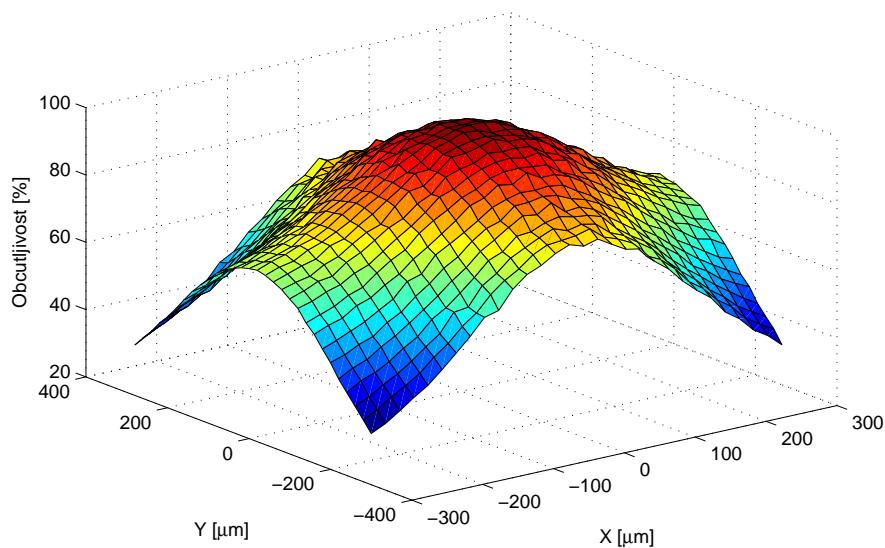
Z natančnim merjenjem odziva na kratkih intervalih v različnih točkah pa smo ugotovili naslednje:

- histereza in "mrtvi hod" sta pod pragom zaznave;
- pozicijske ločljivosti sistema ni mogoče natančno definirati, saj je odvisna tako od določljivih dejavnikov - elektronskega šuma, ločljivosti A/D pretvorbe - kot tudi nedoločljivih okoliščin. Med te štejemo predvsem toplotne razmere v okolici ter naključne vplive zračnih turbulenc in vibracij. Z elektroniko detektorja je tako ločljivost omejena na manj kot $0.5 \mu m$, dejanska ločljivost celotnega sistema v pogojih, kot so bili opisani v razdelku 3.3, pa je $0.1 \mu m$ ¹⁰.

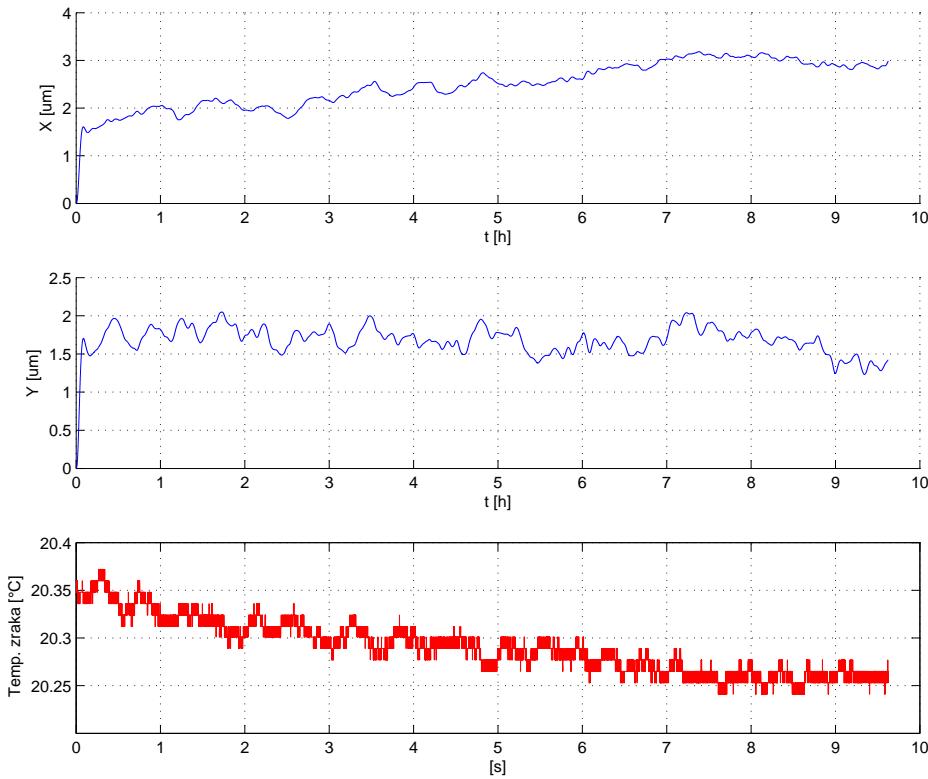
¹⁰To je ločljivost v kratkoročnem časovnem obdobju. Pri daljših časih opazovanja pridejo do izraza prostorska nihanja laserskega žarka zaradi termičnih pojavov, vpetja optične glave in drugih dejavnikov. Odvisno od okoliščin pa je na voljo tudi možnost povprečenja s primernim časovnim oknom, ki bi znatno zmanjšalo merilni šum.

Nadalje je bila izmerjena dvodimenzionalna karakteristika detektorja (slika 3.10). Majhne nepravilnosti v obliku in distribuciji optične moči žarka, ki jih povzročajo morebitne nečistoče, nepravilnosti na optičnih elementih in razpršena svetloba povzročajo rahla odstopanja pri odzivih v osi X v odvisnosti od Y koordinate in obratno. Ta so lahko razreda nekaj μm in za natančne rezultate moramo izvesti 2D kalibracijo odziva. Horizontalne črte na sliki 3.10 tako predstavljajo odzive v X-smeri detektorja pri konstantnih Y-pozicijah z rastrom $20 \mu m$. Podobno velja za vertikalne črte, ki ustrezajo odzivom v Y-smeri pri konstantnih X pozicijah. Krivulje so prikazane v nekalibriranem prostoru v skladu z enačbami 3.1 in 3.2. Os X in Y grafa ustreza odzivu detektorja, polje krivulj pa dejanskim pozicijam, kot sta jih indicirala laserska interferometra. Zopet je očitno upadanje občutljivosti z oddaljevanjem od središča. Skupna občutljivost, kot odvod odziva v posamezni meritni točki, je prikazana na sliki 3.11. Vidimo, da je občutljivost na robu izbranega meritnega območja, t. j. $-300 \mu m < X, Y < 300 \mu m$, približno $1/3$ maksimalne občutljivosti v osrednjem delu.

Izmerjen je bil tudi časovni drift sistema. V temperaturno stabilnem okolju (temperatura med potekom deseturne meritve je znašala med $20,25$ in $20,35^\circ C$) smo merili izhodno pozicijo sistema z vzorčno frekvenco 1 Hz . Rezultati, prikazani na sliki 3.12, kažejo na manj kot $2 \mu m$ lezenja vzdolž X-osi in $1 \mu m$ vzdolž Y-osi v obdobju 10 ur. Verjeten vzrok lezenja so mehanske deformacije različnih elementov zaradi preostalih nihanj v temperaturi in majhna prostorska nihanja laserskega žarka. Izmerjeno lezenje pa nam ne preprečuje doseganja višje točnosti v krajsih časovnih obdobjih; v 30-minutnem



Slika 3.11: Občutljivost detektorja v meritnem območju

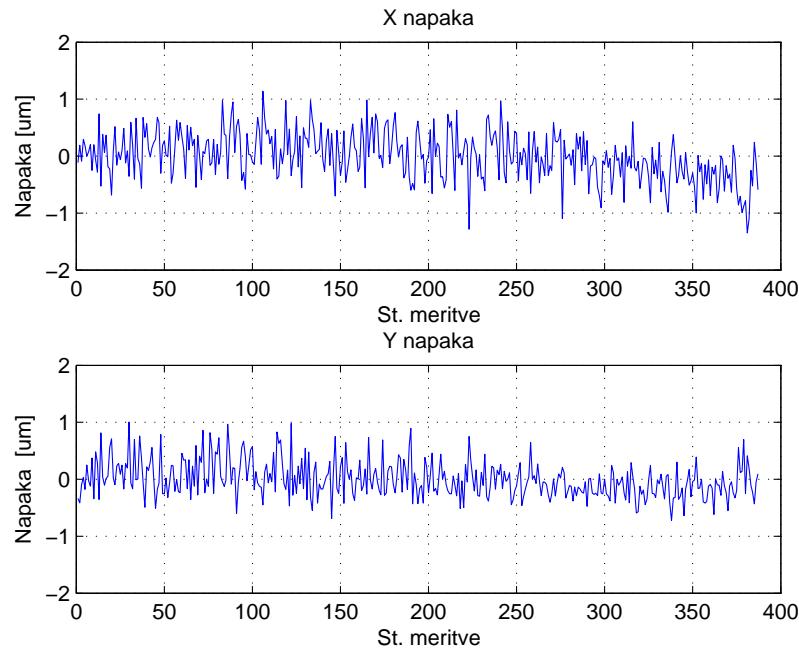


Slika 3.12: Časovno lezenje sistema

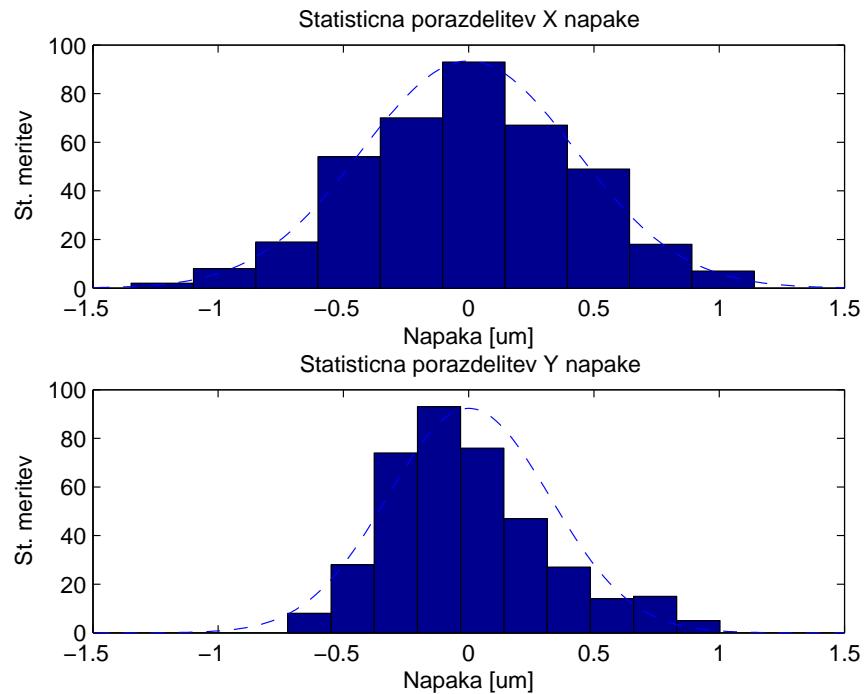
intervalu je kratkoročna stabilnost namreč boljša od $0.5 \mu\text{m}$.

Končno je bil izveden še preizkus točnosti. Podatki s slike 3.10 so rabili za kalibracijo sistema. Detektor smo nato premaknili v 400 naključnih pozicij, enakomerno porazdeljenih po merilnem območju. Izhodna pozicija detektorja je bila preračunana z dvodimenzionalno linearno interpolacijo kalibracijskih podatkov, prave vrednosti pa smo zopet zajemali s pomočjo interferometrov. Odstopanja zaporednih meritev od referenčnih vrednosti so prikazana na sliki 3.13.

Največja napaka v Y-osi je tako $1 \mu\text{m}$, v X-osi pa malce več, $1.3 \mu\text{m}$. V slednji je opazno tudi rahlo lezenje, saj je meritev trajala več kot pol ure. Statistični prikaz odstopanj (slika 3.14) kaže na približno Gaussovo porazdelitev (črtkano v grafu). Standardni deviaciji v X in Y osi sta $\sigma_X = 0.4 \mu\text{m}$ in $\sigma_Y = 0.35 \mu\text{m}$. Iz tega sledi, da s 95-odstotno ($\pm 2\sigma$) zanesljivostjo velja, da je izmerjeni rezultat znotraj $\pm 0.8 \mu\text{m}$ intervala prave vrednosti. Nadaljnje izboljšanje teh vrednosti bi bilo mogoče ob bolj

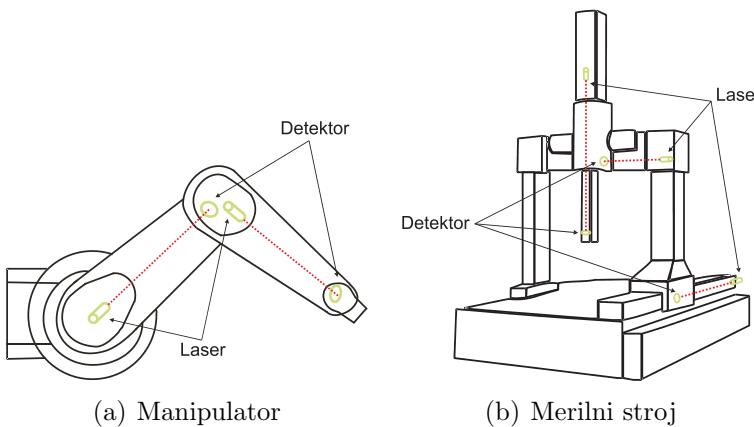


Slika 3.13: Pozicijska napaka v merilnih točkah



Slika 3.14: Statistična porazdelitev napake v merilnih točkah

izpopolnjenih kalibracijskih metodah in uporabi npr. polinomske namesto linearne interpolacije. Predvsem v statičnih oz. počasi spremenljajočih se razmerah pa znova



Slika 3.15: Dva primera mogoče uporabe merilnega sistema

pride v poštev časovno povprečenje signala z ustreznim intervalom, kar ugodno vpliva na točnost sistema.

3.5 Uporaba sistema

Navedeni rezultati dokazujejo uporabnost novega optičnega sistema za meritve deformacij v preciznih mehanizmih. Kratek povzetek njegovih značilnosti je podan v tabeli 3.1. Omenimo, da je glede na zahteve ciljnega sistema mogoča poljubna¹¹ prilagoditev merilnega območja. Predvsem majhne dimenzije in teža glavnih komponent, t. j. optične glave in detektorja, omogočajo integracijo sistema v merilne naprave, kot so koordinatne merilne roke, kjer so te lastnosti nepogrešljive, pa tudi na drugih področjih.

Dve mogoči aplikaciji ilustrira slika 3.15. Primer (a) cilja, kot je bilo omenjeno že uvodoma, predvsem na uporabo v domeni fleksibilnih manipulatorjev oz. njihovem krmiljenju; (b) pa na uporabo v klasičnih merilnih strojih, kar postaja še posebej smiselno v luči sodobnega trenda na tem področju, dinamičnih meritev. Širše gledano pa bi bil novi merilni sistem smotrna izboljšava vsakega mehanskega oz. mehatronskega sistema, ki mu koristi natančna informacija o deformaciji.

¹¹Potrebna je prilagoditev premera žarka, ki mora v ravnini detektorja biti vsaj za 10% večji od merilnega območja, t. j. največjega pričakovanega odmika. Za zaznavanje spremembe pozicije mora namreč na obeh polovicah detektorja biti navzoč vsaj del projicirane svetlobe. Hkrati mora biti polmer aktivne površine kvadrantne diode večji od premera žarka, da je njegova projekcija v celoti vsebovana na detektorju. Večanje površine diode le minimalno pripomore k zviševanju merilnega šuma. Večanje premera žarka pa po drugi strani proporcionalno zmanjšuje elektronsko dosegljivo ločljivost sistema. Pri večjih razdaljah pa je tudi ta pojav zaradi dominantnega vpliva zračnih turbulenc skoraj zanemarljiv.

Tabela 3.1: Nekatere lastnosti merilnega sistema

Merilno območje	X $\pm 300 \mu\text{m}$ Y $\pm 300 \mu\text{m}$
Resolucija	0.1 μm
Ločljivost ($\pm 2\sigma$)	$\pm 0.8 \mu\text{m}$
Časovni drift	$\pm 2 \mu\text{m} / 10 \text{ ur}$
Maks. vzorčna frekv.	1.2 kHz
Čas proženja	< 20 μs
Načini proženja	Programsko Strojno Kontinuirano
Optična glava - dimenzije	$\phi 15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$
Optična glava - masa	20 g
Detektor - dimenzije	$\phi 52 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$
Detektor - masa	25 g

4 Merjenje deformacij KMR

V tem poglavju bomo prej opisani laserski sistem obravnavali v povezavi z merilnimi rokami; meriti želimo deformacijo segmentov KMR, rezultate pa gledati v luči mogočih izboljšav točnosti merilnih rok. V skladu z ugotovitvami iz drugega poglavja si obetamo najti jasno izražene vplive naslednjih virov pogreškov:

- gravitacijske sile - povzročajo deformacijo segmenta zaradi njegove lastne teže in teže vseh gradnikov, ki mu v kinematični verigi sledijo. Kot smo že omenili, relativno preprosta matematična kompenzacija gravitacije ne more upoštevati različnih okoliščin merjenja (in torej različnih točk podpore¹ mehanizma), rabi pa nam lahko za primerjavo rezultatov;
- sile, ki jih izvaja operater na vrh mehanizma. Vpliv teh je nepredvidljiv in ga je treba izmeriti;
- dinamične sile, ki nastajajo pri pospeševanju in zaviranju mehanizma. Te notranje sile bi le stežka učinkovito modelirali in tudi še niso bile izmerjene;
- sile trenja in lepenja v ležajih. Izredno težko določljivi vplivi na obnašanje mehanizma KMR, ki prav tako še niso bili izmerjeni.

Glede na način integracije laserskega merilnega sistema in koordinatne merilne roke ter nekatere s tem povezane omejitve cilj tega poglavja ne bo natančno ovrednotenje teh pojavov ali kompenzacija njihovih vplivov na točnost indikacije pozicije vrha. Raje nas zanima, kako, s kakšno močjo in s kakšnimi razmerji nastopajo deformacije v segmentu kot posledice teh pojavov v tipičnih situacijah uporabe KMR.

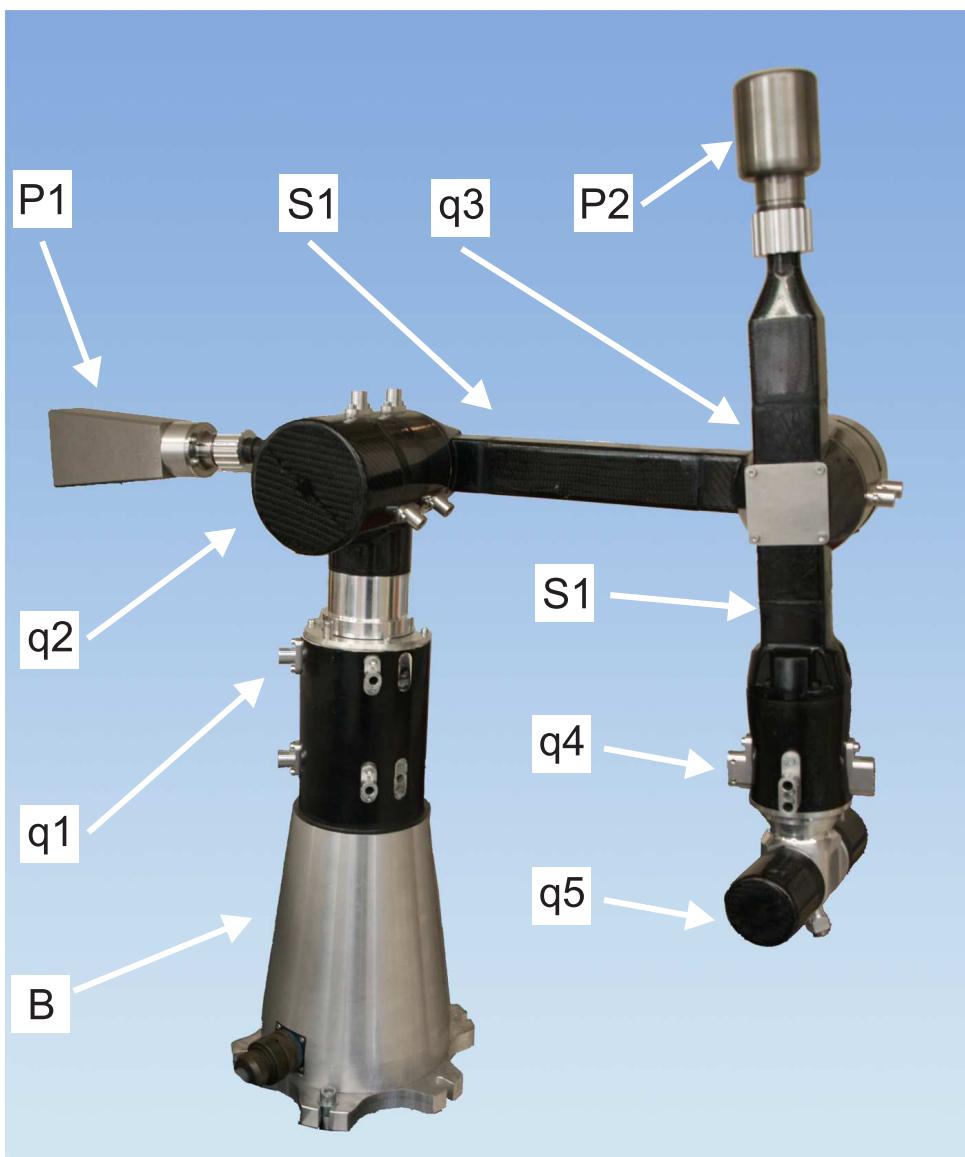
4.1 Integracija merilnega sistema v KMR

Sistem smo sklenili namestiti na obstoječo merilno napravo AMG-2 [7], slika 4.1. Idealna namestitev merilnega sistema bi bila takšna, da bi se optična os ujemala s simetralo

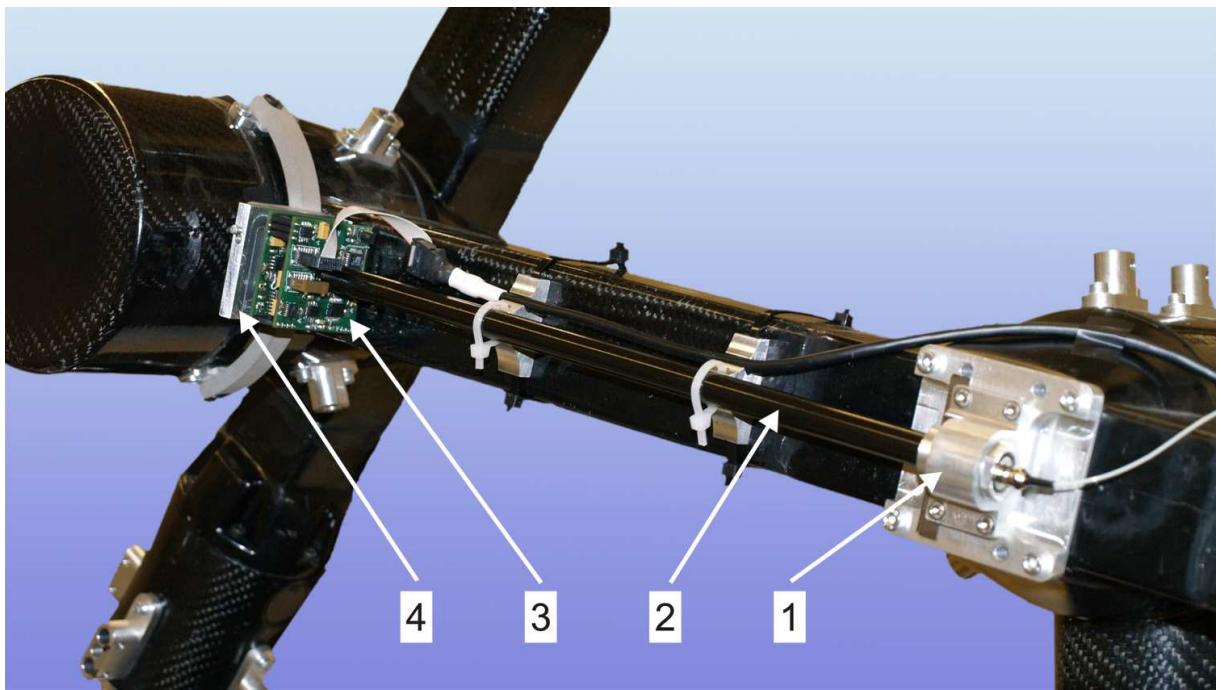
¹Operater lahko KMR pri premikanju drži na različne načine, tako so različne tudi točke, v katerih na mehanizem deluje s silo

merjenega segmenta, svetlobni vir, t. j. optična glava, in detektor pa bi bila čim bliže osi pripadajočih sklepov. Glede na to, da omenjena KMR prvotno ni bila načrtovana na način, ki bi takšno vgradnjo dopuščal, smo bili prisiljeni v nekatere poenostavitev.

1. Odločili smo se za merjenje deformacije samo enega segmenta. Izbrali smo prvi horizontalni segment, pri katerem je očitno, da lahko pričakujemo največje odklone.
2. Laserski merilni sistem smo s pomočjo posebnih nosilcev pritrtili zunaj segmenta. Problem atmosferskih vplivov (predvsem zračnih turbulenc) na meritev smo rešili z dodatno kompozitno cevjo iz karbonskih vlaken, ki je popolnoma obdajala referenčni žarek.



Slika 4.1: Koordinatna merilna roka AMG-2: B - baza, q1..q5 - sklepi 1 do 5, S1 in S2 - segmenta 1 in 2, P1 in P2 - protiutežna dela segmentov 1 in 2



Slika 4.2: Laserski merilni sistem, pritrjen na segment merilne roke: 1 - optična glava, 2 - cev iz karbonskih vlaken za zaščito žarka pred motnjami, 3 - detektor, 4 - nosilec in vmesnik za mikronastavitev položaja detektorja

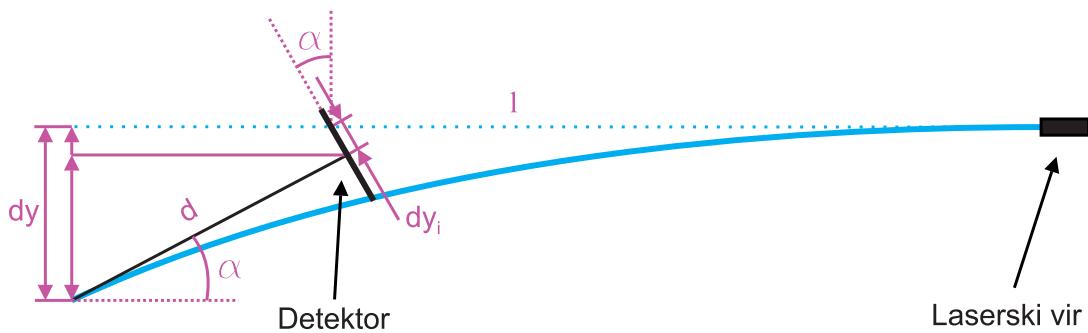
Na segment nameščen merilni sistem je prikazan na sliki 4.2. Slabosti te postavitve sta predvsem dve:

- glede na zamik merilne osi in osi segmenta bodo merilni rezultati poleg translacijske komponente deformacije vsebovali tudi posledice morebitnih torzijskih obremenitev segmenta;
- ker detektorskega dela ni bilo mogoče namestiti v os sklepa, temveč je za določeno razdaljo zamaknjen vzdolž segmenta, ne moremo meriti polnega odklona.

Oglejmo si, kako zadnja od omenjenih okoliščin vpliva na merilni rezultat. Pri tem bomo upoštevali obliko deformiranega segmenta, ki ustreza točkasti obremenitvi enega konca segmenta; ta oblika ustreza vsem na začetku poglavja naštetim silam.² Iz skice na sliki 4.3 lahko razberemo, da velja

$$dy = dy_i \cdot \cos(\alpha) + d \cdot \sin(\alpha), \quad (4.1)$$

²Izjema je gravitacijska sila, ki je kombinacija enakomerno distribuirane sile (lastna teža segmenta) in točkovne obremenitve (teža nadaljnjih segmentov). Vendar pa je prispevek lastne teže segmenta zaradi majhne mase v celotnem odklonu praktično zanemarljiv. Mogoče izjeme so še npr. večtočkovne obremenitve operaterja na posamezni segment ali pa malo verjetne vibracije pri višjih harmonskih frekvencah.



Slika 4.3: Razlika med indiciranim in dejanskim prečnim odmikom segmenta

kjer je dy dejanski prečni odmik segmenta, dy_i indicirani odmik, α kotno odstopanje konca segmenta, d pa oddaljenost detektorske ravnine od osi zadnjega sklepa. Če v enačbo vstavimo že znano odvisnost³ 3.5, lahko nadaljujemo z

$$dy = dy_i \cdot \cos\left(\frac{3}{2 \cdot l} \cdot dy\right) + d \cdot \sin\left(\frac{3}{2 \cdot l} \cdot dy\right), \quad (4.4)$$

kjer je l dolžina segmenta. Zadnja enačba je transcendentne vrste in je zato algebrsko ni mogoče rešiti. Trigonometrični funkciji lahko poenostavimo s Taylorjevo vrsto, zaradi zelo majhnih pričakovanih kotov pa upoštevajmo le prvi člen - torej $\sin(x) = x$ in $\cos(x) = 1$, in dobimo

$$y \approx \frac{y_i}{\left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{d}{l}\right)}. \quad (4.5)$$

V našem primeru znašata $l = 365 \text{ mm}$ in $d = 80 \text{ mm}$, zato velja razmerje

$$y \approx 1.49 \cdot y_i. \quad (4.6)$$

Ilustrirajmo še nekaj primerov s pričakovanimi odzivi detektorja v tipičnih položajih merilne roke. Na slikah 4.4(a) do 4.4(d) je prikazan obravnavani segment v različnih situacijah s pretirano izraženo deformacijo, kot jo lahko predvidimo z izračunom z metodo

³Ta relacija opisuje razmerje med prečnim odklonom segmenta, ki je točkovno obremenjen na svojem koncu, in kotom odklona na koncu segmenta. Medtem ko se ta glasi

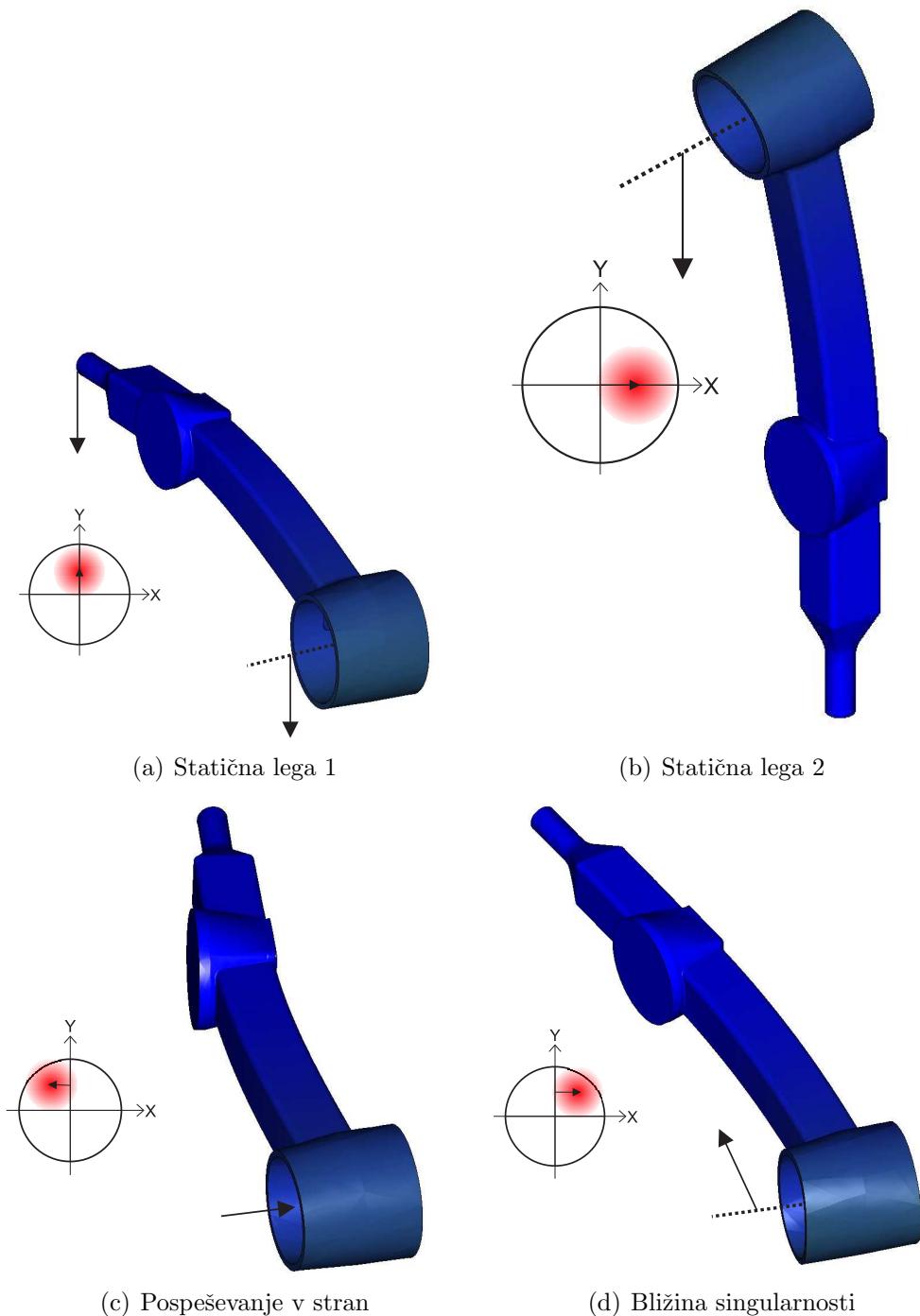
$$\frac{\alpha}{dy} = \frac{3}{2 \cdot l}, \quad (4.2)$$

pa je razmerje pri enakomerno distribuirani obremenitvi vzdolž segmenta:

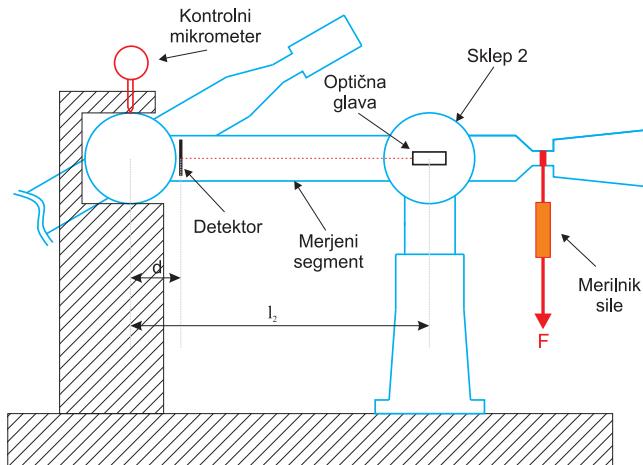
$$\frac{\alpha}{dy} = \frac{4}{3 \cdot l}. \quad (4.3)$$

V zvezi z opombo 1 in opisano namestitvijo sistema bo torej pri izračunu odklona prišlo do manjšega odstopanja od dejanskega, kar bomo zanemarili.

končnih elementov; pripadajoči diagram pa prikazuje ustrezeno spremembo položaja projiciranega žarka na detektorju. Z vsakim od teh scenarijev se bomo srečali v nadaljevanju. Poseben primer pa je ”stick-slip” pojav v vležajenju, t. j. izmenjava sil trenja in lepenja, ki nastopi pri majhnih hitrostih (pospeševanju in ustavljanju) in povzroča naključno sunkovito gibanje. Predvidevamo, da bomo pri merjenju deformacije zaznali tudi ta pojav.



Slika 4.4: Pričakovani odkloni v različnih legah roke



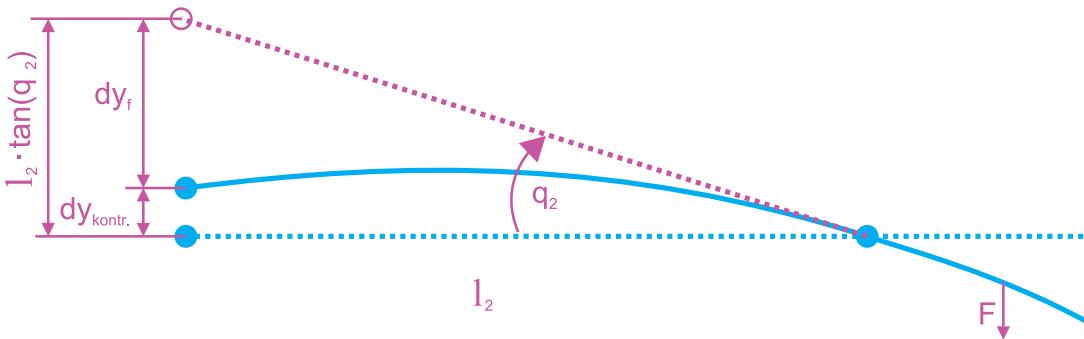
Slika 4.5: Postavitev sistema pri preizkusu s statično obremenitvijo

4.2 Eksperimenti

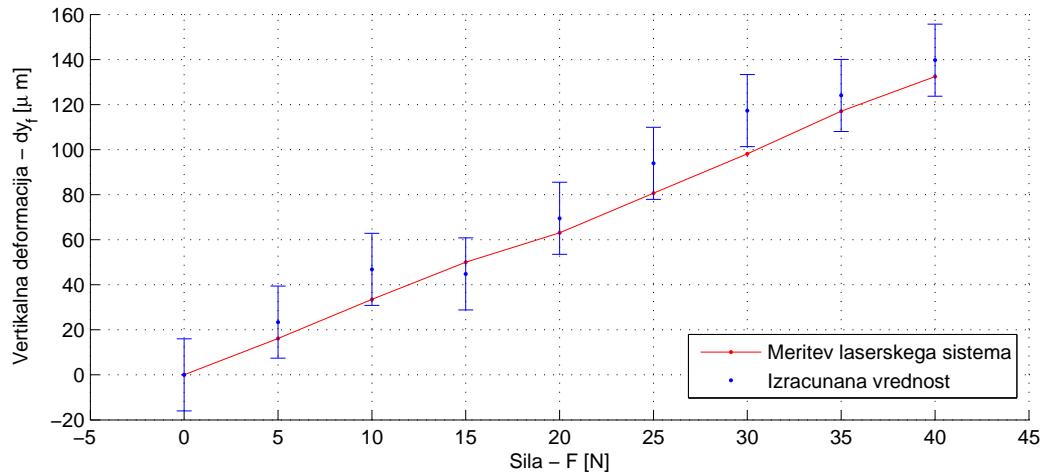
4.2.1 Statična sila na vrh segmenta

Prvi preizkus je bil namenjen preverjanju pravilnosti nekaterih predpostavk in veljavnosti formule za izračun dejanskega odklona iz podpoglavlja 4.1. Roka je bila pri preizkusu popolnoma statična. Konec merjenega segmenta smo togo pritrdrili na podlago v horizontalni legi, njegov protiutežni del pa dodatno obremenjevali z znano silo (slika 4.5). Pri tem smo z laserskim sistemom merili deformacijo segmenta, hkrati zajemali vrednost kota v drugem sklepu ter z dodatnim mikrometrom še morebitni premik fiksiranega konca segmenta.

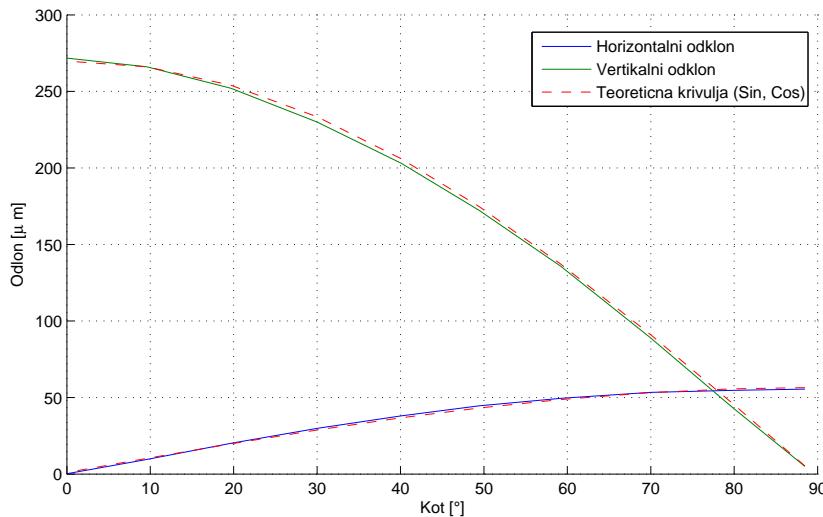
Obremenjevanje segmenta z dodatno silo bo le-tega ukrivljalo, kot je prikazano na sliki 4.6. Ker je konec segmenta pritrjen, mora spremembra kota v drugem sklepu ustrezati sami deformaciji segmenta. Glede na rezultate na sliki 4.7 je ujemanje dokaj



Slika 4.6: Odklon segmenta pri statični obremenitvi



Slika 4.7: Odklon pri večanju statične obremenitve segmenta



Slika 4.8: Odklon zaradi sile teže pri različnih kotih v drugem sklepu

natančno. Horizontalna os na grafu ustreza dodani obremenitvi, vertikalna pa odklonu, izmerjenem z laserskim sistemom (polna črta) ter izračunanemu odmiku glede na kot v sklepu, zmanjšanem za kontrolno meritev z mikrometrom (prekinjena črta). Manjša odstopanja, ki so vidna, so posledica v času meritve zmanjšane ločljivosti, ki nam je onemogočala natančno merjenje kota (območje kvantizacijske napake je označeno na grafu), ter poenostavitev (neupoštevanje različnih presekov segmenta) pri izračunu odklona. Kljub temu so rezultati v zadostni meri skladni.

4.2.2 Vpliv gravitacije

V drugem poizkusu smo se omejili izključno na merjenje vpliva gravitacije. Drugi sklep roke smo fiksirali v različne položaje od povsem vertikalnega (0°), slika 4.4(b), do horizontalnega (90°), slika 4.4(a). Odziv detektorja smo izmerili v korakih po 10° in je prikazan na sliki 4.8. Opazimo lahko, da dobro ustreza predvidevanjem s slik 4.4(a) in 4.4(b). Horizontalna komponenta odklona je največja v vertikalni legi in se zmanjšuje s kosinusom kota. Vertikalna komponenta je v svojem maksimumu seveda mnogo večja, narašča pa s sinusno funkcijo kota.

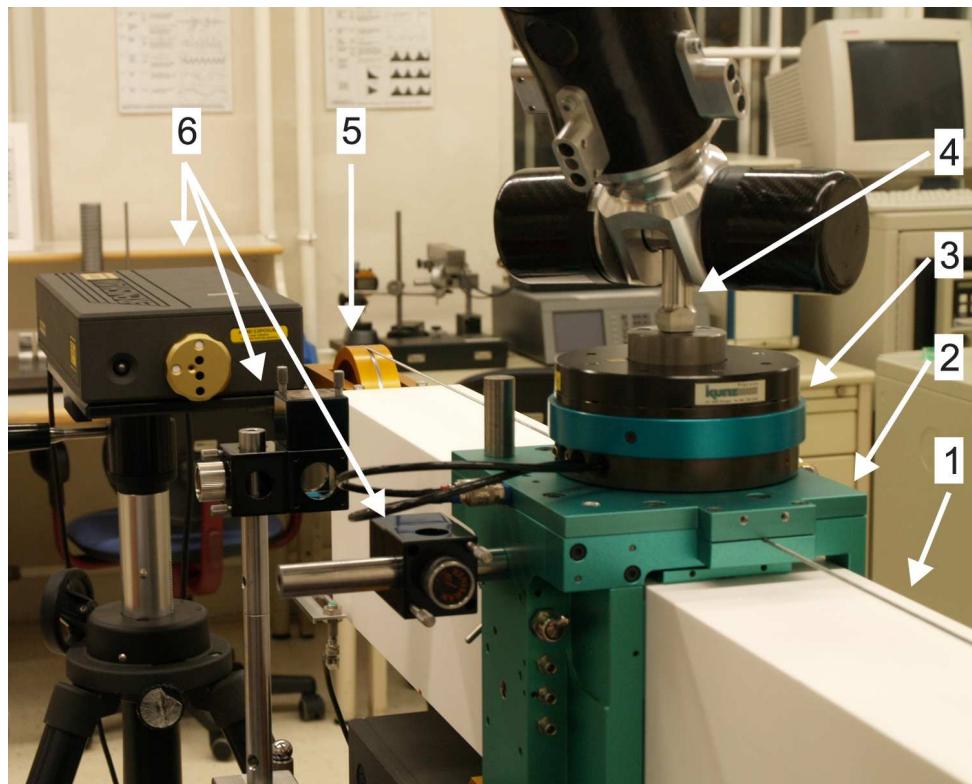
Relativno natančno ujemanje meritev z analitičnima krivuljama (maksimalno oddistanje do $3 \mu m$ v obeh smereh) še enkrat potrjuje pravilnost le-teh. Vendar, ponovimo, ne smemo sklepati, da je samo matematična kompenzacija gravitacije zaradi tega zadostna. Statične razmere, pri katerih ni nikakršnih zunanjih sil (podpore operaterja) na katerikoli delih merilne roke, so v realnem okolju namreč nedosegljive.

4.2.3 Sile pri vodenju vrha KMR

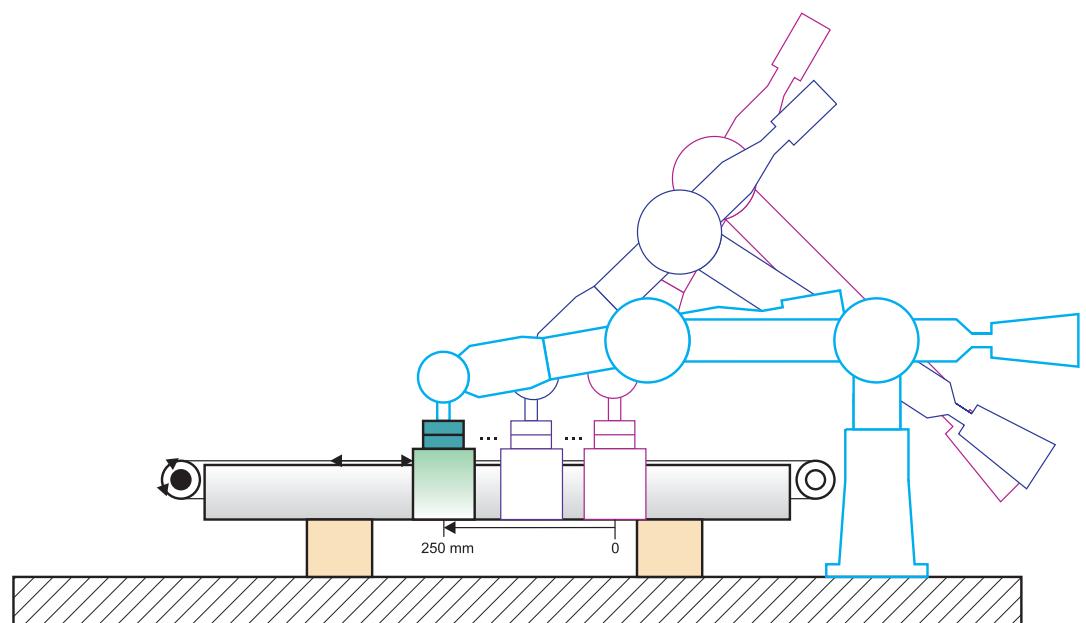
Za izvedbo tega eksperimenta smo vrh merilne roke preko rotacijskega sklepa pritrdirili na sani posebne kalibracijske naprave [4], slika 4.9. Premi keramični nosilec vodi zračno uležajene sani s pomočjo motorja. Vrh KMR smo tako lahko avtomatsko pozicionirali v eno od končnega števila leg in nato izvedli (statično) meritev odklona v segmentu. Sila na vrh mehanizma je bila edina zunanja sila, ki je delovala na mehanizem. V mirujočem stanju ta sila obstaja zaradi:

1. trenja oz. lepenja v ležajih,
2. nepopolnega uravnovešenja segmentov in
3. povečanih obremenitev mehanizma v legah, ki so blizu singularnim.

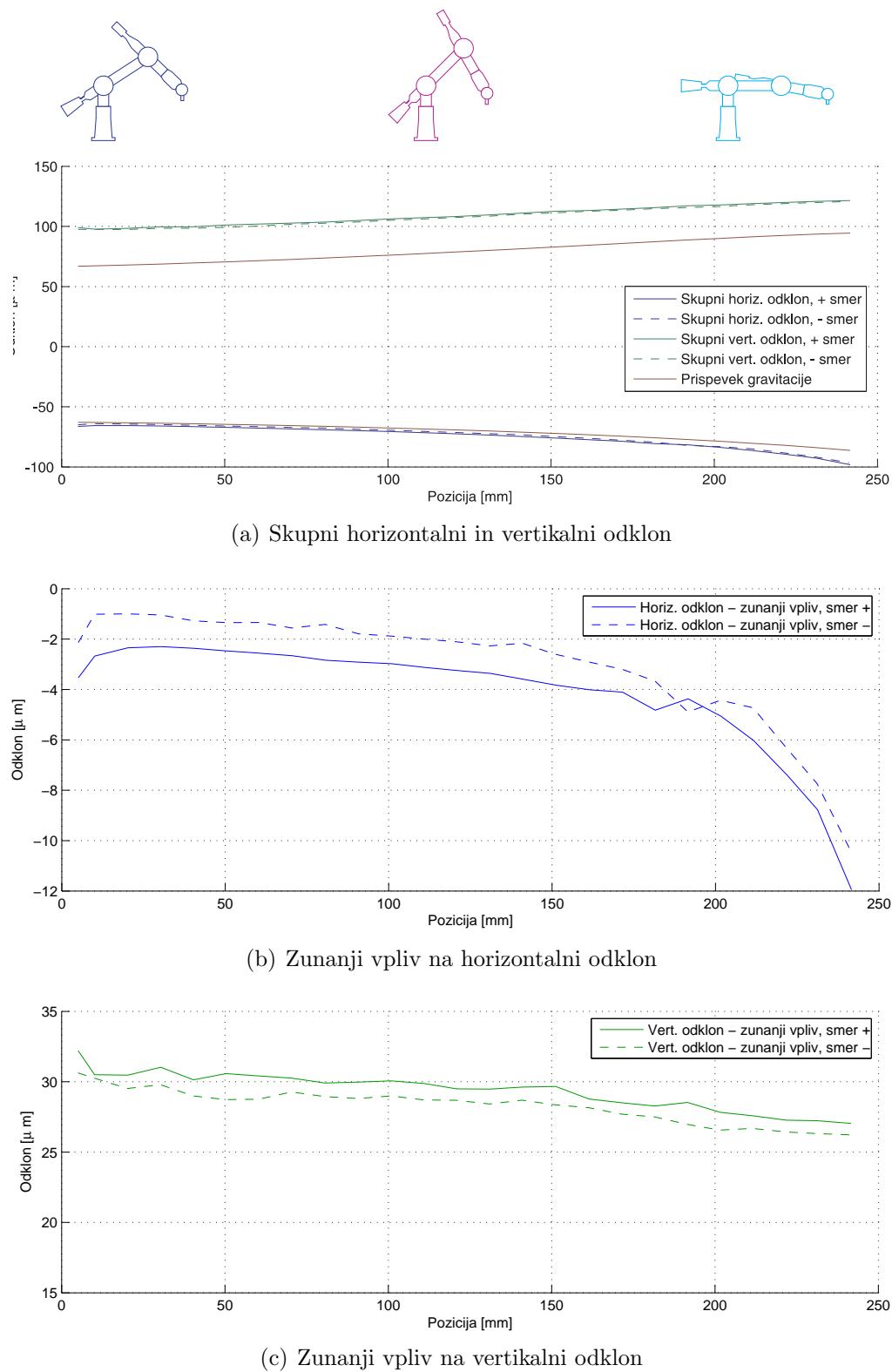
Shematski prikaz merilnih položajev je na sliki 4.10, rezultati pa na sliki 4.11. Prvi graf prikazuje skupne izmerjene deformacije v horizontalni in vertikalni smeri segmenta v odvisnosti od položaja sani, ki so vodile vrh merilne roke. Pri tem modra in zelena črta predstavlja izmerjeni odklon, rdeča pa odklon, kot ga lahko izračunamo z interpolacijo podatkov, izmerjenih v prejšnjem preizkusu, t.j. meritvi vpliva sile težnosti. Prekinjene črte ustrezajo drugi meritvi, pri kateri se je KMR premikala v nasprotni smeri. Če vpliv gravitacije odštejemo od skupnega odklona, lahko izoliramo preostale vplive, v tem primeru silo na vrh mehanizma. Razliko prikazujeta grafa na slikah 4.11(b) in 4.11(c).



Slika 4.9: Merilna roka, pritrjena na kalibracijsko napravo: 1 - keramični nosilec, 2 - zračno - vakuumsko uležajene sani, 3 - zračno - vakuumsko uležajen rotacijski sklep, 4 - zadnji segment merilne roke, 5 - pogonski sistem sani, 6 - merilni sistem pozicije sani



Slika 4.10: Položaj merilne roke pri vodenju s kalibracijsko napravo



Slika 4.11: Deformacija segmenta zaradi zunanje sile na vrhu

Relativno velika deformacija ($\approx 30 \mu\text{m}$) v vertikalni smeri je posledica nadkompenzacije teže zaradi dodatne mase laserskega merilnega sistema na protiutežnem delu segmenta⁴ in se sorazmerno malo spreminja, saj je tudi območje gibanja v drugem sklepu majhno. Odklon v horizontalni smeri je pričakovano majhen ($\approx 2 \mu\text{m}$), z izjemo zadnjih merilnih točk, ko nastopi povečanje deformacije reda $10 \mu\text{m}$. Le-to lahko razložimo s približevanjem singularni legi mehanizma (ki približno ustreza primeru s slike 4.4(d)), saj je v njej tretji sklep skoraj popolnoma iztegnjen in so za premikanje mehanizma potrebne velike sile. Očitna je tudi razlika v horizontalni deformaciji pri premikanju v pozitivno in negativno smer. Vzrok za to je sila lepenja v ležajih prvega sklepa, ki pri gibanju v nasprotni smeri deluje z drugačnim predznakom.

4.2.4 Dinamične obremenitve

Izvedli smo tudi meritve dinamičnih pojavov. Podatke o deformaciji segmenta smo zajemali z vzorčno frekvenco 1 kHz, največja dosegljiva frekvenca zajemanja vrednosti kotov KMR pa je bila 100 Hz. V obeh primerih smo merilno roko ročno premaknili iz ene v drugo lego, pri čemer smo jo premočrtno vodili za njen vrh s pomočjo kalibracijske naprave (postavitev ustreza tisti s slike 4.9). Trajektorija gibanja je ležala v horizontalni ravnini, segment 1 pa je bil približno v vodoravnem položaju, zato je bila dominantna smer deformacije v merjenem segmentu v X-osi detektorja.

Prvi primer (slika 4.12) je meritev agresivnejšega⁵ giba dolžine približno 60 mm. Graf sočasno prikazuje kotno pozicijo v prvem sklepu (q_1), iz slednje izračunano sklepno hitrost in pospešek ter deformacijo prvega segmenta. Vertikalna os, ki ustreza deformaciji, je za lažjo primerjavo s pospeškom v sklepu predstavljena v ustrezem merilu. Med slednjima lahko tako opazimo visoko korelacijo. Poleg tega časovni potek deformacije kaže na nekaj izrazitih pojavov (glej oznake na sliki 4.12). Poskusimo jih razložiti.

Območje 1A predstavlja začetni sunek, ki v ležajih sklepa povzroči prehod od lepenja k trenju in začne gibanje sklepa.

Območje 1B - posledica tega "stick - slip" pojava je kratkotrajen negativni odmik v sklepu in očitno nihanje oz. vibracije mehanske strukture.

Območje 1C je območje zveznega pospeševanja.

⁴To potrjuje tudi velikostni razred deformacije, ki glede na maso pritrjene komponente merilnega sistema in njen položaj na segmentu ustreza meritvam iz odseka 4.2.1.

⁵Z relativno veliko hitrostjo, pospeškom in sunkom (odvodom pospeška). Največja hitrost na vrhu KMR je v prvem primeru tako znašala približno 150 mm/s, pospešek pa $0,9 \text{ m/s}^2$. V drugem, počasnejšem primeru pa je bila maksimalna hitrost 75 mm/s, pospešek pa $0,35 \text{ m/s}^2$.

Območje 1D obsega zmanjševanje pospeška in prehod v pojemanje hitrosti. Sunek, ki določa zmanjševanje vrednosti pospeška, povzroči nove oscilacije.

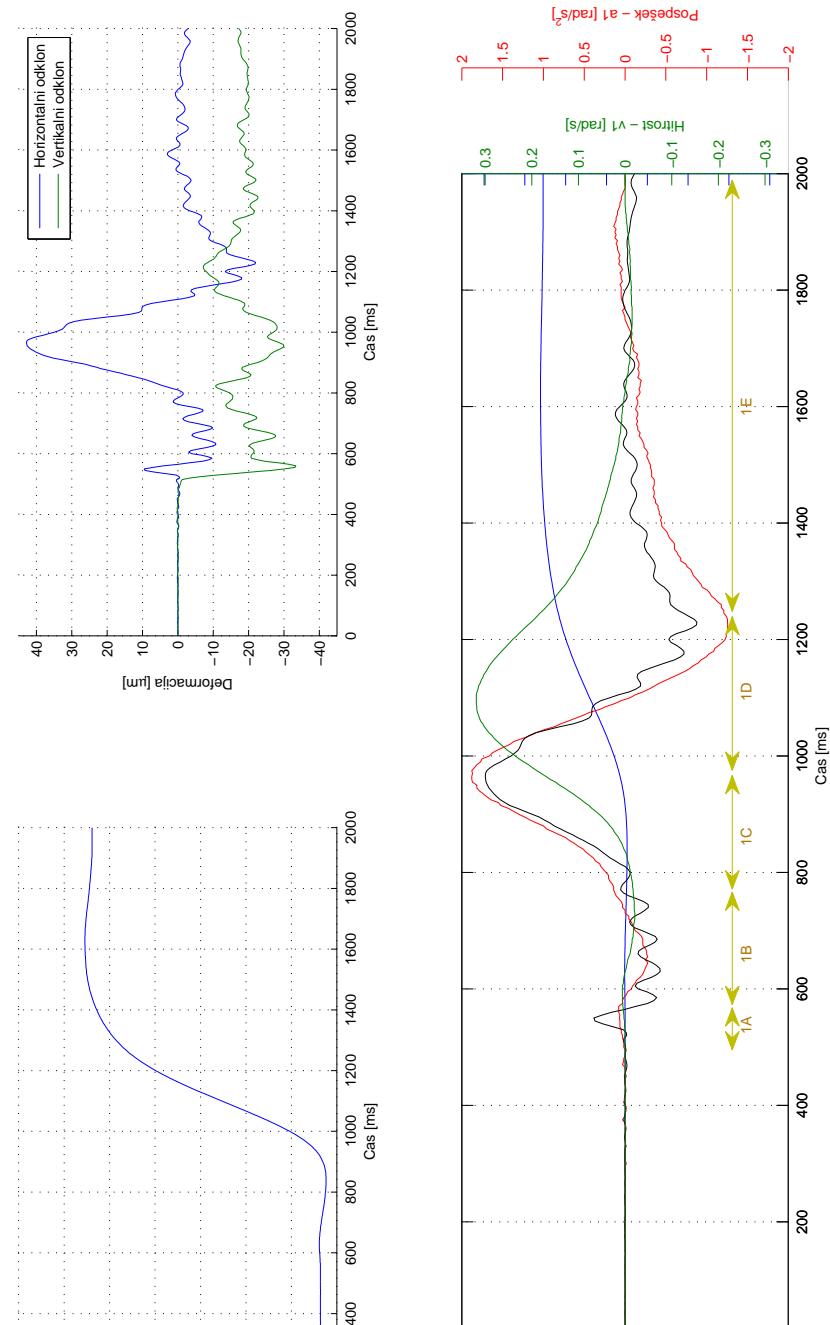
Območje 1E - pojemanje hitrosti z oscilacijami. Opazimo lahko, da je odklon segmenta (in torej tudi sila, ki je bila izvajana na njegov konec) pri pojemanju manjši kot odklon pri pospeševanju. To je posledica trenja v ležaju sklepa, ki seveda deluje v korist pojemka.

V drugem primeru - slika 4.13 - smo izvedli nekoliko počasnejši gib. Spet si natančneje oglejmo časovni potek trajektorije.

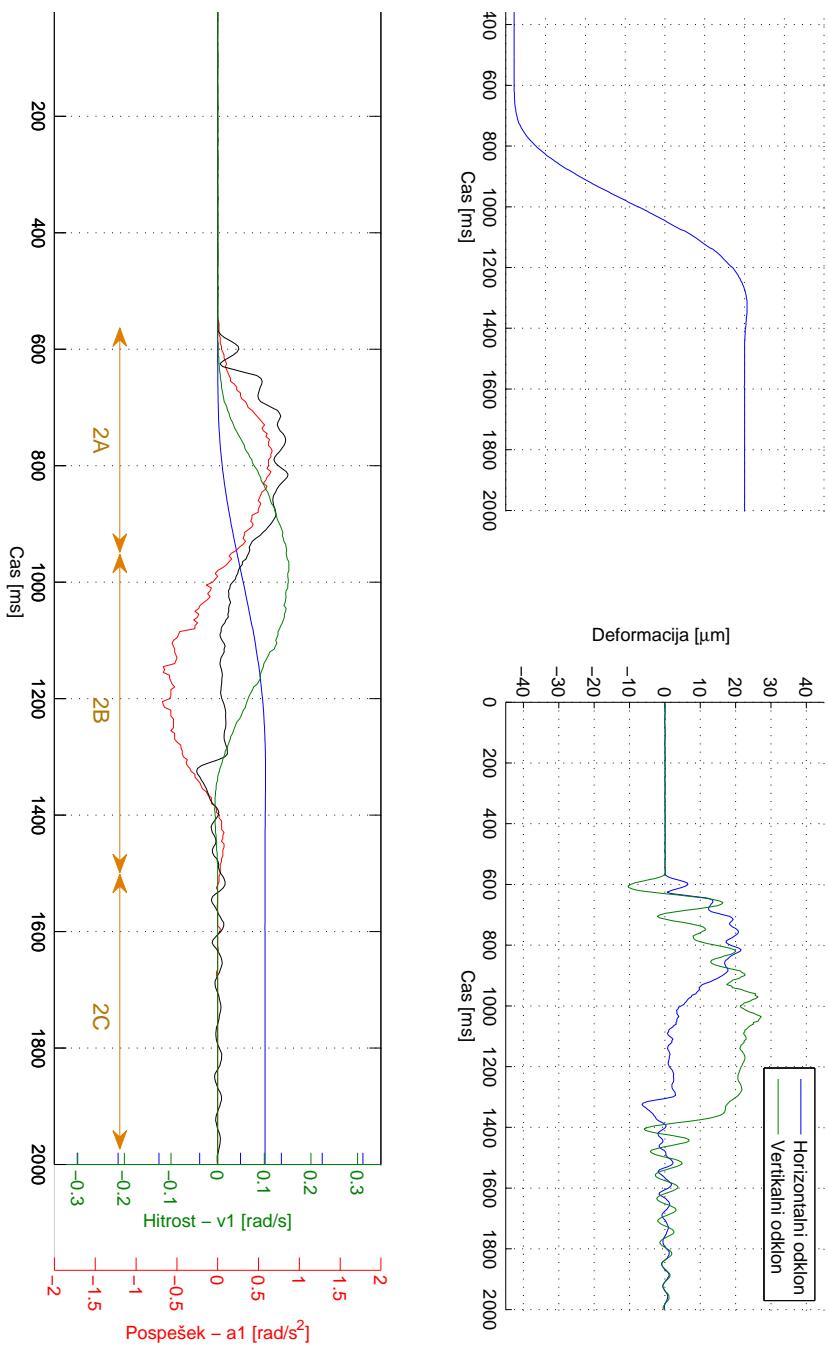
Območje 2A - začetek gibanja tu povzroči manjši sunek kot v prejšnjem primeru; oscilacije pa se ohranijo še do konca giba.

Območje 2B - razlika med silo pri pospeševanju in pojmanju zaradi trenja je tu še očitnejša; k oscilacijam po vsej verjetnosti pripomorejo tudi pojavi v kotalnih ležajih.

Območje 2C - sunek pri ustavitevi in prehod iz trenja v lepenje zopet povzroči oscilacije, ki za iznihanje potrebujejo relativno veliko časa.



Slika 4.12: Dimamična deformacija segmenta pri hitrejšem gibu



Slika 4.13: Dinamična deformacija segmenta pri počasnejšem gibu

4.2.5 Kompenzacija deformacij KMR

Sklepni korak je bil poskus izboljšanja točnosti indikacije pozicije vrha KMR. Ta logični zaključek serije meritev z laserskim sistemom na KMR pa je bil zaradi obsežnosti problema izveden v omejenem obsegu. Za to obstaja več vzrokov:

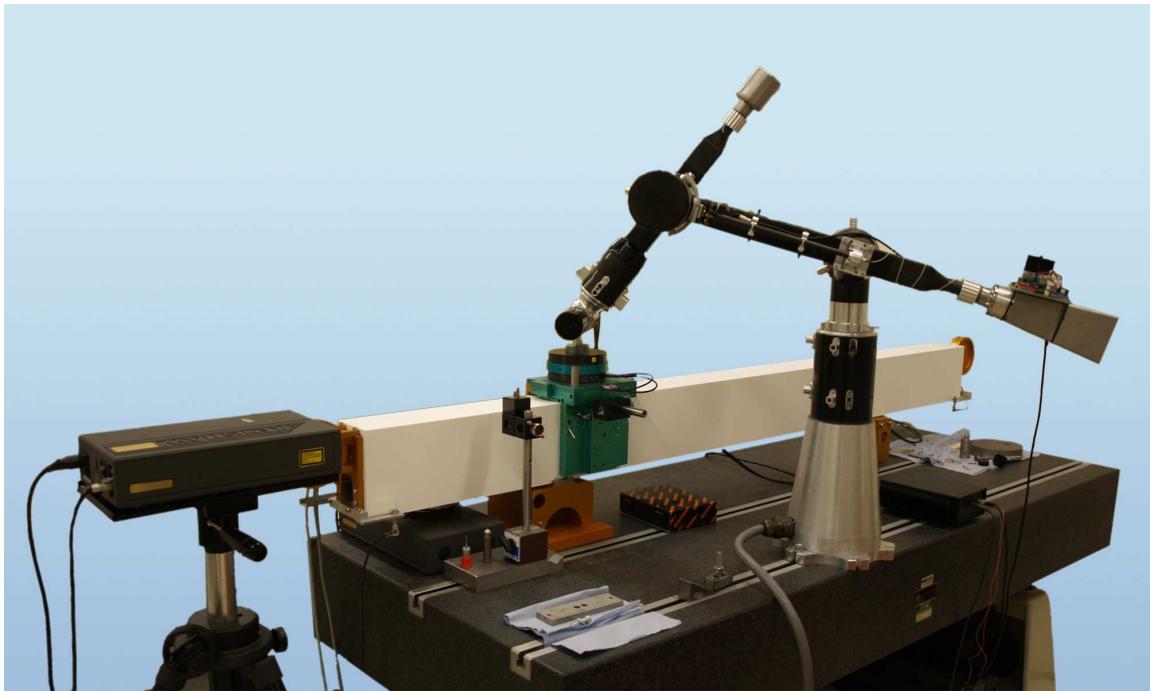
- Dopolnitev matematičnega modela KMR z informacijo v deformaciji, ki bo izboljšala točnost le-tega v razredu nekaj 0.01 mm, že v izhodišču zahteva zelo natančen kinematični model mehanizma. Ta naj bi zajemal vse večje uvodoma opisane prispevke k celotni negotovosti pozicije vrha. Natančno ovrednotenje (kalibracijo) vseh parametrov pa je treba periodično ponavljati, saj ti časovno niso popolnoma nespremenljivi. Tako natančen model za uporabljeni KMR v času meritev ni bil na voljo.
- Edina možnost za zelo natančno kalibracijo kinematičnih parametrov mehanizma je njihova identifikacija s pomočjo množice meritev z znano pozicijo vrha. Kot smo že omenili, je tu težavno predvsem zajemanje 3D pozicije vrha z zahtevano točnostjo okrog 1 μm , ki je izredno težko izvedljivo⁶.
- Da bi bili identificirani parametri kar najbliže realnim, moramo zagotoviti množico meritnih točk, ki zajema čim večji del delovnega prostora KMR, z različnimi legami posameznih sklepov in segmentov. V vseh legah pa le težko zagotovimo natančno merjenje absolutne pozicije vrha⁷.

Poenostavljeni metodni postopek, uporabljeni v tem eksperimentu je tako vključevala že uporabljeno kalibracijsko napravo, s katero smo lahko natančno merili pozicijo vrha, vendar le vzdolž ene same premice. Postavitev KMR in kalibracijske naprave je vidna na sliki 4.14. KMR je bila locirana 300 mm od osi gibanja, točke pa izbrane tako, da smo dosegli največji razpon KMR. Zajeli smo dva niza (A in B) po 40 kalibracijskih točk, pri čemer so se položaji v enem nizu razlikovali od položajev v drugem. V obeh nizih je bila polovica točk zajetih s približevanjem iz pozitivne in polovice iz negativne smeri. Na ta način je prišla do izraza histereza zaradi trenja oz. lepenja v ležajih. Za vsako točko so bila tako znane vrednosti kotov v sklepih KMR, deformacija v prvem segmentu ter relativna pozicija vrha glede na začetno referenčno lego.

S postopkom numerične optimizacije, opisanim v dodatku C, smo nato za oba niza meritev izračunali prilegajoče se parametre kinematičnega modela - glej dodatek

⁶Brezkontaktno merjenje 3D pozicije s takšno točnostjo je s pomočjo znanih meritnih sistemov trenutno nemogoče. Kontaktne metode pa zaradi stika in torej obstoja medsebojnih sil lahko vplivajo na kinematiko KMR.

⁷Referenčni meritni sistem 3D pozicije mora zagotoviti informacijo o poziciji v različnih delih delovnega prostora in v različnih orientacijah KMR.

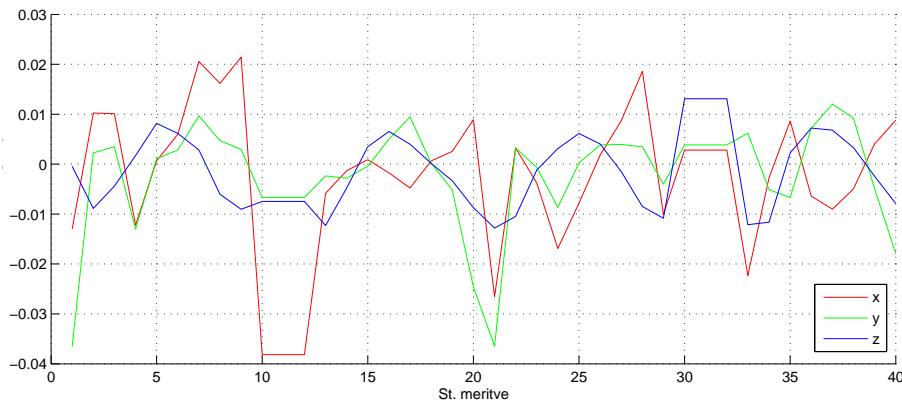


Slika 4.14: KMR in kalibracijska naprava pri zajemanju kalibracijskih točk

B. Ta vsebuje 36 parametrov, od katerih smo optimirali 30 vrednosti. Ker je število kalibracijskih točk večje, bo prileganje kinematičnega modela izmerjenim točkam nepopolno. Residuumi po kalibraciji, t.j. razlika med izračunano ter dejansko pozicijo za prvi niz podatkov so na sliki 4.15. Krivulje nimajo značilne oblike, prav tako ne ustrezajo deformaciji segmenta, kot bi morda pričakovali. Razlog za to je predvsem v omejenem naboru kalibracijskih točk⁸ in posledični prilagoditvi parametrov na način, ki vključuje deformacijo. To je neizogibna posledica optimizacije, negativni vplivi tega pojava pa bi bili očitni pri meritvah v drugem območju delovnega prostora.

Preostale napake v kalibracijskih točkah kljub temu pričajo o sposobnosti modela, da se prilagodi dejanskim razmeram. Očitno je torej, da imajo odstopanja (s povprečno vrednostjo 0.02 mm) izvor v virih negotovosti, ki v modelu niso zajeti (torej deformacije, napake v sklepih in druge). Kinematični model smo nato dopolnili tako, da je vključeval prečna in kotna odstopanja zaradi deformacije v prvem segmentu, ter ponovili optimizacijski postopek. Kinematični model, pridobljen na posameznem nizu meritev, smo nato preizkusili tudi na drugem. Rezultati navzkrižnih preizkusov so v tabeli 4.1 in predstavljajo povprečno 3D napako za posamezen niz meritev. Levi del tabele vsebuje rezultate modela, ki deformacije ne upošteva. Prva vrstica pripada

⁸Nabor kalibracijskih točk bi lahko izboljšali s postavitvijo kalibracijske naprave v različne lege v delovnem prostoru KMR. Vendar bi v tem primeru morali natanko poznati transformacije med posameznimi legami oz. razviti optimizacijski algoritem, ki bi dopuščal poljubne medsebojne lege.



Slika 4.15: Residuumi po optimizaciji kinematičnega modela

naboru parametrov, pridobljenih s nizom meritev A, druga pa tistemu z nizom B. Stolpca podobno označujeta niz podatkov, ki je bil uporabljen za kontrolo, t.j. izračun samih residuumov. Pričakovano je povprečen residuum manjši v desni diagonali tabele, saj je v teh primerih optimizacijski niz enak kontrolnemu (torej primera A-A in B-B).

Desni del tabele pa na podoben način vsebuje rezultate modela z upoštevanjem

Tabela 4.1: Povprečni residuum v kalibracijskih točkah [μm]

Brez upoštevanja deformacije			Z upoštevanjem deformacije			
	Kontrolni niz			Kontrolni niz		
	A	B		A	B	
Optim. niz	A	24,98	25,45	Optim. niz	23,20	21,30
	B	29,90	16,58		26,60	15,85

izmerjene deformacije. Opazimo lahko zmanjšanje residuumov pri vseh kombinacijah kontrolnih in kalibracijskih nizov podatkov. Še posebej vidno je izboljšanje pri podatkih, ki niso bili uporabljeni za optimizacijo (torej primera A-B in B-A), in sicer 11% v enem in 16% v drugem primeru. To je posledica dejstva, da je model, ki upošteva deformacijo, sposoben boljše kompenzacije histereze⁹ ter nekaterih drugih pojavov (denimo deformacije ob bližini singularnosti¹⁰). Te vrednosti kljub temu ne dosegajo prispevkov deformacij k skupni negotovosti, kot smo jih ocenili v 2. poglavju. Razlog je v že omenjenem naboru kalibracijskih točk, ki ne zajema dovolj velikega območja delovnega prostora, zaradi česar so deformacije dovolj kvalitetno zajete že v običajnem kinematičnem modelu. To seveda ne pomeni, da je upoštevanje deformacije (vključno z

⁹Histeresa - razlika med izmerjeno deformacijo pri gibanju v eno ter gibanju v drugo smer - je znašala povprečno 5 μm .

¹⁰4. sklep je pri prehodu točke, ko je KMR pravokotna na kalibracijsko napravo, v singularnosti

gravitacijo) v kinematiki KMR nepotrebno, saj je ponovljivost razmer pri mehanskem vodenju vrha KMR nerealistično visoka, okoliščine, ki so vodile k na ta način optimiranim parametrom, pa se v drugem področju delovnega prostora lahko spremenijo.

5 Laserski sistem za merjenje premosti

Ugodne lastnosti merilnega sistema, opisanega v tretjem poglavju, so nas vzpodbudile, da ga uporabimo tudi za druge vrste meritev. Nekatere od uvodoma opisanih optičnih metod merjenja premosti temeljijo na podobnem principu in od že razvitega sistema terjajo le manjše prilagoditve. Te bodo predvsem omogočale enostavno ravnanje ter neokrnjene zmogljivosti sistema v delavnškem okolju, saj je cilj razvoja v nadaljevanju predstavljenega in analiziranega sistema predvsem možnost takojšnje uporabe na področju industrijske metrologije.

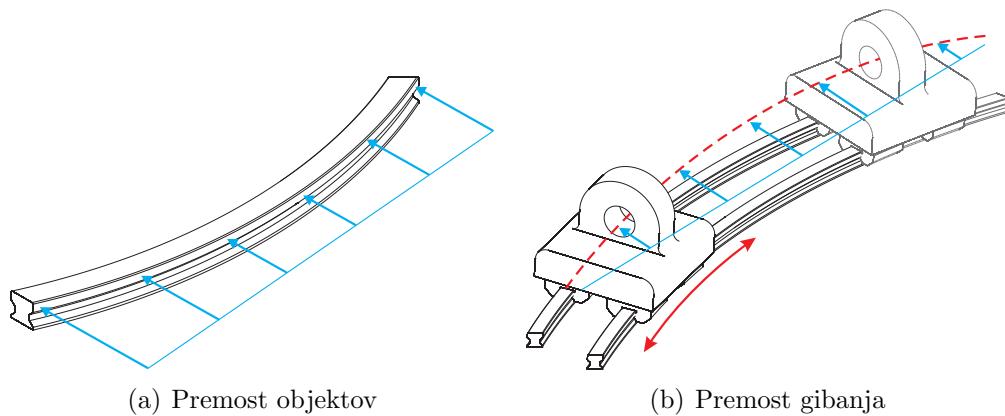
K merjenju premosti sicer pristopamo na dva načina: z merjenjem kotnih odstopanj in kasnejšim izračunom profila premosti oz. z neposrednim merjenjem prečnih odstopanj. Za merjenje kota lahko uporabimo precizen inklinometer, avtokolimator ali laserski interferometer. Za merjenje prečnih odstopanj pa so v uporabi mehanski pripomočki (napeta žica, raven rob), laserski interferometri in uvodoma omenjene optične metode z uporabo fotodetektorjev ali CCD čipov. Medtem ko je laserski interferometer danes najpogosteje uporabljan zaradi neposrednega merjenja z visoko ločljivostjo in linearnostjo, pa je postopek meritve zamuden, saj lahko hkrati merimo le eno prostostno stopnjo odstopanja. Ta problem že rešujejo nekateri komercialni sistemi na osnovi laserskega žarka in kvadrantnih fotodiod, ki pa večinoma ne dosegajo točnosti, ki jo zahtevamo pri najbolj preciznih aplikacijah. Pogosto jih pesti tudi nezadostna časovna stabilnost meritve ter nenazadnje tudi visoka cena.

5.1 Princip delovanja

Ko govorimo o premosti, ločimo dva splošna koncepta [38]:

- premost objektov oz. posameznih mehanskih delov (npr. vodil obdelovalnega stroja)
 - slika 5.1(a);
- premost gibanja (npr. sani, ki se gibljejo po vodilih) - slika 5.1(b).

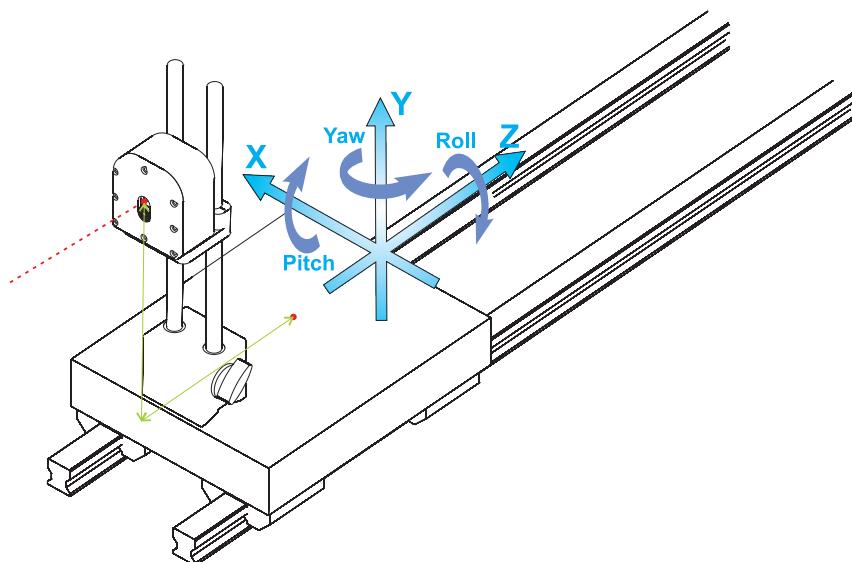
Osnovni princip meritve je v obeh primerih enak - v različnih točkah vzdolž merjenca oz. njegove poti merimo prečni odmik od referenčne, popolnoma ravne črte. Vendar pa so



Slika 5.1: Dve vrsti premosti

razmere v drugem primeru malce bolj zapletene, zato si jih poglejmo podrobneje.

Linearna stopnja kot del poljubnega mehanskega sistema naj bi se teoretično gibala vzdolž določene premice. Odstopanja od te lahko opišemo s petimi prostostnimi stopnjami. Če predpostavimo gibanje vzdolž Z-osi koordinatnega sistema (glej sliko 5.2) so to napake premosti (prečni premiki) v X- in Y-smeri ter kotna odstopanja okrog osi X, Y in Z - koti "pitch", "yaw" in "roll". Pri tem se moramo zavedati prečnih odstopanj, ki jih povzročajo kotne napake zaradi oddaljenosti točke, kjer se nahaja merilna naprava, od točke vodenja stopnje. V primeru na sliki 5.2 je ta pojav, znan kot Abbejeva napaka, izrazit predvsem za "roll" kot. Za popolno interpretacijo je torej potreben sistem za hkratno merjenje vseh petih prostostnih stopenj odstopanj. V praksi pa največkrat,



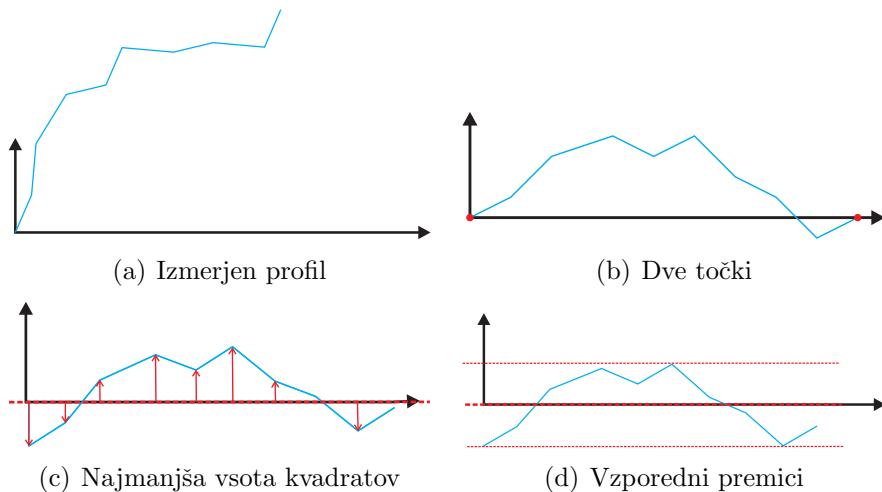
Slika 5.2: Linearna stopnja

predvsem pri ocenjevanju zmogljivosti naprav, zadošča, če izmerimo skupno napako prečnih odstopanj v točki, ki ima funkcionalen pomen (npr. točka vpetja orodja na obdelovalnem stroju).

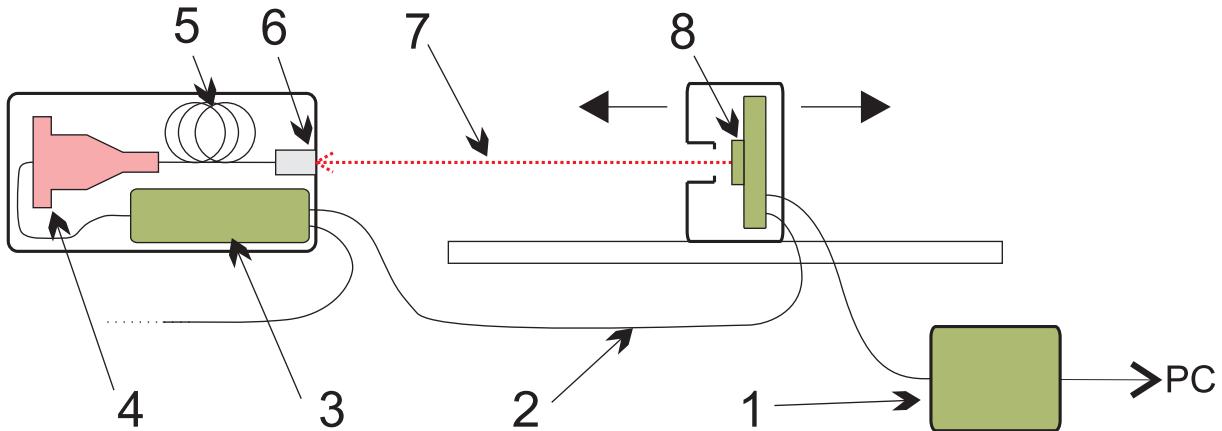
Razviti laserski merilni sistem nam slednje že omogoča. Laserski vir je nepremičen in postavljen tako, da je referenčni žarek vzporeden z gibanjem linearne stopnje. Premični detektorski del je togo pritrjen v primerni točki na premični stopnji in zaznava prečne odmike od referenčnega žarka. Meritev je praviloma statična in se izvaja v končnem številu točk vzdolž merilne osi.

Ker je natačna poravnava referenčnega žarka z gibanjem premične stopnje (ki seveda tudi ni popolnoma premo) največkrat nepraktična ali celo nemogoča, je potrebna kasnejša računska prilagoditev merilnih rezultatov. Tu so mogoča različna tolmačenja rezultatov, razlike med njimi pa pridejo do izraza predvsem pri primerjavi več meritev. V uporabi so tri različne možnosti:

- rotacija in translacija izmerjenega profila ravnosti na tak način, da bosta dve izbrani točki (običajno prva in zadnja) imeli ničelni odklon - slika 5.3(b);
- izmerjeni profil premaknemo tako, da se regresijska premica, vrisana po metodi najmanjše vsote kvadratov, ujema s horizontalno osjo grafa - slika 5.3(c);
- v izmerjeni profil vrišemo dve vzporedni premici tako, da je njuna razdalja kar najmanjša. Nato profil premaknemo, da se njuna simetrala ujema s horizontalno



Slika 5.3: Različne metode poravnave izmerjenega profila premosti



Slika 5.4: Zgradba sistema za merjenje premosti: 1 - glavna enota, 2 - digitalno vodilo, 3 - vezje za krmiljenje in nadzor laserske diode, 4 - laserska dioda, 5 - enorodovno optično vlakno, 6 - kolimacijska optika, 7 - referenčni žarek, 8 - detektorsko vezje

osjo - slika 5.3(d).

5.2 Zgradba merilnega sistema

Bistveni sestavni deli sistema so enaki tistim v sistemu za merjenje deformacij in jih vidimo na sliki 5.4. Vsi elementi laserskega vira so tokrat vsebovani v enotnem masivnem ohišju iz aluminija (slika 5.5(a)). Da bi dosegli čim bolj kompaktne mere ohišja smo na novo razvili elektronska vezja za nadzor laserske fotodiode. Tudi ohišje detektorja je izdelano iz rezkanega aluminija in vsebuje že opisano detektorsko vezje. Zaslonka na ohišju ščiti notranjost pred prahom in umazanijo ter hkrati rabi kot tarča za grobo poravnnavno žarka (slika 5.5(b)).

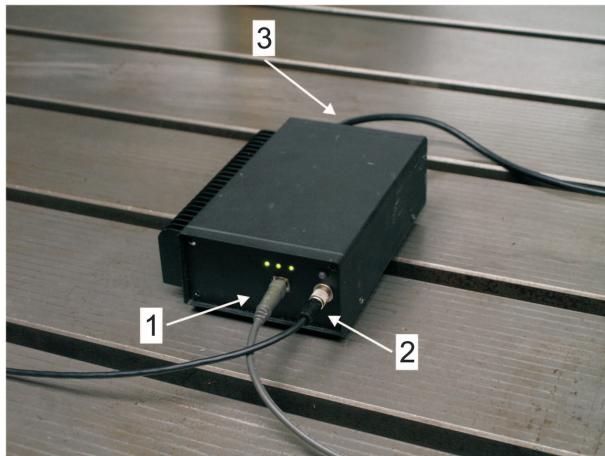


(a) Laserski vir



(b) Detektor

Slika 5.5: Izdelana gradnica sistema za merjenje premosti



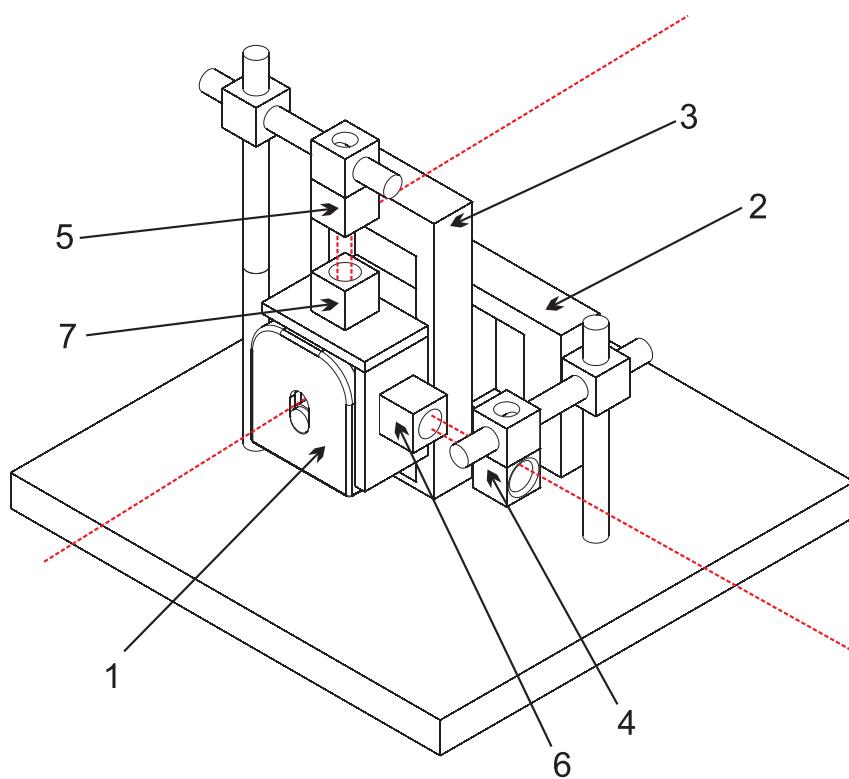
Slika 5.6: Glavna enota: 1 - USB povezava, 2 - povezava z merilnimi enotami, 3 - napajanje 220 V

Ključno merilo pri načrtovanju celotnega sistema je bilo zagotoviti kar največjo stabilnost sistema. Pri tem so najpomembnejše termične razmere v laserskem pa tudi detektorskem delu. Te določajo tako notranji (elektronika) kot zunanji (okoliški zrak) vplivi. Za kar največjo neodvisnost od le-teh je bila potrebna velika pazljivost pri določanju točk za pritrdiritev ključnih elementov (diode, detektorja) in zagotavljanje homogenosti temperturnih sprememb. Pri merilnih razdaljah okrog enega metra bi namreč že interni odkloni reda $0.1 \mu\text{m}$ povzročili moteče spremembe položaja žarka na detektorju.

Tudi glavna enota (slika 5.6) je bila prilagojena za bolj praktično uporabo in združuje napajanje z omrežno napetostjo, nadzor merilnih komponent in komunikacijo s PC-jem. Na eni strani tako zagotavlja povezovanje preko USB priključka, na drugi pa preko internega vodila z merilnimi komponentami, ki jih kaskadno povezujemo na poljuben način. Sistem se da znova poljubno razširiti, saj omogoča hkratno uporabo večjega števila detektorjev in/ali laserskih virov, kolikor merilna konfiguracija to zahteva.

5.3 Eksperimenti

Pri načrtovanju eksperimentov smo predvsem upoštevali dejstvo, da bo majhna divergenca laserskega žarka povzročila različno občutljivost sistema pri različnih razdaljah. Pričakujemo lahko sicer linearno upadanje občutljivosti, za natančno ovrednotenje pa je treba sistem kalibrirati pri različnih oddaljenostih. Pomemben vidik uporabe je tudi pojav zračnih turbulenc, ki jim je laserski žarek podvržen na svoji poti v odprttem prostoru, zato podrobneje analiziramo tudi njihov vpliv.

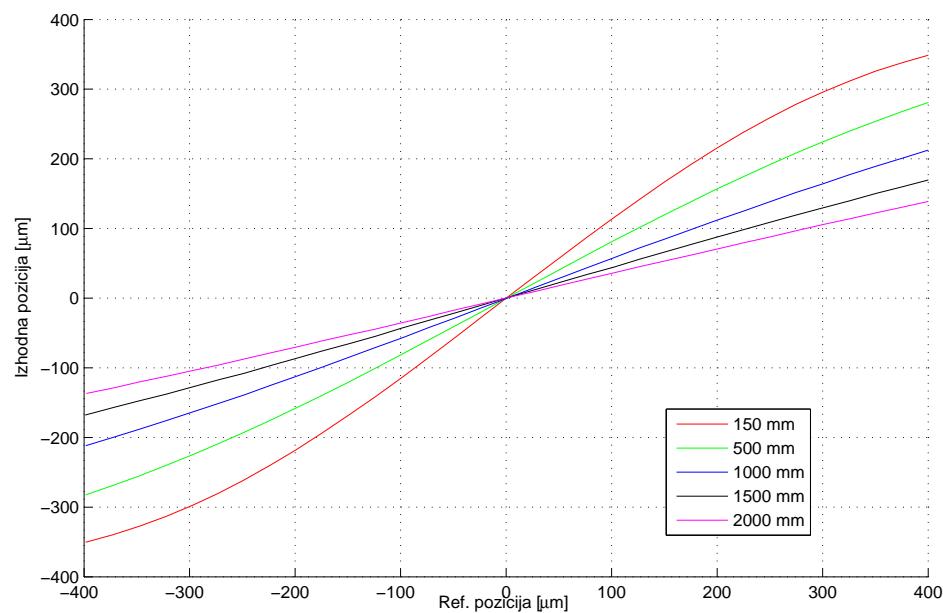


Slika 5.7: Kalibracijska postavitev sistema: 1 - detektor, 2 in 3 - X in Y mikropozicionirnika, 4 in 5 - X in Y interferometra, 6 in 7 - X in Y retroreflektorja

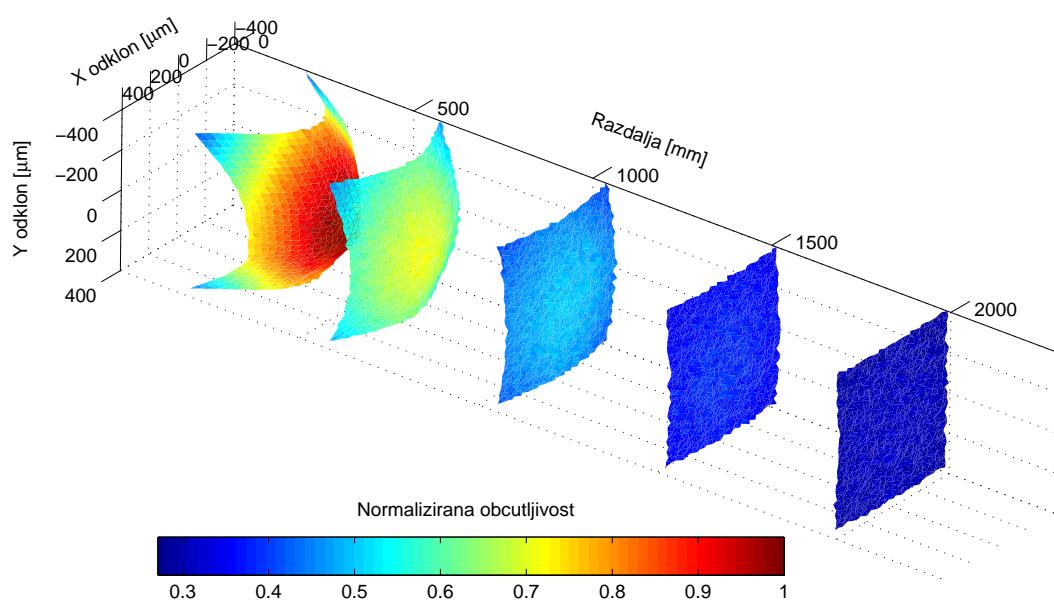
5.3.1 Kalibracijske meritve

Osnovni koncept kalibracijskih meritve je podoben tistemu iz tretjega poglavja in je prikazan na sliki 5.7. Za premikanje detektorja smo znova uporabili dve mikropozicionirni stopnji v XY postavitvi, za meritve dejanskih odmikov pa dva laserska interferometra (Renishaw ML-10 in Heidenhain ILM-1131). Detektor in interferometrska optika sta bila pritrjena na skupno jekleno ploščo, ta pa je bila postavljena na masivno granitno mizo. Na isto mizo je bilo mogoče postaviti laserski vir pri vnaprej določenih razdaljah od detektorja. Poizkusni so bili zopet opravljeni v klimatski komori pri temperaturi $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$.

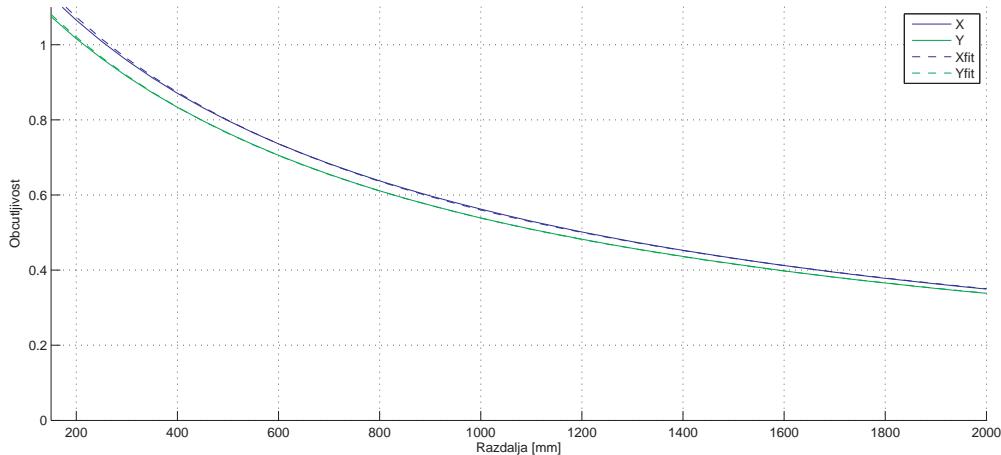
Vse kalibracijske meritve smo opravili pri petih različnih razdaljah: 150 mm, 500 mm, 1000 mm, 1500 mm in 2000 mm. Najprej smo posneli 2D-odzive detektorja na območju $\pm 400 \mu\text{m}$ s korakom $25 \mu\text{m}$ v obeh dimenzijah. Na sliki 5.8 je prikazan odziv detektorja pri prehodu X-osi skozi merilno območje (podobnega bi dobili tudi za Y-os), na sliki 5.9



Slika 5.8: Odziv detektorja v X-osi v odvisnosti od odmika



Slika 5.9: Občutljivost detektorja v odvisnosti od X-odmika, Y-odmika ter razdalje od laserskega vira



Slika 5.10: Občutljivost detektorja pri ničelnem prečnem odmiku v odvisnosti od razdalje od laserskega vira

pa normalizirana občutljivost¹ detektorja v odvisnosti od X in Y prečnega odmika ter od razdalje od laserskega vira. V obeh primerih je viden padec občutljivosti na približno tretjino maksimalne vrednosti, kar pa nima velikega vpliva na končno točnost, saj ima sistem dovolj visoko ločljivost (glej poglavje 3).

Pridobljeni podatki so bili tako uporabljeni za kalibracijo pri omenjenih razdaljah. Za izračun dejanskega odziva pri poljubni razdalji laser - detektor bomo uporabili linearno interpolacijo rezultatov v dveh sosednjih kalibracijskih razdaljah. Ponuja pa se nam tudi druga možnost. Vemo namreč, da je padanje občutljivosti posledica divergence žarka, iz česar sledi, da velja linearno razmerje med oddaljenostjo in dejanskim odmikom detektorja pri danem odzivu le-tega. Občutljivost je torej obratno sorazmerna z oddaljenostjo, kar je vidno z grafa na sliki 5.10 (polni črti). Prenosno funkcijo lahko tako poenostavimo s polinomom prvega reda, katerega koeficiente izračunamo z minimiziranjem vsote kvadratov v kalibracijskih razdaljah. Na takšen način izračunan odziv (črtkani črti na sliki 5.10) se s prvotnim ujema s približno 1-odstotnim odstopanjem, ki je po vsej verjetnosti posledica razpršene svetlobe. Metoda je torej primerna za manj natančne meritve, vendar ima pomembno prednost - možnost ekstrapolacije kalibracijskih podatkov na razdalje izven kalibriranega območja.

¹Občutljivost tu definiramo kot odvod izhodne pozicije detektorja po dejanski poziciji.

5.3.2 Analiza vpliva zračnih turbulenc

Kot smo že poudarili, imajo dominanten vpliv na kvaliteto meritve te (in podobnih) merilnih naprav atmosferske razmere na poti laserskega žarka [37]. Nujno je torej podrobneje raziskati vpliv tega fenomena na merilne rezultate. Kot je znano, gibanje zračnih mas² skozi pot žarka povzroči naključne oscilacije njegove oblike in seveda lege njegove končne projekcije. Te so močno odvisne od razmer v zraku in se z dolžino žarka vedno povečujejo. Dve pogosti rešitvi tega problema sta stabilizacija atmosfere okrog žarka - zagotavljanje mirnih razmer in temperaturne stabilnosti - ali pa močno mešanje zraka vzdolž njegove poti³, obakrat v kombinaciji s časovnim povprečenjem signalov v primernem intervalu.

Sami smo uporabili prvo možnost, torej zagotavljanja relativno mirnih razmer okoliškega zraka. Z nepremičnim detektorjem smo izmerili 2000 vzorcev s frekvenco 1 Hz pri različnih razdaljah. Izmerjene deviacije od povprečne vrednosti so tako posledica zračnih turbulenc kot tudi drugih naključnih napak merilnega sistema, vendar so prve prevladujoče⁴. Statistična porazdelitev odklonov pri posameznih razdaljah je prikazana na sliki 5.11. Vrisane krivulje predstavljajo ustrezone Gaussove porazdelitve in opazimo lahko, da je porazdelitev vzorcev zelo blizu normalni in da z večanjem razdalje deviacije po pričakovanju monotono naraščajo. Na zgornjem grafu slike 5.12 tako vidimo vrednost standardne deviacije vzorcev v odvisnosti od razdalje, ki nakazuje približno linearno naraščanje.

V zvezi z gornjimi rezultati je na mestu tudi obratno vprašanje: Koliko vzorcev je treba zajeti, da bo pri določeni razdalji standardna deviacija rezultata znotraj določenih mej? Ne glede na dejansko porazdelitev vzorcev konkretne meritve nam centralni limitni izrek zagotavlja, da čim več vzorcev uporabimo za izračun povprečne vrednosti, tem bliže bo porazdelitev povprečja standardizirani normalni porazdelitvi. Za merilni rezultat, t. j. povprečje vzorcev, lahko torej izračunamo interval zaupanja za določeno število vzorcev in nasprotno, za želeni interval zaupanja izračunamo potrebno

²Vzrok pojava je različen lomni količnik zraka pri različnih temperaturah. Lom svetlobe pri prehodu zračnih žepov z različnimi temperaturami preko poti žarka tako povzroči njegov odklon.

³S tem se zračnim turbulencam seveda ne izognemo, vendar olajša časovno povprečenje signalov. Z mešanjem zraka pa tudi zagotovimo enake razmere na vsej poti žarka - temperaturni gradient vzdolž smeri merjenja (pa četudi časovno nespremenljiv) lahko namreč povzroči ukrivljenost žarka z neposrednimi posledicami za meritve.

⁴V skladu z meritvami iz poglavja 3.

število vzorcev. Ustrezni enačbi se glasita [40]

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

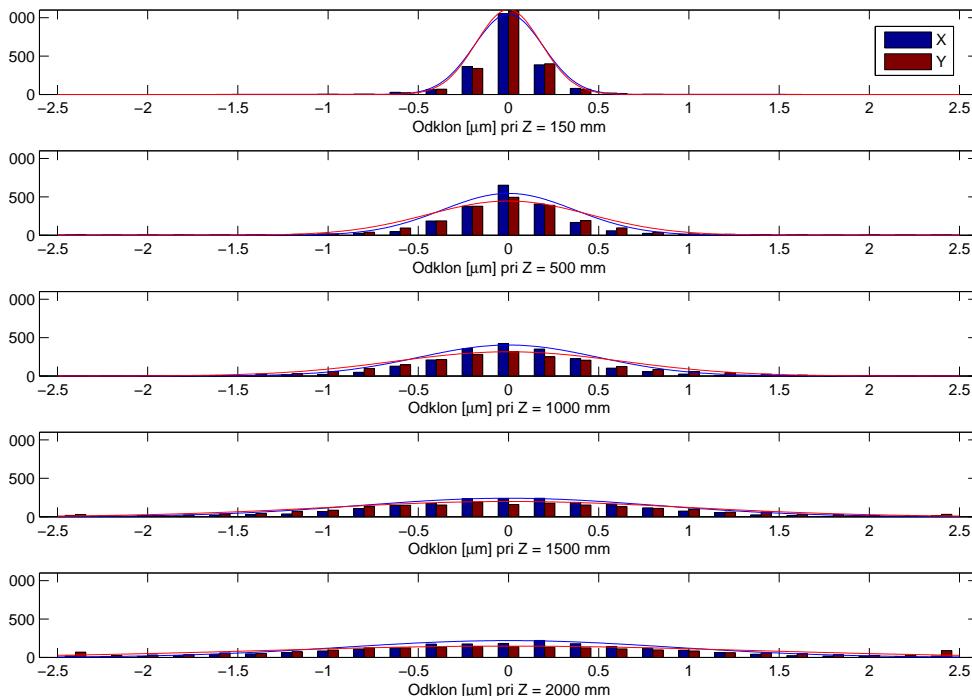
in

$$n = \left(\frac{\sigma}{\sigma_d} \right)^2, \quad (5.2)$$

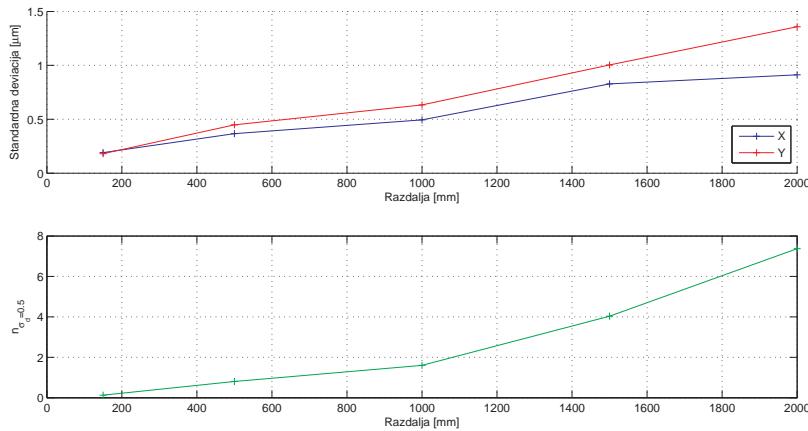
kjer je n število vzorcev, σ standardna deviacija vzorcev in σ_d standardna deviacija povprečja. Da bo prispevek naključnih odstopanj s 95-odstotno gotovostjo ($\pm 2\sigma$) manjši od pričakovane točnosti samega sistema⁵, moramo izbrati $\sigma_d = 0.5 \mu m$. Ta primer ilustrira spodnji graf na sliki 5.12, ki kaže potrebno število vzorcev za dani interval zaupanja. Če uporabimo nasprotno odvisnost, pa lahko ugotovimo, da bo ob konstantnem številu vzorcev (n) standardna deviacija $\sigma_{\bar{X}}$ z razdaljo z naraščala s približnim naklonom

$$\frac{\sigma_{\bar{X}}}{z} \approx \frac{0.6}{\sqrt{n}} \mu m/m. \quad (5.3)$$

⁵Na katero glede na podobno zgradbo sistema sklepamo iz meritev v tretjem poglavju.



Slika 5.11: Statistična porazdelitev odstopanj meritev pri različnih razdaljah laser - detektor



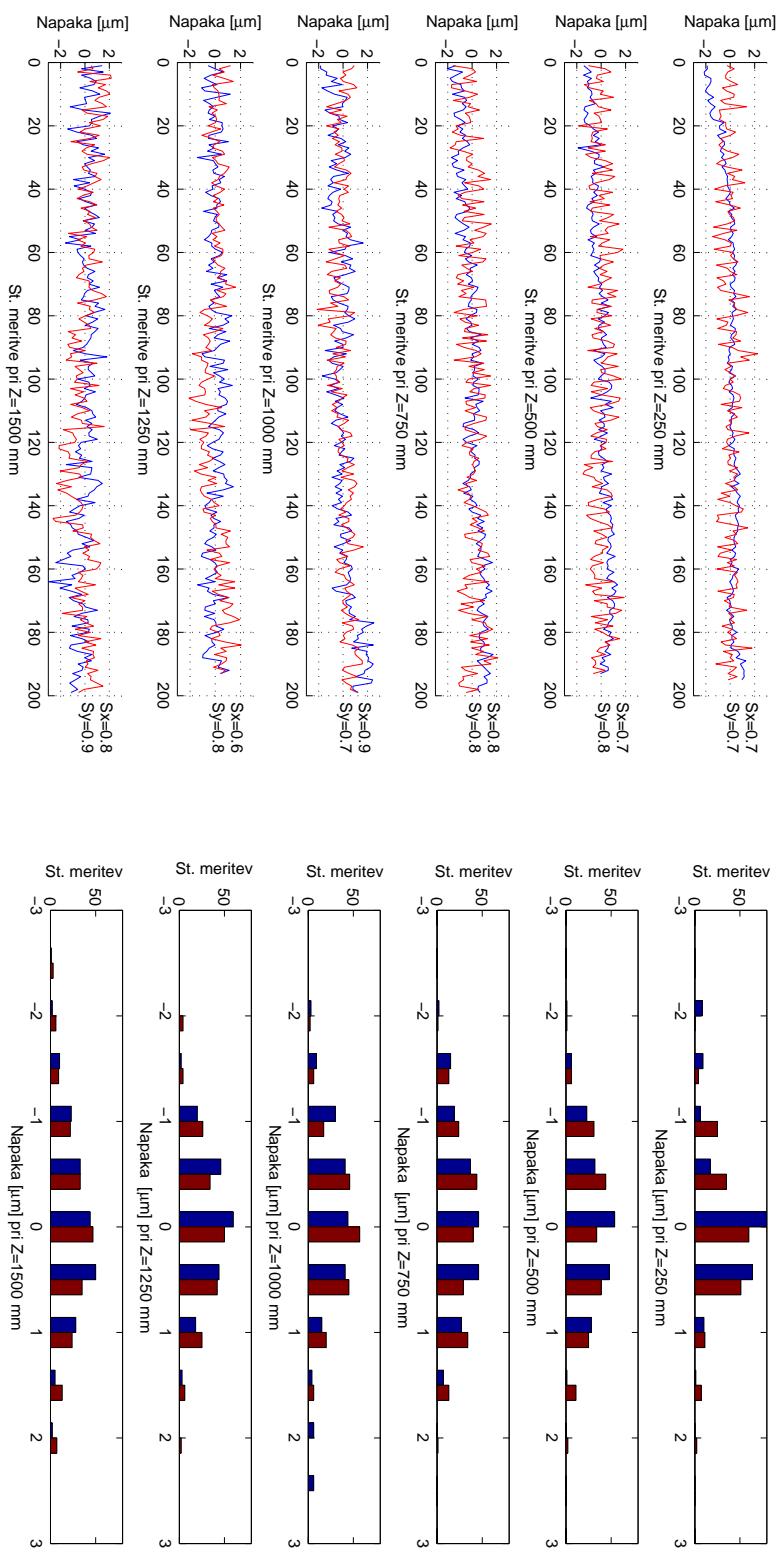
Slika 5.12: Standardna deviacija in število vzorcev, potrebnih za $\sigma_d=0.5$, v odvisnosti od razdalje

Podane vrednosti seveda veljajo za meritve v opisanih razmerah, vendar ni ovir za upoštevanje teh odvisnosti v realnem času posamezne meritve in torej njenega sprotnega prilagajanja v skladu z razmerami v okolini.

5.3.3 Verifikacija kalibracije

Da bi preverili kvaliteto kalibracijskega postopka, smo detektor pozicionirali v 200 naključno izbranih leg, enakomerno porazdeljenih po njegovem merilnem območju. V vsakem položaju smo izmerili osem vzorcev s frekvenco 1 Hz, meritve pa izvedli pri šestih različnih oddaljenostih detektorja: pri 25 cm, 50 cm, 75 cm, 1 m, 1,25 m in 1,5 m. Položaj smo izračunali s pomočjo 3D-interpolacije kalibracijsih podatkov in jih primerjali z referenčnimi meritvami interferometrov.

Rezultate, t. j. preostale napake, prikazuje slika 5.13(a), vključno s pripadajočimi standardnimi deviacijami za posamezni merilni osi; na sliki 5.13(b) pa so pripadajoče statistične distribucije napak. Opazno je rahlo povečanje deviacije v skladu z ugotovitvami iz odseka 5.3.2. Kljub temu je pri vseh oddaljenostih absolutno odstopanje manjše od $\pm 2 \mu m$. Prav tako lahko opazimo, da na rezultate ne vpliva oddaljenost od kalibracijskih razdalj laser - detektor.



Slika 5.13: Verifikacijske meritve - S_x in S_y na grafih označuje standardno deviacijo za os X in Y pri posamezni oddaljenosti.

(a) Preostale napake v merilnih legah

(b) Statistična distribucija napak

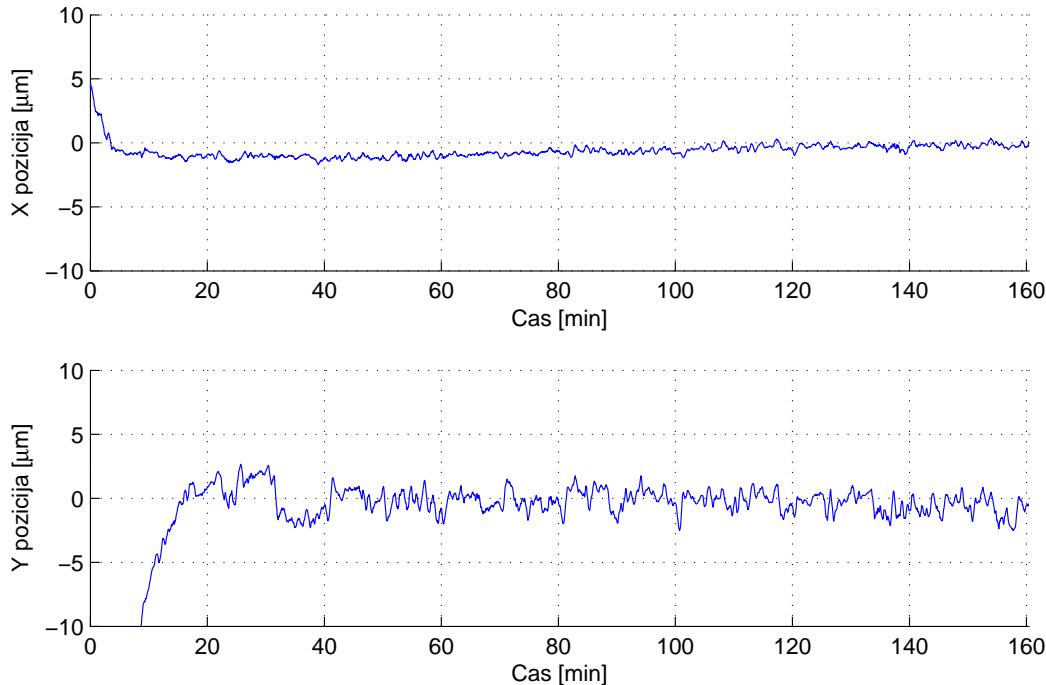
5.3.4 Lezenje

Glede na ciljne obratovalne pogoje naprave smo meritve časovnega lezenja tokrat izvajali v neklimatiziranem industrijskem okolju. Laserski vir in detektor sta bila postavljena na granitni mizi, meritev pa je trajala 3 ure (slika 5.14). Po začetnem stabilizacijskem obdobju približno 20 minut je bilo pozicijsko lezenje znotraj $\pm 1 \mu\text{m}$ za X os ter $\pm 2 \mu\text{m}$ za os Y. Večji odkloni v osi Y so posledica zunanjih termičnih nihanj, ki povzročajo raztezanje v gradnikih merilnega sistema in podlogah. Lezenje je v teh mejah tudi v daljših časovnih obodbjih.

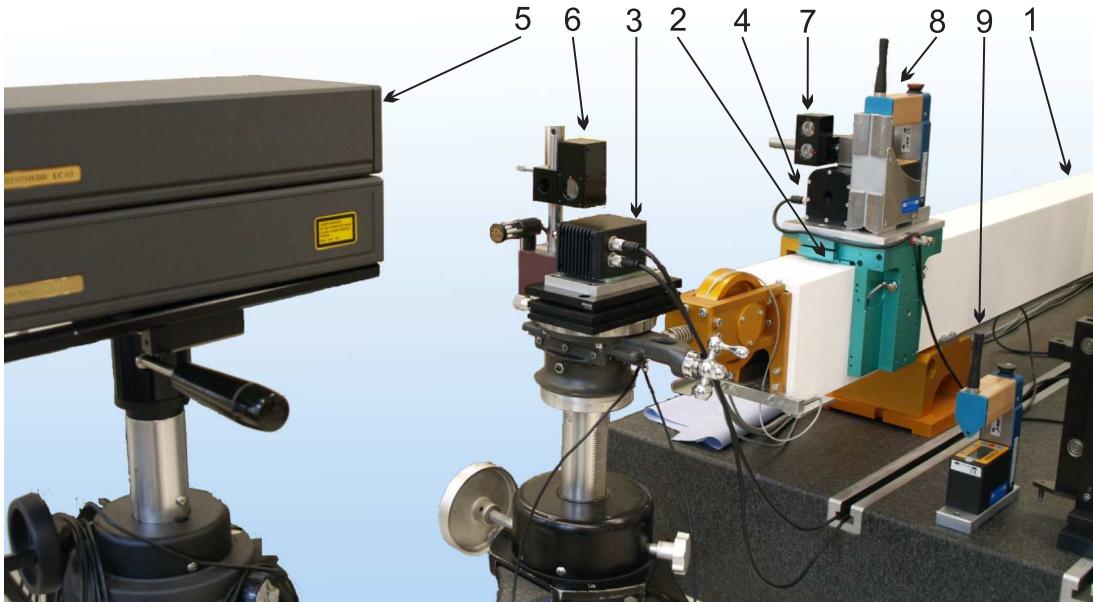
5.3.5 Primerjalne meritve

Za kar najbolj verodostojno končno preveritev lastnosti sistema smo se ga odločili neposredno primerjati z uveljavljenimi merilnimi sistemi, ki na tem področju predstavljajo ustaljeno prakso. Merjeni objekt je bila precizna linearna stopnja [4]; natančno izdelan keramični nosilec in zračno-vakuumski ležaj sani bosta zagotovljala visoko ponovljivost meritve tudi pri zelo majhnih izmerjenih odstopanjih od premosti⁶.

⁶Predhodne meritve na uporabljeni napravi kažejo na zelo majhna odstopanja od premosti ($\pm 4 \mu\text{m}$). To pa ne pomeni, da pri preizkušanem novem merilnem sistemu pride do izraza le točnost v ozkem predelu merilnega območja. Natančnost fizične poravnave (paralelnosti) referenčnega žarka z nosilcem je



Slika 5.14: Lezenja sistema v nekontroliranem okolju



Slika 5.15: Postavitev prvega primerjalnega preizkusa: 1 - keramični nosilec, 2 - sani, 3 - laserska enota, 4 - detektorska enota, 5 - laserski interferometer Renishaw, 6 - delilnik žarka interferometra, 7 - retroreflektor interferometra, 8 - elektronski inklinometer, merilna enota, 9 - elektronski inklinometer, referenčna enota

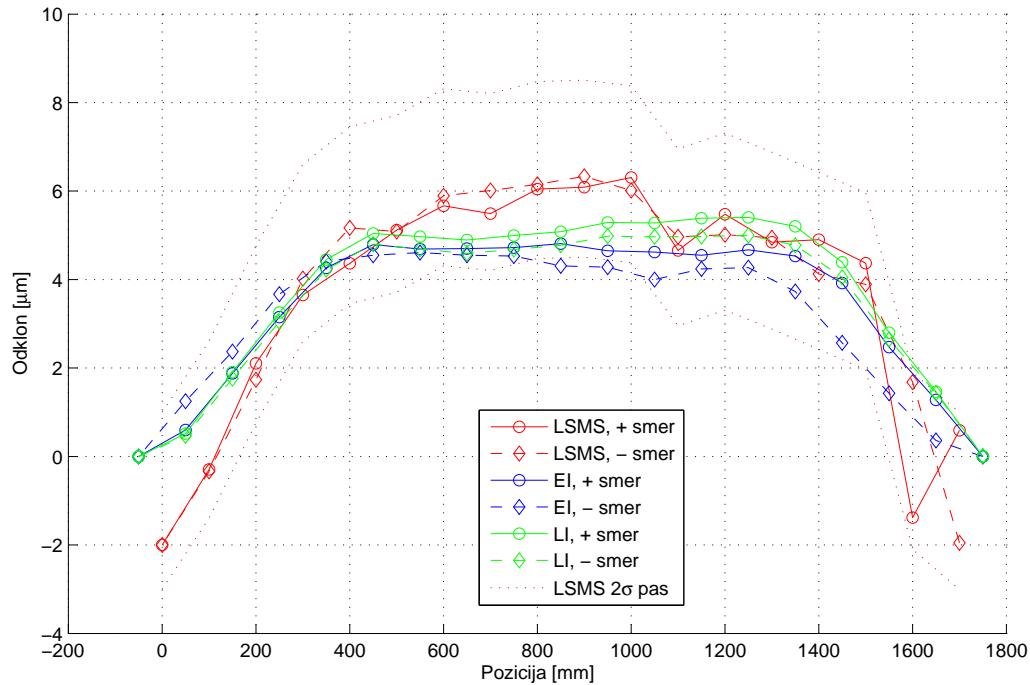
V prvem preizkusu (postavitev je prikazana na sliki 5.15) smo uporabili laserski interferometer Renishaw ML-10 z optiko za merjenje kota ter elektronski inklinometer Wyler Minilevel NT. Reflektor interferometra, inklinometer ter detektor novega merilnega sistema smo skupaj pritrudili na sani, laserski vir merilnega sistema in delilnik žarka interferometra pa sta bila nameščena na robustnem stativu⁷. Sani smo nato premikali po območju 1700 mm v inkrementih po 100 mm ter hkrati zajemali meritve vertikalnih odstopanj iz vseh treh sistemov. Pri tem smo meritve povprečili z 10-sekundnim oknom. Meritev smo ponovili tudi v obratni smeri.

Ker sta referenčna sistema merila odklane vertikalnega kota, je treba le-te z integracijo pretvoriti v prečna odstopanja⁸. Tako pridobljene profile premosti smo nato v

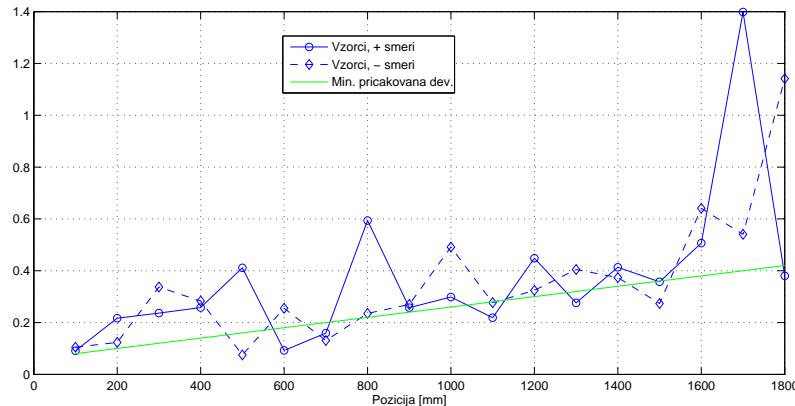
zaradi njegove dolžine namreč reda 0.1 - 0.2 mm. Poravnava je, kot smo že omenili, izvedena s kasnejšo transformacijo meritev; absolutne vrednosti odstopanj surovih meritev pa so v tem primeru za faktor 100 večje od končnih rezultatov.

⁷Pri tem bi kakršnekoli motnje, ki bi jih lahko povzročili premiki ali vibracije stativa, enako vplivale na rezultate sistema za merjenje premosti in laserskega interferometra, medtem ko so meritve elektronskega inklinometra neodvisne.

⁸To je eden od pristopov k merjenju premosti v skladu z ISO-230 (1. Del) [38], ki vsekakor ni optimalen in v večini primerov ni priporočljiv. V našem primeru pa zgradba linearne stopnje omogoča, da sani z veliko natančnostjo ter ponovljivostjo sledijo oblike vodilega keramičnega nosilca. To je bilo potrjeno



Slika 5.16: Vertikalni profil premosti, izmerjen z novim laserskim sistemom (LSMS), interferometrom (LI) in elektronskim inklinometrom (EI)



Slika 5.17: Standardna deviacija vzorcev v posamezni poziciji

skladu z ISO-230 translirali in rotirali v lego z najboljšim ujemanjem - slika 5.16. Graf kaže na relativno dobro ujemanje meritev. Če upoštevamo v odseku 5.3.3 ugotovljeno vrednost standardne deviacije in nanj vrišemo $\pm 2\sigma$ pas ($2\sigma \approx 2\mu\text{m}$), je očitno, da je meritev konsistentna tudi v tem smislu. Ne glede na to lahko za nekaj točk rečemo, da

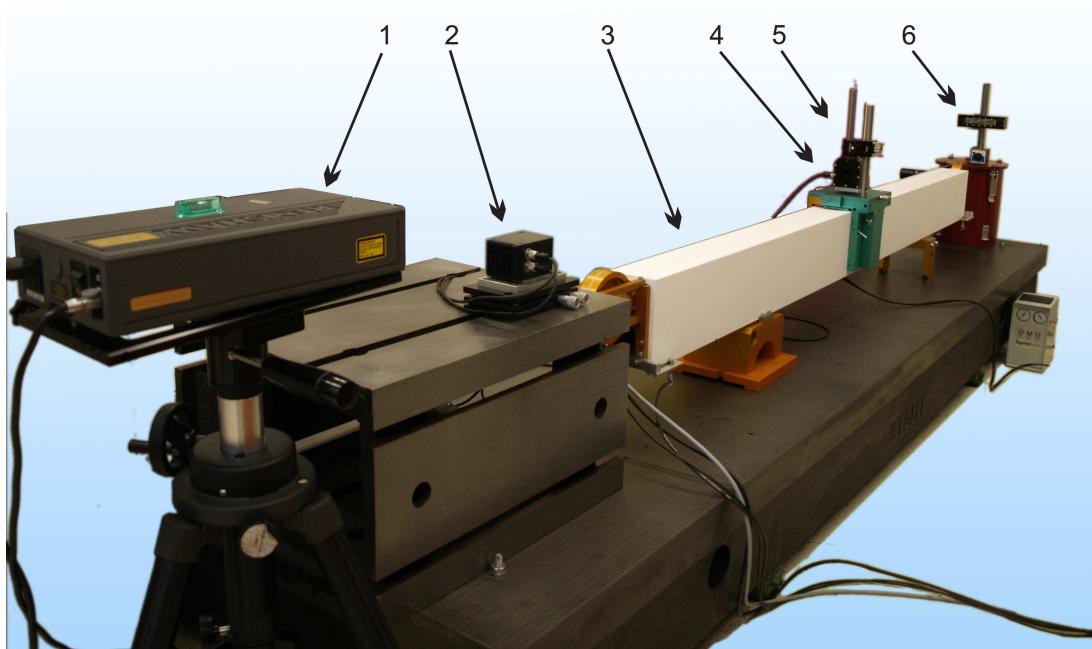
s predhodnimi meritvami, ki so pokazale, da se premost samega nosilca zelo dobro ujema s premostjo gibanja sani.

očitno odstopajo od referenčnih meritev. Z analizo surovih (nefiltriranih) podatkov iz merilnega sistema lahko določimo standardno deviacijo izmerjenih vzorcev v posamezni merilni poziciji. Na sliki 5.17 tako vidimo stalno povečevanje šuma zaradi zračnih turbulenc (zelena črta prikazuje minimalno pričakovano vrednost standardne deviacije za razmere mirnega ozračja v skladu s enačbo 5.3). Dva očitna maksimuma se ravno ujemata z deviantnimi točkami v profilu premosti. Sklepamo torej lahko, da so večje napake posledica zračnih turbulenc, ki jih je po vsej verjetnosti povzročilo človeško gibanje.

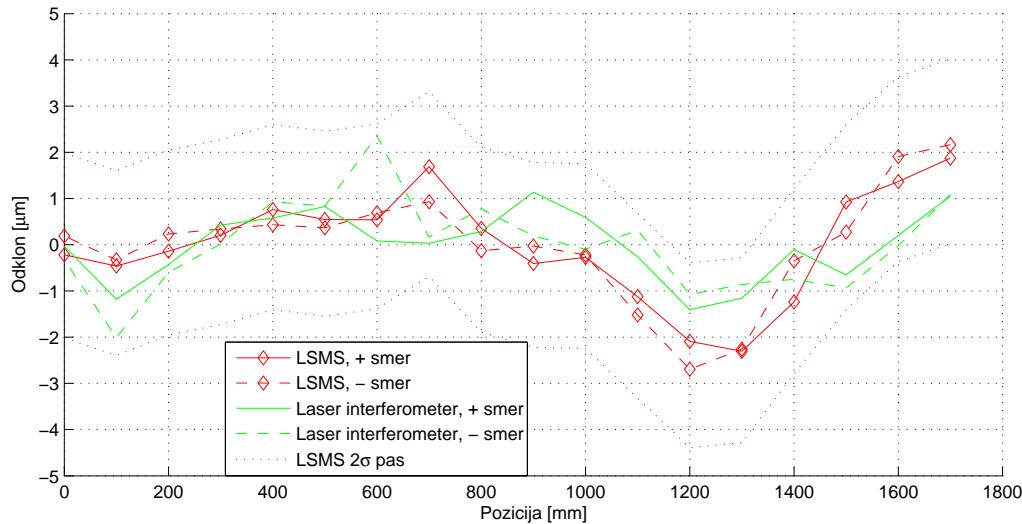
Druga postavitev primerjalnega preizkusa je kot referenčni merilni sistem vključevala laserski interferometer, tokrat z Wollastonovo prizmo⁹, slika 5.18. Le-to smo na sani zopet pritrdirili skupaj z detektorjem. Vertikalni zamik med slednjima je bil dovolj majhen, da je bila Abbejeva napaka zaradi "roll"-odstopanj sani majhna ¹⁰. Laserski del merilnega sistema ter retroreflektor interferometra sta bila na skupni merilni mizi. Tokrat smo merili horizontalno premost, podobna obdelava meritev pa vodi k rezultatu na sliki 5.19. Meritve obeh sistemov so v tem primeru še bolj skladne, saj so največja

⁹Ta optika se standardno uporablja za merjenje premosti

¹⁰Predhodne meritve kažejo na največje "roll" odstopanje sani 2.5 arcsec. Pri vertikalni razdalji med detektorjem in Wollastonovo prizmo znaša ustrezno horizontalno odstopanje največ $0.5 \mu\text{m}$.



Slika 5.18: Postavitev drugega primerjalnega preizkusa: 1 - laserski interferometer Renishaw, 2 - laserska enota, 3 - keramični nosilec, 4 - detektorska enota, 5 - Wollastonova prizma, 6 - retroreflektor interferometra



Slika 5.19: Horizontalni profil premosti, izmerjen z novim laserskim sistemom in interferometrom

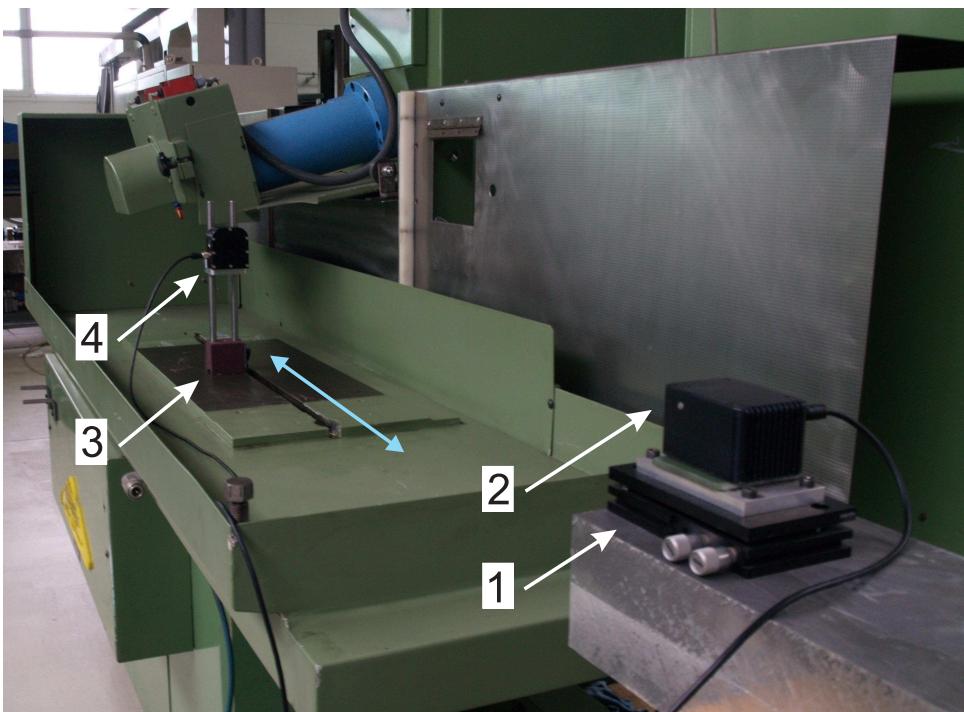
odstopanja približno $1 \mu\text{m}$. Referenčne meritve so dodobra znotraj $\pm 2\sigma$ pasu merilnega sistema, pri čemer niti ne upoštevamo negotovosti laserskega interferometra (približno $\pm 1 \mu\text{m}$). Ker je bil laserski vir sistema za merjenje premosti postavljen blizu pozicije 0 mm, zaznamo rahlo večji šum pri bolj oddaljenih meritvah. Pri uporabi Wollastonove prizme pa je tudi meritev z interferometrom dovezeta za motnje zaradi zračnih turbulenc. Ker je bil retroreflektor lociran blizu pozicije 1800 mm (glej sliko 5.18), je ta situacija tu ravno obratna in so torej bolj šumne meritve bliže poziciji 0 mm. Ta pojav se, sicer neizrazito, manifestira tudi v rezultatih na sliki 5.19 kot slabša ponovljivost v nekaterih točkah profila.

5.4 Uporaba sistema

Za ilustracijo delovanja sistema si poglejmo nekaj meritev na dveh različnih strojih - na CNC brusilnem stroju starejše izdelave, v nadaljevanju stroj A (5.20), in na natančnem CNC vertikalnem obdelovalnem centru - stroj B. Potek meritve profila premosti je v obeh primerih podoben in obsega naslednje korake:

- namestitev komponent in ogrevanje sistema (temperaturna stabilizacija);
- poravnavavo oz. nastavitev smeri žarka tako, da je približno¹¹ vzporeden s smerjo gibanja stroja;

¹¹Žarek mora biti vzporeden smeri gibanju vsaj v takšni meri, da bo odmik detektorja na vsej dolžini znotraj merilnega območja detektorja



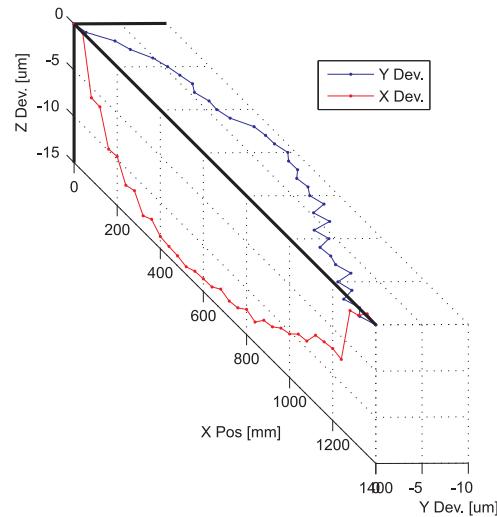
Slika 5.20: Merjenje premosti gibanja na CNC brusilnem stroju: 1 - nagibna mizica za mikronastavitev smeri žarka, 2 - laserska enota, 3 - magnetni podstavek, 4 - detektorska enota

- izvajanje meritev v izbranem številu točk;
- analizo rezultatov.

V prvem primeru smo laserski vir postavili na stativ, detektor pa s pomočjo magnetnega podstavka na delovno mizo stroja, ki smo jo premikali s korakom 40 mm. Rezultati meritve so prikazani na sliki 5.21. Profil premosti je prikazan v skladu s prvo od možnosti, opisanih v razdelku 5.1. Maksimalno odstopanje od premosti v skladu s to interpretacijo je približno $14 \mu\text{m}$ v vertikalni smeri in $9 \mu\text{m}$ v horizontalni, oblika profila pa je v skladu s pričakovanji in je posledica obrabe vodil stroja.

V drugem primeru smo laser namestili na mizo obdelovalnega stroja, detektor pa je pričvrščen na glavno vreteno in meri premost gibanja X-osi stroja (slika 5.22). Ker gre za precizen obdelovalni stroj, je tudi izmerjeno odstopanje od premosti zelo majhno - manj kot $2 \mu\text{m}$ v vertikalni in $4 \mu\text{m}$ v horizontalni smeri.

Možnost uporabe večjih vzorčnih frekvenc nam omogoča tudi nekatere doslej neomenjene vrste meritev. S primerom le na kratko ilustrirajmo možnost dinamične meritve

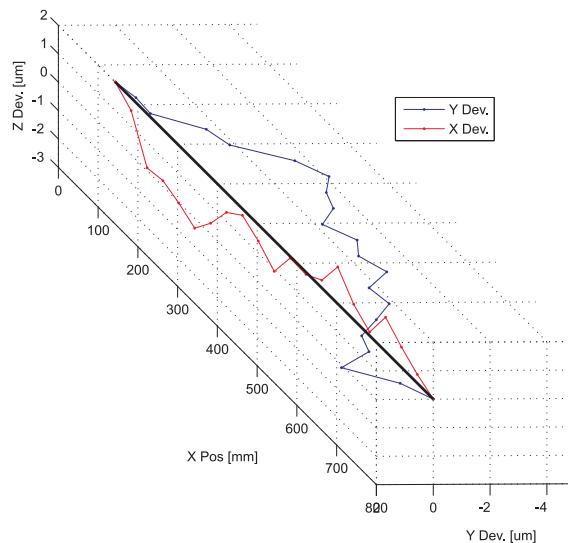


Slika 5.21: Rezultati meritve premosti - CNC brusilni stroj

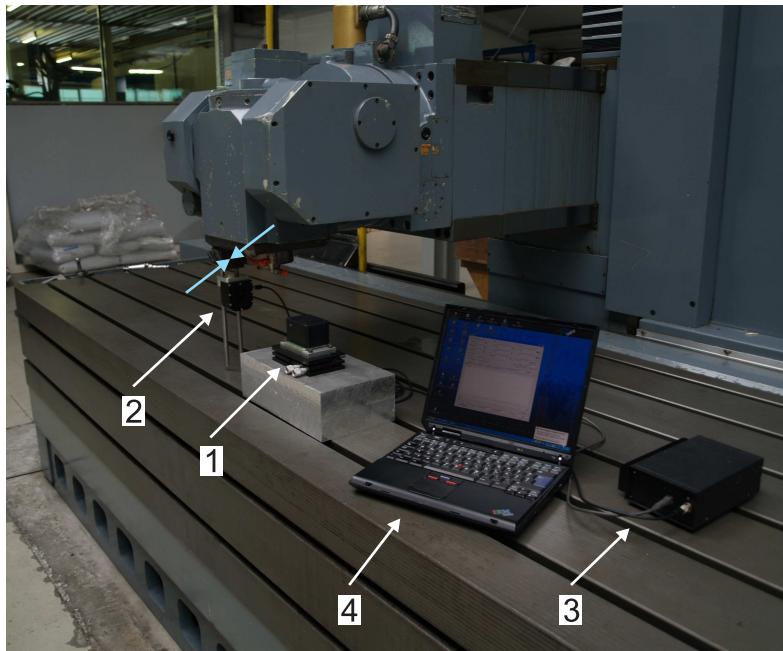
približevanja CNC stroja v programirano pozicijo¹², slika 5.23. Morebitna prenihanja so seveda nezaželena in kritično vplivajo na obdelovalne lastnosti kateregakoli stroja. Lahko so posledica mehanskih nepravilnosti ali neuglašenega krmiljenja osi, pri čemer je lahko njihova natančna kvantifikacija pomembna - slika 5.24.

Izmerili smo tudi ponovljivost pozicioniranja. Primer takšne meritve je na sliki 5.25. Kot tudi prejšnjo meritev lahko to izvajamo za dve osi stroja hkrati. Gib v

¹²Pri tem moramo zagotoviti čim bolj togo pritrditev detektorske enote v izbrano točko, da izločimo morebitne dinamične uklone pritrditvenih elementov.

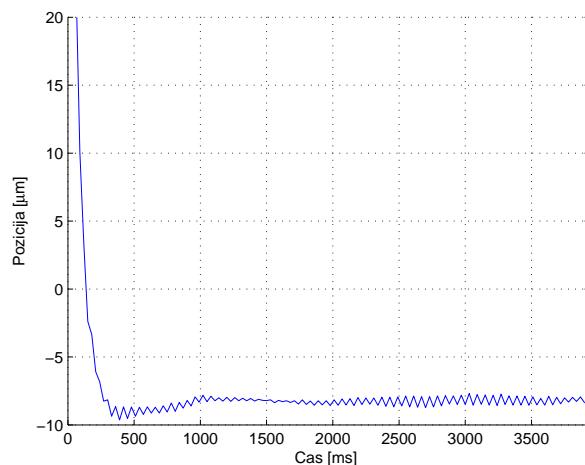


Slika 5.22: Rezultati meritve premosti - CNC obdelovalni center

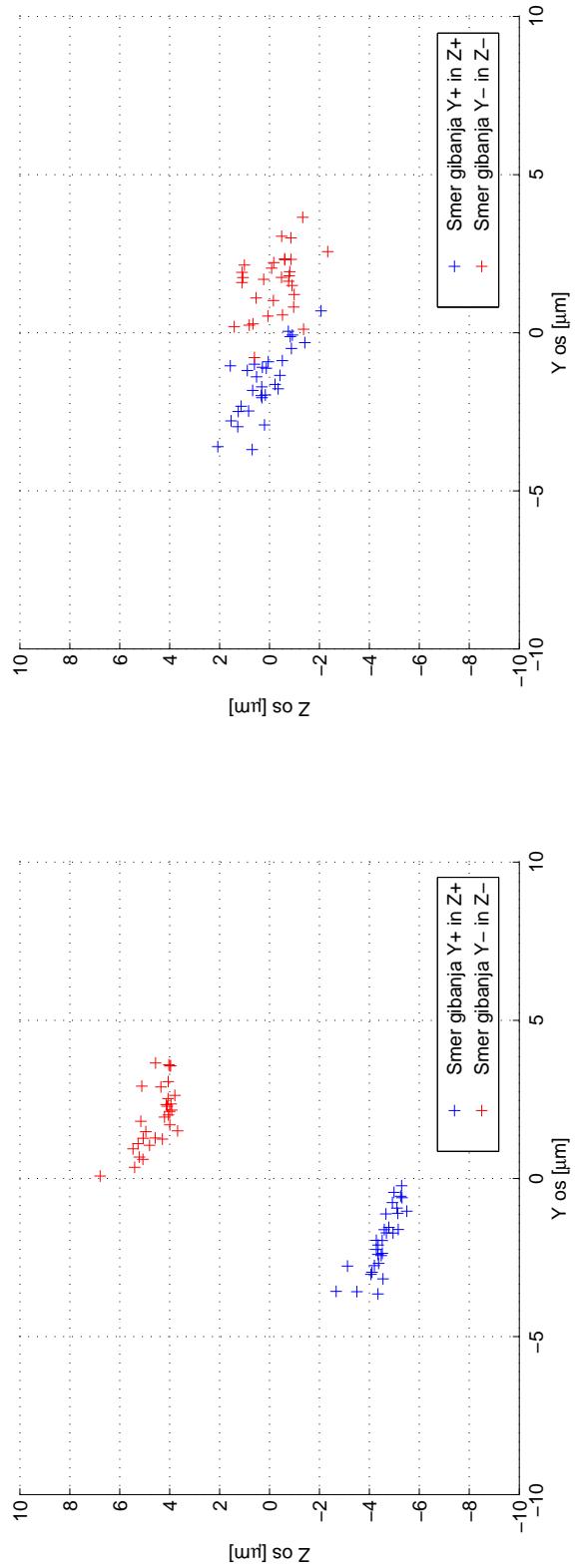


Slika 5.23: Postavitev sistema pri dinamični meritvi in meritvi ponovljivosti: 1 - laserski vir, 2 - detektor, 3 - glavna enota, 4 - PC za zajemanje podatkov

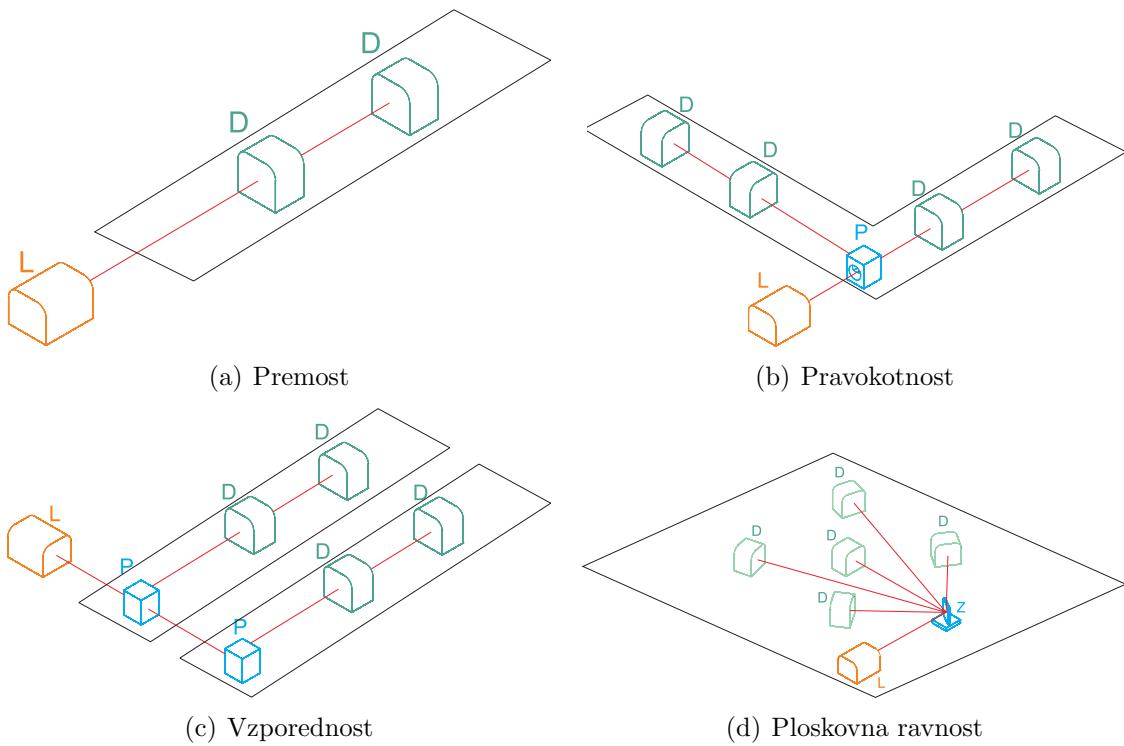
ciljno točko iz ene ali druge smeri približevanja ponovimo dovoljkrat za statistično reprezentativnem vzorec. V daljšem časovnem obdobju lahko tako izmerimo tudi časovno lezenje stroja (npr. temperaturno raztezanje vretena).



Slika 5.24: Dinamična meritev pozicije glave obdelovalnega stroja pri približevanju programirani legi: opazno je prenihanje velikosti $2 \mu\text{m}$ ter nihanje regulacijske zanke v ustaljenem stanju.



Slika 5.25: Meritev ponovljivosti pozicije glave obdelovalnega stroja



Slika 5.26: Nekateri možni načini uporabe sistema za merjenje geometričnih lastnosti objektov oz. gibanja. Pri tem uporabljamo laserski vir (L) in detektor (D) ter po potrebi še pentaprizmo (P) ali vrtljivo zrcalo (Z).

Končno omenimo še druge možnosti uporabe laserskega sistema pri geometrijskih meritvah v strojništvu. Prikazuje jih slika 5.26. Z različnimi optičnimi konfiguracijami je tako z obstoječim sistemom poleg premosti mogoče meriti tudi vzporednost in pravokotnost (s pomočjo pentaprizme¹³) ter ploskovno ravnost (s pomočjo vrtljivega zrcala). Pri tem se moramo zavedati, da uporaba dodatnih optičnih elementov, ki so seveda izdelani z omejeno točnostjo, dodatno pripomore k merilni negotovosti.

¹³Pentaprizma laserski žarek ne glede na svojo orientacijo odkloni za 90° .

6 Zaključek

V disertaciji je bil predstavljen natančen optični sistem za merjenje prečnih premikov. Povod za razvoj takšnega sistema smo našli v pomanjkljivostih koordinatnih merilnih rok. Izkušnje s tega področja kažejo na pomemben vpliv deformacije mehanske strukture KMR na njihovo merilno negotovost, uvodna teoretična analiza virov negotovosti KMR pa je pokazala, da je prispevek deformacij k skupni merilni negotovosti približno tretjinski. Glede na dejstvo, da absolutni prispevek večine drugih virov negotovosti narašča linearno z velikostjo KMR, odkloni zaradi deformacij pa kar s tretjo potenco, je pri večjih napravah ta pojav še pomembnejše upoštevati in ga seveda poskušati tudi kompenzirati.

Na podobno problematiko naletimo tudi na drugih področjih, kjer imajo lahko deformacije v preciznih mehanizmih kvaren vpliv na njihove merilne ali druge lastnosti. Novi merilni sistem smo zato zasnovali kar najbolj univerzalno. Pri tem smo uporabili nekatere že znane principe optičnega merjenja prečnih premikov. S pomočjo laserskega žarka, ki ga proizvaja na optično vlakno sklopljena laserska dioda, generiramo referenčno linijo. Pri tem smo posebno pozornost namenili sicer težavni stabilnosti laserskega žarka. Odstopanja od referenčne linije zaznavamo z na premik občutljivim detektorjem, katerega izhodni signali so obdelani in digitalizirani na samem detektorskem elementu. Na ta način smo dosegli kar največjo imunost na motnje in omogočili povezovanje posameznih gradnikov preko enotnega digitalnega vodila, hkrati pa smo ohranili zelo majhne dimenzije in težo vseh gradnikov, ki so vgrajeni v merjeni mehanski segment. Te lastnosti omogočajo vgradnjo sistema v notranjost mehanskih sistemov, kot so npr. KMR, kar pomeni doseganje boljših obratovalnih pogojev samega merilnega sistema (zaščito pred vplivi okolja), hkrati pa ne oviramo funkcionalnosti ciljne naprave. Oboje je sicer velika hiba dosedanjih podobnih sistemov. Merilni sistem smo kalibrirali in nato evaluirali v kontroliranem okolju z uporabo kalibriranih referenčnih inštrumentov ter na ta način zagotovili sledljivost meritev. Izmerjena ločljivost, točnost pa tudi časovna stabilnost potrjujejo primernost sistema za uporabo v preciznih mehanskih sistemih, izpolnili pa smo tudi vse druge uvodoma zastavljene cilje.

Sledila je uporaba sistema v povezavi s koordinatno merilno roko, načrtovano za

visoko precizne meritve. Integracija sistema v obstoječo KMR je zahtevala nekatere poenostavitev, kot je denimo merjenje deformacij enega samega segmenta mehanizma. Te omejitve nam sicer preprečujejo natančen izračun vpliva deformacij na ključno lastnost KMR, t. j. napako indikacije pozicije vrha. Kljub temu pa se ob dejstvu, da so to prve natančne in neposredne meritve tovrstnega mehanizma, lahko zadovoljimo z oceno velikostnega razreda deformacij, ki se pri njegovi uporabi pojavljajo. Na ta način smo namreč natančno izmerili in ločili posamezne vplive na segment KMR: gravitacijske sile, sile operaterja na roko v dinamičnih (inercijske sile ob pospeševanju in zaviranju) in statičnih razmerah (sile zaradi bližine singularnosti mehanizma) ter zaznali tudi dinamične pojave (nihanja in vibracije) ob pospeševanju zaradi stick-slip efekov in drugih nepopolnosti v uležajenju sklepa. Primerjalni preizkusi kalibracije kinematičnega modela KMR so pokazali izboljšanje točnosti ob uporabi informacije o deformaciji, še posebej v razmerah s spremenljivimi obremenitvami. Rezultati opravljenih meritev nas lahko prepričajo, da je uporaba sistema za merjenje deformacij v merilnih rokah za precizne aplikacije zagotovo potrebna, saj je edini način za popolno kompenzacijo odklonov prav njihovo neposredno merjenje.

Merjenje deformacij v KMR in podobnih sistemih se je torej izkazalo za več kot smiselno, hkrati pa je odprlo še nekaj izzivov za prihodnje raziskave. V zvezi z upoštevanjem deformacij pri uporabi KMR je bil s predstavljenimi poskusi storjen šele prvi korak. Pri posamezni KMR je kot prva potrebna identifikacija vseh segmentov, kjer bi bila vgradnja takega sistema koristna. V segmentih, kjer je to potrebno, bi bilo s pomočjo drugega žarka in dodatnega detektorja mogoče meriti tudi torzijske obremenitve in tako zajeti tri od skupno šestih komponent odklona. Glede na drugačne vzroke (predvsem temperaturne vplive) na elongacijo segmentov bi bil idealen sistem sposoben meritve petih prostostnih stopenj odklona, kar pa bo ob fizičnih omejitvah ter za to potrebnih dodatnih optičnih in elektronskih komponentah le težko dosegljivo. Posebno poglavje tu predstavlja primeren način vključitve izmerjenih podatkov v kinematični model KMR. To je še posebej odločilno pri kalibraciji - pomembnem področju, ki bo za nadaljnji razvoj KMR zagotovo potrebno obsežne znanstvene obravnave. V luči novih informacij, ki jih nudi razviti sistem, bo potrebno prilagoditi vse ključne korake kinematične optimizacije KMR: izgradnja primerenega matematičnega modela, ki vključuje deformacije, način zbiranja kalibracijskih podatkov ter postopke numerične optimizacije. Preostale možnosti za izboljšanje točnosti KMR vidimo še v izboljšanih zmogljivostih (oz. razvoju kalibracijskih metod) enkoderjev v sklepih in še nadaljnjem napredku pri kompenzaciji opleta vležajenja.

Nazadnje smo razviti optični sistem uporabili še kot napravo za merjenje premo-

sti. Osnovni princip teh meritev je namreč prav merjenje prečnih odmikov od preme reference. Laserski vir in detektorska enota sta tako postali samostojni komponenti, ki ju lahko hitro pritrdimo na merjene strojne elemente. Pri njihovem načrtovanju smo pazili predvsem na sposobnost delovanja v industrijskem okolju, pri čemer smo žeeli ohraniti zmogljivosti prejšnjega sistema. Način kalibracije je bil podoben prejšnjemu, vendar smo jo opravili pri več različnih razdaljah. Rezultati so pokazali, da se dosegljiva točnost z oddaljenostjo ne zmanjšuje bistveno. Pri tem igrajo pomembno vlogo zračne turbulence, ki so daleč največji vir merilnega šuma in imajo prevladujoč vpliv na kakovost meritev tudi pri podobnih optičnih merilnih principih. Natančne primerjalne meritve so pokazale odlično ujemanje rezultatov s tistimi, pridobljenimi z ”zlatim standardom” tovrstnih meritev, laserskim interferometrom.

Sistem tako odlikujejo podobne lastnosti kot njegovega predhodnika, hkrati pa je bolj imun na vplive okolja, ki bi povzročali časovno lezenje; tu imamo v mislih predvsem temperaturna nihanja. Seveda nas to pri dejanskih meritvah ne odvezuje od stroge pazljivosti in zagotavljanja ustreznih razmer, ki so vsemu navkljub potrebne pri takšnih meritvah. Ponovljivost gibanja in naspoloh kakršnokoli merjenje v območjih velikostnega reda $1 \mu m$ so namreč pri klasičnih mehanskih sistemih te velikosti na meji praktično dosegljivega. Zavedajmo se razmerja med odkloni in razdaljo, pri kateri jih merimo, ki znaša $1 : 10^6$ in celo več. Uspešno delovanje v omenjenih okoliščinah in možnost natančnega merjenja doslej le posredno merjenih pojavov nas zato navdaja z upanjem, da bo predstavljeni merilni sistem našel svoje mesto na različnih področjih in vsaj delno pripomogel k izboljšanju delovanja preciznih naprav.

Viri in literatura

- [1] T.J. Quinn: Measurement and society, *Comptes Rendus Physique*, Vol. 5, No. 8, 2004, str. 791-797.
- [2] I. Kovač: Messen mit dem industriroboter: Entwicklung eines robotergerechten Messgerätes, *Wissenschaftliche Arbeit als Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau dertechnischen Universität eingereicht*, Graz, 1992.
- [3] I. Kovač: Antropoidne merilne naprave v koordinatni merilni tehniki, *Strojniški vestnik*, Vol. 44, No. 5-6, 1998, str. 175-182.
- [4] I. Kovač: Naprava in postopek za kalibriranje členkastih koordinatnih merilnih naprav, *Strojniški vestnik*, Vol. 48, No. 1, 2002, str. 17-32.
- [5] I. Kovač: Automated geometrical inspection by a new robot guided anthropoidic measuring device, *The third international conference on automation technology*, Vol. 6, 1994.
- [6] W. Lotze: ScanMax - a novel 3D coordinate measuring machine for the shopfloor environment, *Measurement*, Vol. 18, No. 1, 1996, str. 17-25.
- [7] B. Thorsten: Genauigkeitssteigerung bei Gelenkarmkoordinatenmessmaschinen, Dissertation, Graz, 2007.
- [8] S.W. Lin, P.P. Wang, Y.T. Fei, C. Chen, Simulation of the errors transfer in an articulation-type coordinate measuring machine, *Int J Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, 2006, str. 879–886.
- [9] S. Raab et al., United States Patent No. 6996912, Feb. 14, 2006
- [10] ASME B89.4.22-2004: Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines (CMM)
- [11] VDI/VDE 2617 Part 9: Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their reverification - Acceptance and reverification tests for articulated arm coordinate measuring machines

- [12] A. Makynen, J.T. Kostamovaara, R.A. Myllyla: Displacement sensing resolution of position-sensitive detectors in atmospheric turbulence using retroreflected beam, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46, No. 5, 1997, str. 1133 - 1136.
- [13] Y.J. Sohn, J.H. Kwon, O.S. Choe: Portable autocollimators using the laser diode and the position sensitive detector, *Review of scientific instruments*, Vol. 69, No. 2, 1998, str. 402-405.
- [14] J.D. Spear, R.E. Russo: Low noise position sensitive detector for optical probe beam deflection measurements, *Review of scientific instruments*, Vol. 67, No. 7, 2001, str. 2481-2484.
- [15] T.R. Armstrong, M.P. Fitzgerald: An autocollimator based on the laser head of a compact disc player, *Measurement science and technology*, Vol. 3, No. 11, 1992, str. 1072-1076.
- [16] W. Zhao, J. Tan, L. Qiu, L. Zou, J. Cui, Z. Shi: Enhancing laser beam directional stability by single-mode optical fiber and feedback control of drifts, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, 2005.
- [17] F. Demeester, H. Van Brussel H.: Real-time optical measurement of robot structural deflections, *Mechatronics*, Vol. 1, 1991, str. 73-86.
- [18] J. Swevers, D. Torfs, F. Demeester, H. Van Brussel: Fast and accurate tracking control of a flexible on-link robot based on real-time link deflection measurement, *Mechatronics*, Vol. 2, 1992, str. 29-31.
- [19] W.L. Xu, S.K. Tso: Sensor-based deflection modelling and compensation control of flexible robotic manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 33, No. 7, 1998, str. 909-924.
- [20] T.W. Yang: Dynamic modeling based on real-time deflection measurement and compensation control for flexible multi-link manipulators, *Dynamics and control*, Vol. 11, No. 1, 2001, str. 5-24.
- [21] S.K. Tso, T.W. Yang, W.L. Xu, Z.Q. Sun: Vibration control for a flexible-link robot arm with deflection feedback, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 38, No. 1, 2003, str. 51-62.
- [22] J.S. Surdhar, A.S. White: A parallel fuzzy-controlled flexible manipulator using optical tip feedback, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, No. 3, 2003, str. 273-282.

- [23] R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo: Error compensation in machine tools — a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, 2000, str. 1235–1256.
- [24] Y.F. Li, X.B. Chen: End-Point Sensing and State Observation of a Flexible-Link Robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, 2001.
- [25] J. Yuan, J. Ni: The real-time compensation technique for CNC machining systems, *Mechatronics*, Vol. 8, 1997, str. 359–380.
- [26] P.S. Huang, J. Ni: On-line error compensation of coordinate measuring machines, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 5, 1995, str. 725–738.
- [27] K.C. Fan, M.J. Chen, W.M. Huang: A six degree of freedom measurement system for the motion accuracy of linear stages, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, No. 3, 1998, str. 155–164.
- [28] K.C. Fan, C.L. Chu, J.L. Liao, J.I. Mou: Development of a high precision straightness measuring system with DVD pick-up head, *Measurement science and technology*, Vol. 14, No. 1, 2003, str. 47–54.
- [29] K.C. Fan, Y. Zhao: A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No. 14, 2000, str. 2073–2081.
- [30] Q. Feng, B. Zhang, C. Kuang: A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module, *Optics & Laser Technology*, Vol. 36, No. 4, 2004, str. 279–283.
- [31] C. Kuang, Q. Feng, B. Zhang, B. Liu, S. Chen, Z. Zhang: A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module, *Sensors and actuators, A: Physical*, Vol. 125, 2005, str. 100–108.
- [32] S.T. Lin: A laser interferometer for measuring straightness, *Optics & Laser Technology*, Vol. 33, 2001, str. 195–199.
- [33] C. Chou et al.: CCD based CMM geometrical error measurement using Fourier phase shift algorithm, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, 1997, str. 579–590.
- [34] C.H. Liu, W.Y. Jywe, C.C. Hsu, T.H. Hsu: Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, 2005.

- [35] X.-D. Lu, D.L. Trumper: Self-Calibration of On-Axis Rotary Encoders, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, 2007, str. 499-504.
- [36] W. Tsukasa et al: Self-calibratable rotary encoder, *J. Phys.: Conf.*, Ser. 13, 2005, str. 240-245.
- [37] N. Bobroff: Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity, *Appl. Opt.*, Vol. 26, 1987.
- [38] ISO 230-1: 1996, Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions
- [39] W. Beitz, K.H. Kuttner: Dubbel Handbook of mechanical engineering, Springer-Verlag, Heidelberg, 1994.
- [40] D.C. Montgomery: Engineering statistics, 4th edition, Wiley, New York, 1998
- [41] C. Hirn: Entwicklung eines klimatisierten Präzisionskomparators für Längen und Geradheitsmessungen bis 5 Meter (in German), *Technik report*, Vol. 19, No. 6, 1992, str. 23-26.
- [42] R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo: Error compensation in machine tools — a review Part II: thermal errors, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, 2000, str. 1257–1284.
- [43] I. Kovač, A. Frank: Neues mobiles Messgeräet zur fertigungsintegrierten Geometrieprüfung, *VDI-Z*, Vol. 140, No. 5, 1998, str. 36-38.
- [44] R. Bernhardt, S.L. Albright: Robot calibration, Chapman & Hall, London, 1993.
- [45] R.J. Horning: A comparison of identification techniques for robot calibration, M.S. Thesis, Case Western Reserve University, 1998.
- [46] A. Goswami, A. Quaid, M. A. Peshkin: Complete parameter identification of a robot using partial pose information, *IEEE Control Systems*, Vol. 13, No.5, 1993, str. 6-14.
- [47] RoboCal - How to calibrate a robot with IPK calibration package (V 3.0), Fraunhofer-IPK, Berlin, 1999.
- [48] H. Golnabi: Linearity in output signal of optical position-sensing detector systems, *Optics & Laser Technology*, Vol. 32, No. 5, 2000, str. 311–316.
- [49] W.L. Xu, S.K. Tso: Proceedings of the IEEE International Conference on SMC, Beijing, 1996, str. 1247.

- [50] I. Kovač, F. Haas, A. Frank: Related test methods for robot performance identification, ISMCR '95 Proceedings, 1995.
- [51] SIST EN ISO 9283:2003 Manipulirni industrijski roboti - Merila za zmogljivost in pripadajoče preskuševalne metode (ISO 9283:1998)
- [52] SIST EN ISO 10360-1:2001/AC:2004 Geometrical product specification (GPS)- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part1: Vocabulary (ISO 10360-1:2000/Cor.1:2002)
- [53] oSIST prEN ISO 10360-2:2006 Geometrical product specification (GPS)- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (ISO/DIS 10360-2:2005)

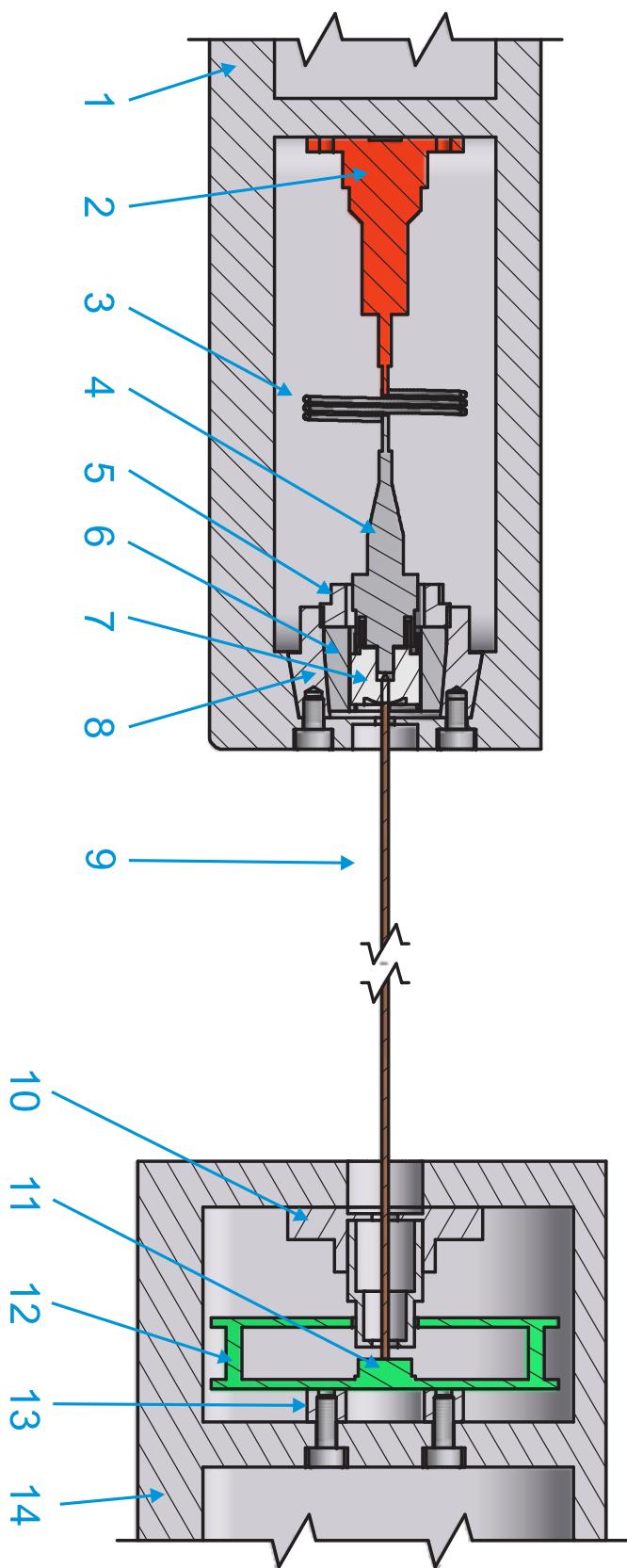
A Zgradba optičnega dela merilnega sistema

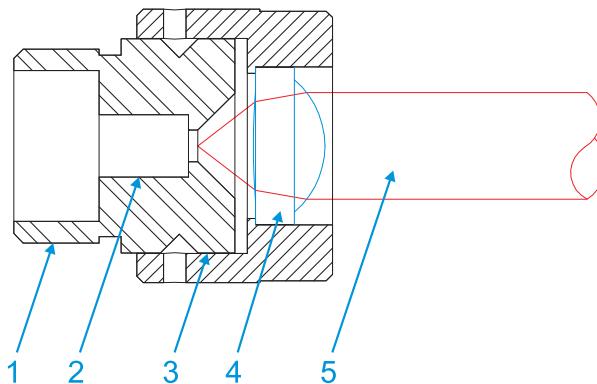
Na sliki A.1 so prikazani vsi pomembni gradniki optičnega dela merilnega sistema. Lastnosti merilnih sistemov, kot sta opisana v tretjem in petem poglavju, je mogoče zagotoviti le z ustreznim načinom integracije kritičnih elementov (še posebej optične glave in detektorja) v ciljni mehanizem. Na sliki je primer vgradnje v mehanizem, kjer sta nepremični (referenčni del z laserskim virom) ter premični (merjeni) del prikazana kot ločeni enoti, kar je seveda le eden od možnih načinov uporabe sistema.

Svetlobni vir (element (2) na sliki A.1) je laserska dioda Princetel LPF670-32-FC, sklopljena na enorodovno optično vlakno 3M FS-SN3224 dolžine 1 m (3). Premer jedra vlakna je $4 \mu\text{m}$, zunanji premer zaščitnega plašča pa $900 \mu\text{m}$. Optično vlakno lahko povezuje diodo in oddaljeno optično glavo na omenjeni dolžini, ali pa je na majhnem prostoru zvito; v obeh primerih pa mora biti pritrjeno tako, da je nepremično (več o tem v A.1). Vlakno je zaključeno s FC/PC optičnim konektorjem (4), ki je povezan na optično glavo.

Zgradba optične glave in njeno vpetje sta kritična dejavnika pri doseganju visoke časovne oz. temperaturne stabilnosti. Ohišje optične glave (8) se tako konično prilega ohišju referenčnega dela (1), na katerega je lahko privijačeno. Kolimacijski sklop (7) pa je na ohišje optične glave pritrjen s pomočjo skrčljive konične puše (6). Z zategovanjem matice (5) puša enakomerno objema kolimacijski sklop in tako minimizira vpliv temperaturnih raztezkov na spremembo orientacije kolimacijskega sklopa. Detajlni pogled preseka

Slika A.1: Optični gradniki merilnega sistema ter njihova namestitev: 1 - ohišje referenčne enote, 2 - laserska dioda, 3 - optično vlakno, 4 - optični konektor, 5 - matica puše, 6 - puša kolimacijskega sklopa, 7 - kolimacijski sklop, 8 - ohišje optične glave, 9 - kolimiran laserski žarek, 10 - sistem zaslona, 11 - kvadrantna fotodioda, 12 - detektorsko vezje, 13 - pritrdilni obroč vezja, 14 - ohišje detektorske enote





Slika A.2: Zgradba kolimatorskega sklopa Thorlabs F230FC-B: 1 - pritrdilni del za optični konektor, 2 - ležišče ferule optičnega konektorja, 3 - nastavitev navoja goriščne razdalje, 4 - asferična leča, 5 - svetlobni snop

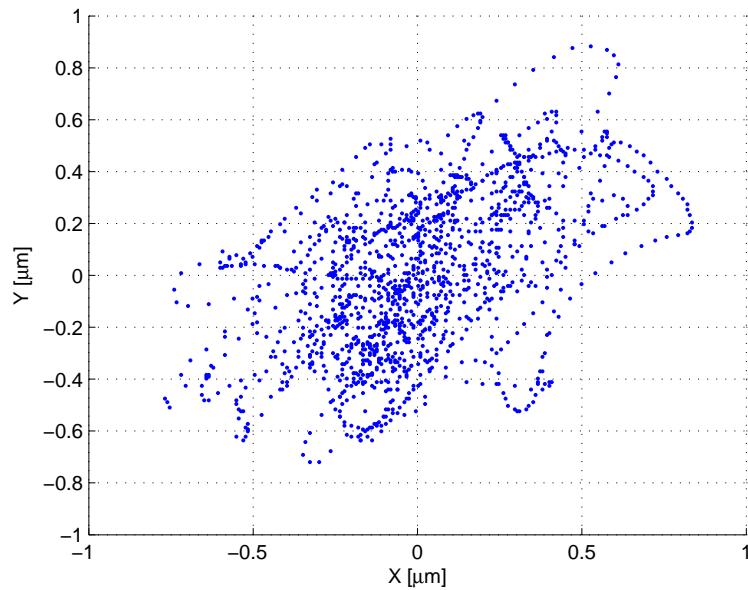
Tabela A.1: Specifikacije kolimatorskega sklopa Thorlabs F230FC-B

Valovna dolžina prednastavitev	633 nm
Optično vlakno prednastavitev	SM600
Premer izhodnega žarka ¹	0.9 mm
Kot divergencije žarka	0.05°
Numerična odprtina	0.55
Goriščna razdalja leče	4.50 mm

¹ Izmerjeni $1/e^2$ premer pri oddaljenosti, enaki goriščni razdalji

kolimacijskega sklopa Thorlabs F230FC-B je na sliki A.2. Kolimator vsebuje pritrdilni del konektorja FC/PC z navojem (1 na sliki A.2) in preciznim ležiščem (2) za ferulo konektorja, iz katere izhaja svetloba. Razdalja ferule od asferične leče (4) je tovarniško prednastavljena tako, da je enaka goriščni razdalji leče in je torej izhodni žarek (5) pri nazivni valovni dolžini svetlobe kolimiran. Več podatkov o kolimatorskem sklopu je v tabeli A.1.

Kolimiran žarek - (9) na sliki A.1 - sprejme detektorska enota. V kolikor žarek prehaja odprt prostor, je potrebno zmanjšati motilni vpliv zunanjih virov svetlobe (luči, sonca). Običajno je dovolj učinkovit že sistem zaslona (10), ki prepušča le svetlobo iz smeri optične osi, v slabših razmerah pa je priporočljiva tudi uporaba pasovno prepustnega optičnega filtra. Vezje detektorja (12) je na ohišje enote (14) pritrjeno preko kovinskega obroča (13), ki obdaja samo kvadrantno diodo (11). Lega le-te je glede na ohišje enote tako stabilna.



Slika A.3: Odziv sistema pri zvijanju optičnega vlakna, razdalja med lasersko in detektorsko enoto 500 mm

A.1 Polarizacijska odvisnost sistema

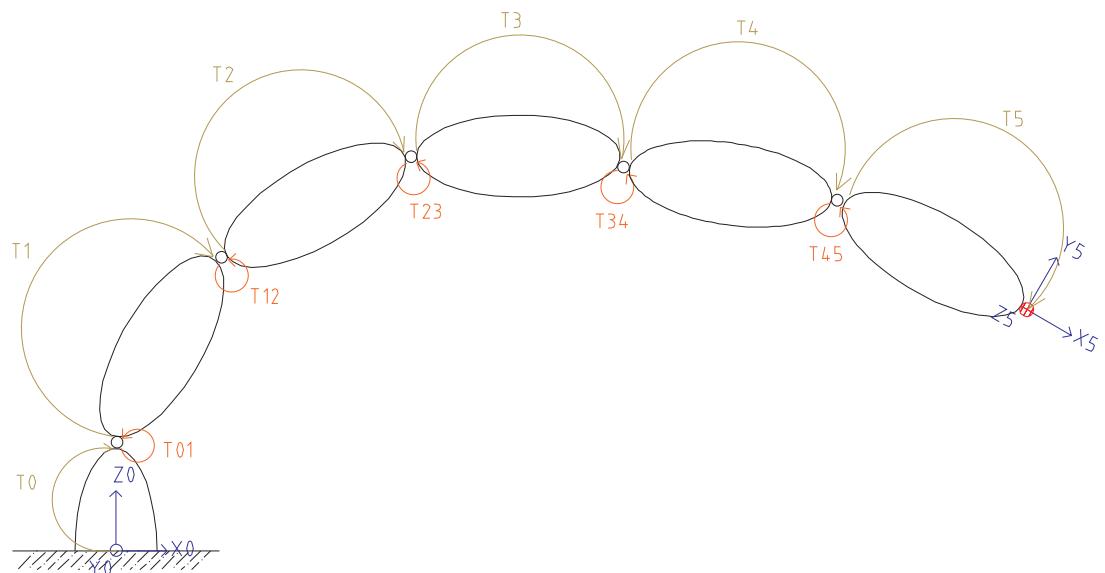
Omenili smo, da moramo optično vlakno namestiti takšen način, da bo popolnoma nepremično glede na lego laserske diode in optične glave. Čeprav ima svetloba same laserske diode konstantno polarizacijo (z majhno naključno komponento) pa je le-ta na izhodu iz optičnega vlakna naključna in se ob morebitnem premikanju oz. zvijanju vlakna spreminja. Na drugi strani bo na polarizacijo vpadne svetlobe občutljivi fotodetektor to zaznal kot navidezno spremembo lege žarka.

Rezultat preprostega preizkusa, pri katerem smo ob nespremenljivi legi obeh enot merilnega sistema ročno na različne načine zvijali optično vlakno, je na sliki A.3. Preizkus smo izvedli pri razdalji 500 mm med lasersko in detektorsko enoto, pri čemer so nastali naključni odmiki z največjo amplitudo približno $0.8 \mu m$. Pri nezahtevnih aplikacijah sistema, kjer je takšen prispevek k pogrešku sprejemljiv, je optično vlakno lahko torej gibljivo (poteka lahko denimo skozi sklepe mehanizma); v zahtevnejših pogojih pa je rešitev problema v uporabi optičnega vlakna, ki ohranja polarizacijo ("Panda" ali "Bow-tie" vlakna).

B Kinematični model KMR

B.1 Osnovni model

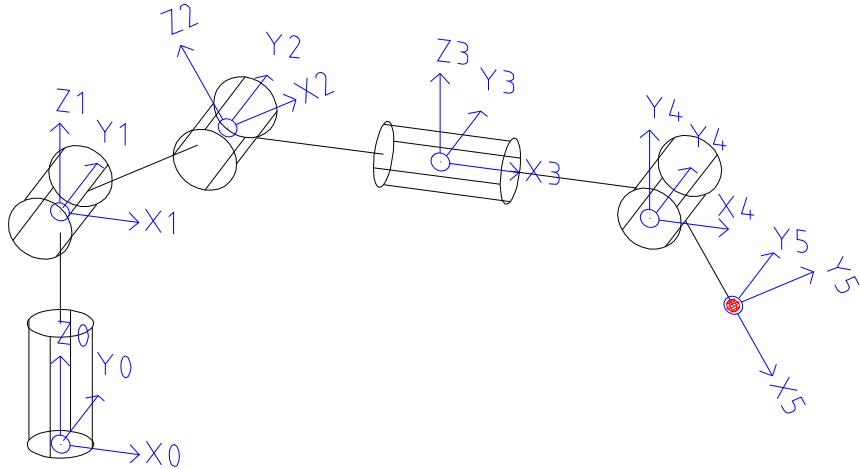
Za opis kinematične strukture KMR smo uporabili notacijo, s katero lahko enostavno opišemo poljuben mehanizem na način, ki bo primeren tudi za optimizacijo (več v dodatku C). Za vsak segment predpišemo dva koordinatna sistema. Transformacije med njima opisujejo homogene matrike T_i , transformacije $T_{i-1,i}$ med enim in drugim segmentom pa vsebujejo le rotacijo okoli ene izmed X, Y ali Z osi (slika B.1). Prvi koordinatni sistem baznega segmenta predstavlja osnovni koordinatni sistem roke, zadnji pa se nahaja v središču konice tipala oz točki pritrditve (slika B.2).



Slika B.1: Pomen transformacijskih matrik

Segment torej opišemo s tremi translacijami ter tremi zaporednimi rotacijami, ki predstavljajo Eulerjeve ZYX kote:

$$T_i = Trans(X, x_i) \cdot Trans(Y, y_i) \cdot Trans(Z, z_i) \cdot Rot(Z, \gamma_i) \cdot Rot(Y, \beta_i) \cdot Rot(X, \alpha_i) \quad (B.1)$$



Slika B.2: Lege posameznih koordinatnih sistemov

$$T_i = \begin{pmatrix} C(\gamma_i)C(\beta_i) & -C(\alpha_i)S(\gamma_i) + C(\gamma_i)S(\beta_i)S(\alpha_i) & C(\gamma_i)C(\alpha_i)S(\beta_i) + S(\gamma_i)S(\alpha_i) & 0 \\ C(\beta_i)S(\gamma_i) & C(\gamma_i)C(\alpha_i) + S(\gamma_i)S(\beta_i)S(\alpha_i) & C(\alpha_i)S(\gamma_i)S(\beta_i) - C(\gamma_i)S(\alpha_i) & 0 \\ -S(\beta_i) & C(\beta_i)S(\alpha_i) & C(\beta_i)C(\alpha_i) & 0 \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Transformacija v sklepu v primeru rotacije okrog Z, Y ali X osi pa je podana z

$$T_{i-1,i} = \begin{pmatrix} C(q_i) & -S(q_i) & 0 & 0 \\ S(q_i) & C(q_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$T_{i-1,i} = \begin{pmatrix} C(q_i) & 0 & S(q_i) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S(q_i) & 0 & C(q_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

$$T_{i-1,i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C(q_i) & -S(q_i) & 0 \\ 0 & S(q_i) & C(q_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Lego tipala glede na osnovni koordinatni sistem dobimo torej s transformacijo

$$T_{04} = T_0 \cdot T_{01} \cdot T_1 \cdot T_{12} \cdot T_2 \cdot T_{23} \cdot T_3 \cdot T_{34} \cdot T_4 \cdot T_{45} \cdot T_5 \quad (\text{B.6})$$

pri čemer matrike $T_{i-1,i}$ vsebujejo spremenljivko kota v sklepu q_i , matrike T_i pa po šest kinematičnih parametrov $x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i$ in γ_i - skupno torej 36 parametrov, ki so lahko predmet kalibracije.

B.2 Razširjeni model

V drugem poglavju smo na poenostavljen način v model vključili tudi vpliv temperature. To storimo tako, da kinematični parameter p , ki v posameznem segmentu predstavlja njegovo dolžino (to so torej parametri z_0, x_1, x_2, x_3, x_4 ter x_5) nadomestimo s funkcijo

$$p = p_0 + \Delta T \cdot TK, \quad (\text{B.7})$$

kjer je p_0 vrednost parametra pri referenčni (kalibracijski) temperaturi, ΔT spremembra temperature, TK pa temperaturni koeficient segmenta, ki v ustrezнем proporcionalnem razmerju vsebuje temperaturne koeficiente posameznih materialov, iz katerih je segment zgrajen.

V modelu, razširjenem z deformacijo v 2. segmentu, smo modificirali parametre prečnih zamikov matrike T_2 :

$$y_2 = y_{20} + dy \quad (\text{B.8})$$

in

$$z_2 = z_{20} + dz, \quad (\text{B.9})$$

kjer sta dy in dz izmerjeni deformaciji segmenta v skladu z enačbo 4.6. Eulerjeva kota pa se, upoštevajoč enačbo 4.2, spremenita tako:

$$\gamma_2 = \gamma_{20} + \frac{3}{2} \cdot \frac{dy}{x_2} \quad (\text{B.10})$$

ter

$$\beta_2 = \beta_{20} + \frac{3}{2} \cdot \frac{dz}{x_2}. \quad (\text{B.11})$$

C Optimizacija kinematičnih parametrov KMR

Postopek kalibracije v grobem obsega tri korake, od katerih ima vsak pomemben vpliv na njeno uspešnost:

- Izbera modela, ki bo kar najbolje opisal resnični sistem ter upošteval čim večje število fizičnih parametrov; isti model se potem uporablja tudi pri dejanskem izračunu pozicije v realnem času - med merjenjem.
- Zbiranje kalibracijskih podatkov na tak način, da bodo ti kar najbolj verodostojni. Izbrati je potrebno merjene veličine in metodo njihovega merjenja.
- Identifikacija parametrov izbranega modela s pomočjo zbranih podatkov in optimizacijskega algoritma, ki bo odziv modela kar najbolje približal dejanskemu odzivu sistema.

Pristop k kalibraciji KMR bo zaradi podobnosti kinematične strukture podoben, kot bi bil v primeru kalibracije robota. Problematika robotske kalibracije pa je bila že večkrat obravnavana in tu lahko prevzamemo nekatere obstoječe rešitve.

C.1 Izbira modela

C.1.1 Matematične lastnosti primerrega modela

Pozicija vrha zaporedne kinematične verige je v splošnem nelinearna funkcija fizičnih parametrov povezovalnih segmentov, ki so konstante, ter spremenljivk vrednosti kotov v posameznih sklepih. Predlaganih je bilo že več različnih kinematičnih modelov. Pri tem se moramo zavedati, da model, ki je učinkovit pri direktni in inverzni kinematiki, morda lahko postane nestabilen pri numerični optimizaciji njegovih parametrov.

Dve najpomembnejši lastnosti modela, uporabljenega za kalibracijo, sta popolnost in proporcionalnost. V popolnem modelu se bo vsaka kinematična sprememba manipulatorja odražala v parametrih modela. V primeru, da bi uporabili nepopolen model, bi se napake v nemodeliranih parametrih delno korigirale s parametri, ki z njimi niso fizično

povezani in ne predstavljajo dejanskih, fizičnih lastnosti mehanizma. Proporcionalnost pa po drugi strani zahteva, da se majhne spremembe v dejanskih parametrih mehanizma odražajo v prav tako majhnih spremembah parametrov modela. V matematičnem smislu to pomeni zveznost modela in ta zagotavlja numerično stabilnost optimizacijskega procesa. Kot primer lahko navedemo popularno Denavit-Hartenbergovo notacijo, ki se izkaže za nevezno pri sklepih s paralelnimi (ali skoraj paralelnimi) osmi in je kot taka neprimerena za kalibracijo. V splošnem je zaželjeno, da naj parametri modela opisujejo dejanske fizične lastnosti (dimenzijske) mehanizma; na ta način je inherentno dosežena tudi zveznost modela.

C.1.2 Opis modela

Največje število neodvisnih kinematičnih parametrov manipulatorja je v splošnem podano z

$$N = 5n_r + 3n_p + 6, \quad (\text{C.1})$$

kjer je n_r število rotacijskih sklepov, n_p pa število prizmatičnih sklepov (v našem primeru je $n_p = 0$). N je hkrati tudi največje število parametrov (ne glede na uporabljeni število kinematičnih parametrov v modelu), ki jih je možno identificirati z zajemanjem podatkov o končni točki manipulatorja in tudi zadostno število parametrov za izračun končne točke iz kotov v sklepih.

V dodatu B smo prevzeli model, ki uporablja po 6 parametrov za segment (vključno z ničtim oz. baznim), in sicer po tri parametre za opis translacije in tri za rotacije, t.j. Eulerjeve ZYX kote - tako je relativno enostaven, hkrati pa ohranja dobro relacijo med parametri in fizičnimi značilnostmi mehanizma. Model bo torej obsegal $n = 36$ parametrov, ob upoštevanju $N = 31$ pa je rahlo redundanten. To je tudi vzrok za optimizacijo manjšega števila (30) parametrov v 4. poglavju.

C.2 Zbiranje kalibracijskih podatkov

Optimizacijski postopek zahteva simultano merjenje kotov v sklepih in dejanske pozicije vrha manipulatorja. Za kvalitetno identifikacijo parametrov je potrebno pozicijo vrha zajemati z visoko točnostjo, kar pa ni enostavno. V ta namen obstaja več različnih sistemov za merjenje pozicije in/ali orientacije vrha. Med njimi najdemo mehanske, optične, električne sisteme, lahko pa si pomagamo tudi z merjenjem referenčnih teles. Vsaka od teh metod ima svoje omejitve in pomanjkljivosti, skoraj nobena pa ni primerna za izvajanje v normalnem (npr. delavniskem) okolju merilne roke. Nekaj obstoječih

Tabela C.1: Obstojec načini merjenja 3D pozicije in / ali orientacije vrha

	Ball-bar
Mehanski sistemi	Sistem s tremi žicami
	Koordinatni merilni stroj
	Merilna roka
	Sferična merilna naprava
Optični sistemi	Teodoliti
	Sistemi s kamerami
	Laserski triangulacijski sistemi
	3D .. 6D laserski sledilni sistemi
Merjenje z referenčnimi telesi	Različni kalibri
	Linearna vodila
	Sfere
	Referenčne plošče z luknjami
Drugi	Halova sonda
	Akustični sistemi
	Giroskopski sistemi

sistemov je zbranih v tabeli C.1.

Prednost optičnih sistemov je hiter zajem podatkov in brezkontaktno merjenje, vendar ponavadi niso dovolj natančni, jih je zapleteno namestiti in so občutljivi na motnje iz okolice. Za uspešno kalibracijo namreč potrebujemo meritve, ki so vsaj za en velikostni razred natančnejše od pričakovane točnosti ciljnega sistema. Z mehanskimi sistemi in referenčnimi telesi po drugi strani dosegamo večjo točnost, vendar so počasnejši za uporabo, prihaja pa lahko tudi do medsebojnih vplivov (obremenitev, ki povzročajo deformacije) z merilno roko.

C.3 Identifikacija parametrov

Izmerjene pozicije vrha mehanizma in pozicije, izračunane z izbranim modelom, se bodo razlikovale. Naloga optimizacijskega algoritma je, da to razliko čim bolj zmanjša. V ta namen moramo definirati merilo točnosti modela, oz. cenično funkcijo. Primerna cenička

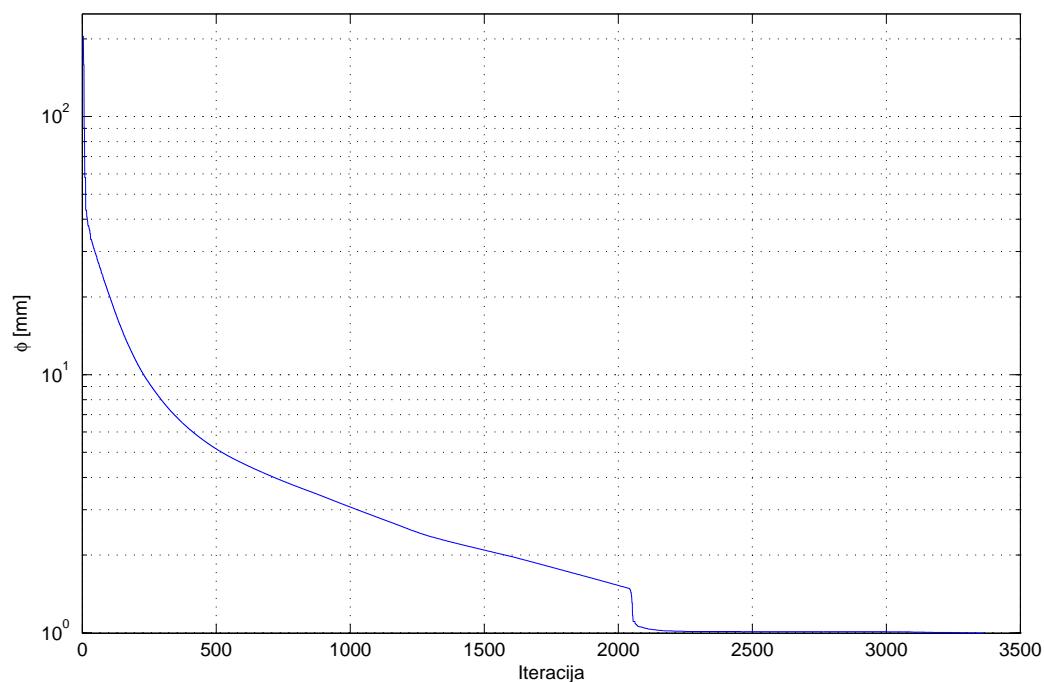
je vsota kvadratov razlik pozicije, t.j. residuumov, v kalibracijskih točkah:

$$\phi = \sum_{i=1}^n \|P_i^* - P_i\|^2, \quad (\text{C.2})$$

Tu je n število kalibracijskih točk, P_i^* izmerjena, P_i pa izračunana pozicija vrha. Omeniti je treba, da je zapis cenilke odvisen od načina zajemanja podatkov. Pokazati je namreč možno, da je optimizacija lahko uspešna z upoštevanjem in primerjavo popolne ali pa le delne informacije o legi - denimo zgolj pozicije, orientacije vrha, ali pa celo le oddaljenosti od neke točke (npr. pri uporabi ball-bar).

Ne glede na njeno obliko je cenilka nelinearna funkcija n (v našem primeru 36) spremenljivk, katere minimum moramo najti. Optimizacija je zato lahko precej težavna, saj pri le-tej ne želimo zaiti v lokalne minimume. Poleg izbire primernega minimizacijskega algoritma (ti ponavadi temeljijo na gradientni metodi) moramo zato zagotoviti tudi izhodiščni niz parametrov, ki bodo karseda blizu končnim, ter po možnosti tudi njihovo zgornjo in spodnjo mejo. Optimizacija je zaključena, ko se vrednost cenilke ali pa parametrov samih spreminja manj kot je predpisana toleranca. Na sliki C.1 je v logaritemskem merilu prikazan primer poteka vrednosti cenilne funkcije med optimizacijskim procesom. Kot vidimo, cenilka le počasi konvergira k minimalni vrednosti - tipično je za to potrebnih nekaj tisoč iteracij.

Omenili smo že, da bo kvaliteta kalibracije odvisna od kvalitete (točnosti) kalibracijskih pozicij. Ne glede na način zajemanja točk pa moramo upoštevati, da optimizacijski algoritmom zmanjšuje napake le v kalibracijskih točkah, zato naj te kar najbolj reprezentativno predstavljajo delovni prostor manipulatorja. Poleg tega naj bodo meritve izvedene v čim več različnih položajih oz. orientacijah, da bi se "vzbudili" vsi parametri modela.

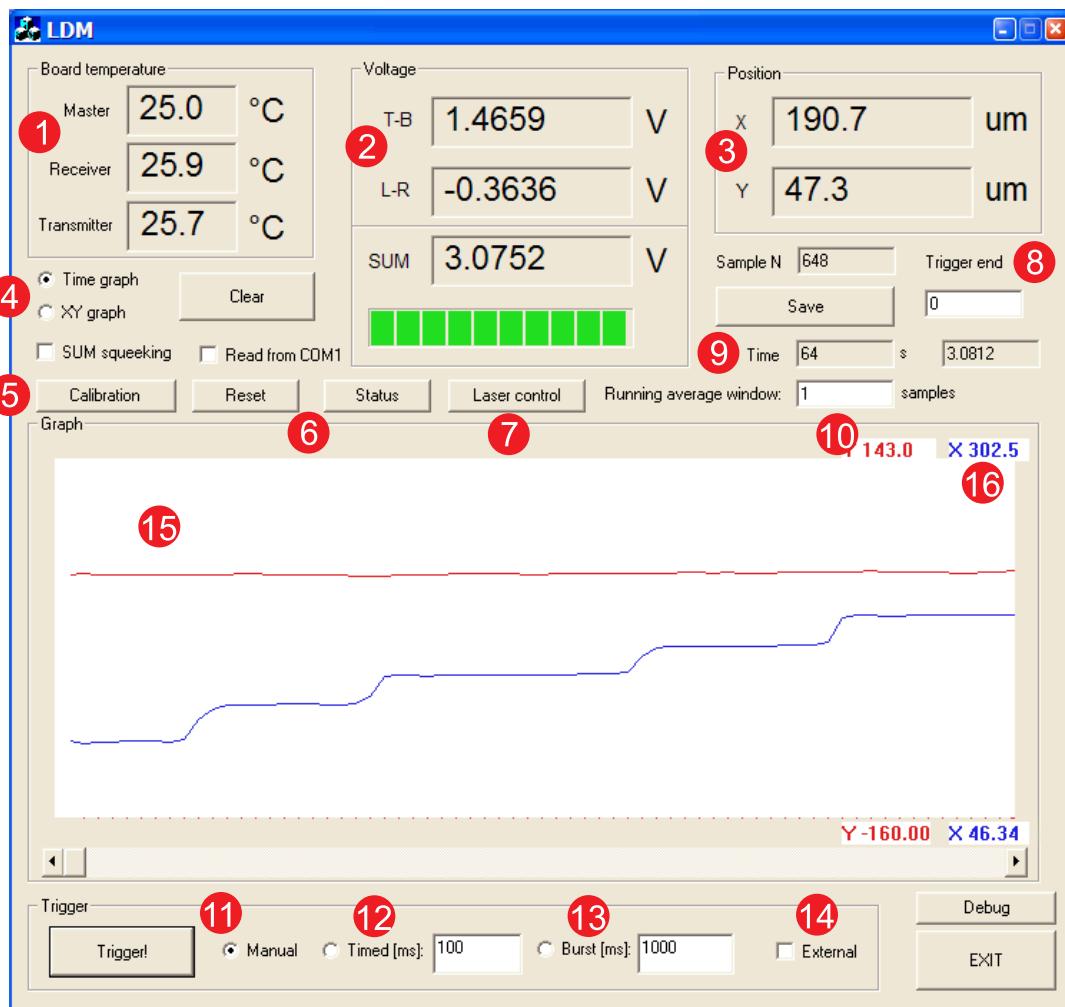


Slika C.1: Potek vrednosti cenilke pri optimizaciji

D Programska oprema za zajem meritev

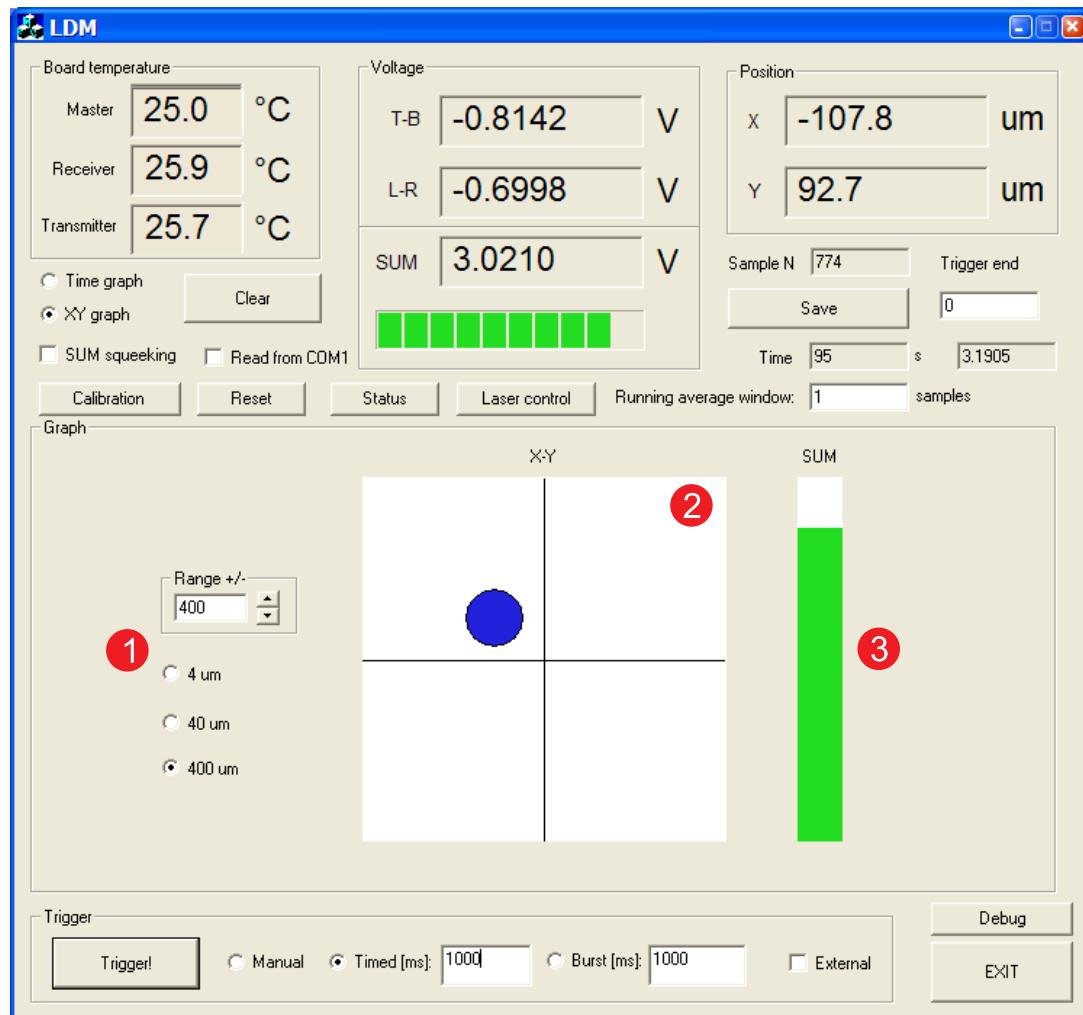
Za zajem meritev iz sistema je bila v okolju MS Visal C++ razvita lastna aplikacija. Ta z glavno enoto merilnega sistema komunicira preko USB vodila s pomočjo gonilnika proizvajalca vmesnika. Omogoča nam nadzor nad pomembnimi parametri delovanja sistema, zajem meritev ter avtomatsko vodenje kalibracijskega procesa, vključno s krmiljenjem mikropozicionirnih stopenj in proženjem referenčnih merilnih sistemov. V nadaljevanju je kratek opis funkcionalnosti aplikacije ob treh različnih prikazih, ki jih uporabljamo pri delu:

1. Osnovni pogled s časovnim grafom meritev, ki ga lahko uporabljamo pri meritvah geometrijskih lastnosti objektov, dinamičnih meritvah itd.
2. Osnovni pogled z XY grafom, ki nazorno prikazuje moč signala (t.j. optično moč na detektorju - uporabno pri grobi nastavitvi položaja komponent) ter položaj detektorja glede na referenčni žarek. S pomočjo zadnjega lahko enostavno opravimo fino nastavitev smeri žarka oz. njegovo poravnavo s smerjo gibanja merjenega objekta.
3. Kalibracijski zaslon, ki omogoča nastavitev in nadzor parametrov kalibracije, ki nato poteka avtonomno.



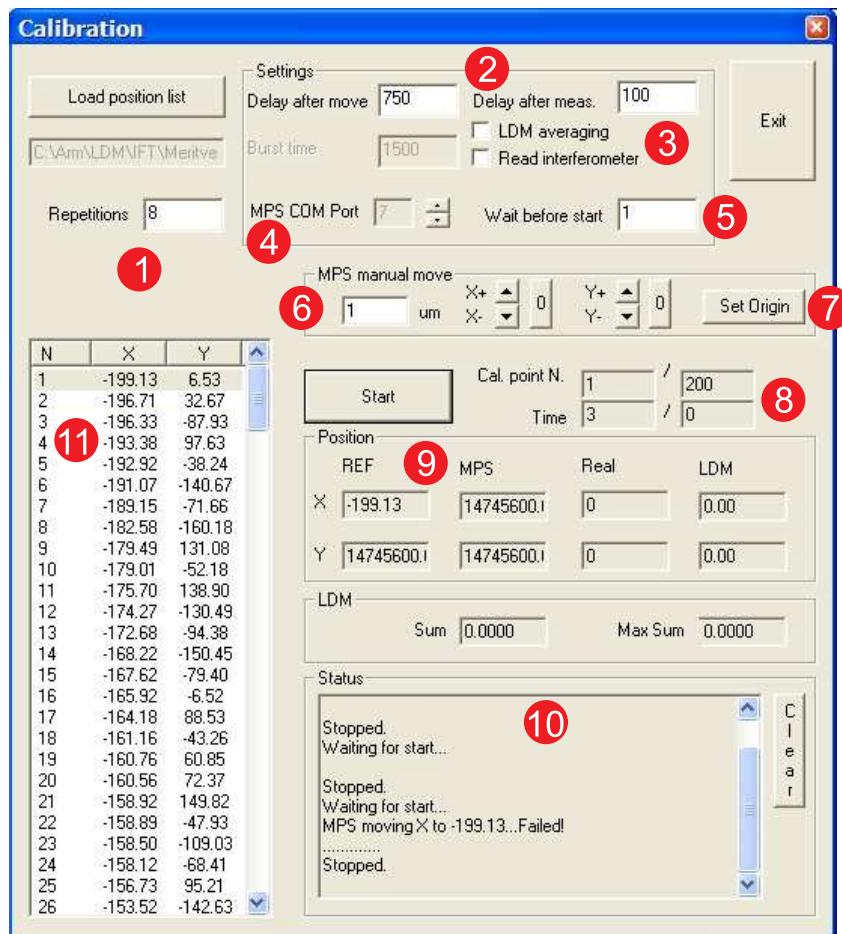
Slika D.1: Merilna aplikacija - časovni prikaz meritov

- 1 - prikaz temperatur posameznih enot
- 2 - zajete napetosti v skladu v opisu v 3.2
- 3 - izračunana pozicija v skladu z enčbami 3.1 in 3.2
- 4 - izbira časovnega oz. X-Y grafa pozicije
- 5 - dostop do kalibracijskega zaslona
- 6 - ponastavitev in statusne informacije o sistemu
- 7 - prikaz obratovalnih podatkov laserske diode (temperatura, tok, optična moč)
- 8 - izmerjeno in želeno število vzorcev
- 9 - pretečen čas meritve
- 10 - velikost okna za tekoče povprečenje
- 11 - izbira ročnega (enkratnega) proženja
- 12 - izbira časovnega (intervalnega) proženja
- 13 - izbira in nastavitev časa zajema z maksimalno vzorčno frekvenco
- 14 - izbira zunanjega (strojnega) proženja
- 15 - časovni graf X in Y meritov
- 16 - maksimalne in minimalne X,Y vrednosti



Slika D.2: Merilna aplikacija - XY prikaz pozicije

- 1 - izbira prikazanega območja XY grafa
- 2 - X-Y prikaz pozicije
- 3 - prikaz optične moči na detektorju



Slika D.3: Merilna aplikacija - kalibracijski zaslon

- 1 - nalaganje in število ponovitev izbranih kalibracijskih točk
- 2 - nastavitev zakasnitev pred in po premiku mikropozicionirnikov oz. zajemu meritve
- 3 - možnosti povprečenja meritov in proženja interferometrov
- 4 - nastavitev vmesnika mikropozicionirnikov
- 5 - zakasnitev pred začetkom kalibracije (omogoča umiritev razmer)
- 6 - ročno premikanje pozicionirnih stopenj
- 7 - nastavitev izhodišča pozicionirnih stopenj
- 8 - prikaz tekoče kal. točke ter pretečenega in preostalega časa kalibracije
- 9 - trenutne pozicije referenčnih merilnih sistemov, pozicionirnih stopenj ter laserskega merilnega sistema
- 10 - prikaz stanja
- 11 - seznam kalibracijskih točk

E Tehnične specifikacije uporabljenih instrumentov

E.1 Laserski interferometer Heidenhain ILM-1131

Tabela E.1: Tehnične specifikacije laserskega interferometra Heidenhain ILM-1131

Merilno območje	10 m
Ločljivost	0.1 nm
Maksimalna hitrost	2 m/s
Temperaturno območje	+15 °C ... +30 °C
Vlažnost zraka	15% ... 75% (brez kondenzacije)
Laserska enota	
Tip	He-Ne
Nazivna valovna dolžina	633 nm
Stabilnost frekvence	< $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ v 8 urah pri 20 ± 1 °C < $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ pri +15 ... +30 °C
Izhodna moč	< 1 mW, laser razreda 2
Življenska doba	30.000 ur
Premer žarka ($1/e^2$)	3.5 mm
Kompenzacija parametrov okolja - točnost	
Zračni tlak	< 0.5 hPa pri 800..1060 hPa
Temperatura zraka	< ± 0.3 °C
Zračna vlaga	± 5 %
Temperatura materiala	< ± 0.1 °C
Število senzorjev:	≤ 5

E.2 Laserski interferometer Renishaw ML10 + EC10

Tabela E.2: Tehnične specifikacije laserskega interferometra Renishaw ML10 + EC10

Laserska enota	
Merilno območje	40 m
Tip	He-Ne
Izhodna moč	< 1 mW, laser razreda 2
Nazivna valovna dolžina	632.990577 nm
Točnost frekvence	±0.05 ppm
Temperaturno območje	0 °C ... +40 °C
Vlažnost zraka	0% ... 95% (brez kondenzacije)
Kompenzacija parametrov okolja	
Temperatura zraka - območje	0 °C ... +40 °C
Temperatura zraka - točnost	±0.3°C
Zračni tlak - območje	750 mbar - 1150 mbar
Zračni tlak - točnost	< 0.5 hPa pri 800..1060 hPa
Zračna vлага - območje	0 % ... 95 %
Zračna vлага - točnost	20 %
Točnost kompenzacije val. dolž	±0.7 ppm
Temperatura materiala - območje	0 °C ... +40 °C
Temperatura materiala - točnost	± 0.1 °C
Optika za linearne meritve	
Točnost	± 0.7 ppm
Ločljivost	0.001 μ m
Največja hitrost	4 m/s
Optika za kotne meritve	
Aksialno območje	0 m - 15 m
Merilno območje	±175 mm/m
Točnost	±0.6 % ±0.5 ±0.1 M μ /mm
Ločljivost	0.1 μ m/m
Optika za merjenje premosti	
Aksialno območje	0.1 m - 4 m
Merilno območje	±2.5 mm
Točnost	±0.5 % ±0.5 ±0.15 M ² μ m
Ločljivost	0.01 μ m/m

E.3 Elektronska libela Wyler Minilevel NT

Tabela E.3: Tehnične specifikacije elektronske libele Wyler Minilevel NT

Merilno območje - obm. I	20 mm / m
Merilno območje - obm. II	2 mm / m
Občutljivost - obm. I	10 μm /m
Občutljivost - obm. II	1 μm /m
Analogni izhod	1 mV
Digitalni izhod	RS 485
Umiritveni čas	< 3 s
Meje pogreška	< 1 % polnega odklona + min. 1 digit
Temperaturna napaka	0.1 % polnega odklona
Temperaturno območje	0 °C ... +40 °C

F Optical deflection measuring system

Precision Engineering, Vol. 31, No. 3, str 188-195.



Available online at www.sciencedirect.com



Precision Engineering 31 (2007) 188–195

**PRECISION
ENGINEERING**

www.elsevier.com/locate/precision

Optical deflection measuring system

Miha Vrhovec^{a,*}, Igor Kovač^b, Marko Munih^a

^a Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenia

^b Institute of Production Engineering, Graz University of Technology, Kopernikusgasse 24, A-8010 Graz, Austria

Received 15 February 2006; received in revised form 5 June 2006; accepted 21 June 2006

Available online 7 September 2006

Abstract

A system for accurate real-time measurement of deflections was developed. A stable laser source is, by means of a single-mode fiber, coupled to an optical head located at one end of deformed structure. A detector circuit with a quadrant detector and processing electronics, located at the other end of the structure, communicates the resolved 2D position of the incident beam over a common digital bus. Experiments using interferometers were conducted in a climate-controlled chamber to evaluate system performance and verify the accuracy. A resolution of $0.1 \mu\text{m}$ is attainable in dynamic measurements. The system was calibrated and tested to yield measurement accuracy of $\pm 0.8 \mu\text{m}$ for $\pm 2\sigma$ probability over the measurement range of $\pm 300 \mu\text{m}$. Drift of the system in the experimental setup was determined to be less than $2 \mu\text{m}$ for measurement in both degrees of freedom within the 10 h period under constant environmental conditions.

© 2006 Elsevier Inc. All rights reserved.

Keywords: Optical deflection measuring; Real-time error compensation; Laser deformation measurement

1. Introduction

Optical methods have been used in various fields of science and industry in order to detect small deviations in position or angle. These systems often employ a laser source, producing an optical reference line, and a kind of position sensitive detector (PSD) to measure the deviation from the reference line. Different types of PSDs include segmented photodiodes, lateral-effect photodiodes and CCD detectors, among others. An autocollimator, e.g. such as described by Sohn et al. [1], uses a laser diode, PSD and a moving mirror to detect small changes in angle of the mirror. Armstrong and Fitzgerald [2] proposed an autocollimator comprising a CD player pick-up head and a reflecting surface. The head contains a laser source and photodiodes that can be used to establish the reflected beam deflection. Likewise, Fan et al. [3] used a DVD player head and a knife-edge principle in a straightness measuring system.

Similar systems were also used to measure geometrical errors of precision machinery, such as machine tools, coordinate measuring machines (CMMs) and others. When high accuracy is required, two different approaches can be used. First, errors

can be avoided with a proper design of the machine by means of a rigid construction and close manufacturing tolerances. Second, they can be compensated for in real-time during machine operation. The latter method was found to be more cost effective than the traditional error avoidance approach and has been under constant development in recent years. Error compensation includes two different concepts, namely the off-line and on-line compensation. Off-line methods can improve the accuracy by applying either mathematical models of errors or previously established calibration data. Although effective only to a certain extent, calibration techniques were shown to significantly improve the accuracy [4].

Random non-repeatable errors caused by machine load, friction, environmental and other sources can, however, only be overcome by measuring and compensating them in real-time. Huang and Ni [5] presented an error compensation system for CMMs with a five DOF measuring system for X and Y-axes and a two DOF measuring system for Z-axis of the machine. The first unit contains a He-Ne laser, optical components to generate four separate beams and PSDs to measure vertical and horizontal straightness, roll, pitch and yaw errors. The Z-axis unit measures only the straightness errors due to space and weight limitations. Additional PSDs were used to compensate the lateral drift of the laser beam. The achieved accuracy of the system was $1''$ for angle and $5 \mu\text{m}$ for translational errors. The

* Corresponding author. Tel.: +386 1 4768742; fax: +386 1 4768 239.
E-mail address: miha.vrhovec@robo.fe.uni-lj.si (M. Vrhovec).

problem of beam stability was addressed by Fan and Zhao in [7]. He used a fiber-coupled laser and a modulation circuit in order to diminish the lateral and angular beam drift. The resulting system stability was $0.3 \mu\text{m}$ at 1 m distance in 12 h period and the accuracy was $0.3 \mu\text{m}$ within $\pm 100 \mu\text{m}$ range. Feng [6] also used a laser coupled to a single-mode optical fiber in straightness measurement system. The obtained repeatability was $1 \mu\text{m}$ at 1 m distance and the drift was $3 \mu\text{m}$ in 10 min period. Recently, Kuang et al. [8] introduced a four DOF measurement system with a fiber-coupled laser with an accuracy of the straightness part of $\pm 2.5 \mu\text{m}$ and stability of $1.4 \mu\text{m}$ in 1 h interval.

In robotics, such systems were proposed to measure the deflections of a flexible robot structure. With lightweight manipulators, the assumption of rigid links is usually not valid. The existence of deflections and vibrations makes the measurement of the link deformations necessary. Attempts to measure deformations indirectly have been made, using strain gauges, fibre-optic and other sensors. Actual deflections are then inferred from these partial strain information by complex operations, which are often noisy and inaccurate. In this respect, optical methods are advantageous by measuring the deflections directly. Demeester and Van Brussel [10] presented a sensor system consisting of three laser diodes and three PSDs, mounted on opposite sides of a flexible link. Five components of total six DOF deflection are measured, excepting the elongation of the link. Xu and Tso [11] proposed an optical sensing system for measuring five DOF deflection of each flexible link and a compensation scheme to improve robot positioning accuracy. Yang [12] considered a simplified system, measuring only errors in the nominal motion plane, perpendicular to preceding joint axis. Tso et al. [13] demonstrated vibration control of a single flexible link by using a one-axis optical feedback system.

All previously mentioned optical systems have shown to significantly improve the accuracy of the mechanical structure. Nevertheless, they lack physical attributes (weight, dimension) or accuracy properties much needed for use in real machinery. Externally mounted sensitive components cannot be exposed to the industrial environment and may in different ways obstruct the operation of the machine. Moreover, an effective way to capture deflection data from multiple such systems is desired. In this paper, we present a solution with capability of static and dynamic measurement of deflections, developed for integration in precision mechanical systems at the University of Ljubljana. Simplicity, high accuracy and easy practical implementation were desired prime objectives. The system is distinctive for its small weight and compact dimensions, making it possible to locate it internal to a machine segment, robot or other structure. In this way, the normal functionality of the machine is unimpeded and at the same time, favorable operating conditions for the optical system can be attained.

2. Deflection measurement system

2.1. Measurement principle

In Fig. 1, a single link of a flexible structure is shown. The coordinate frame O_0 is placed at one end of the link and coin-

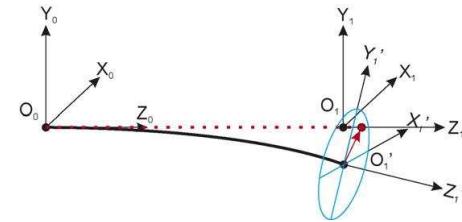


Fig. 1. A deformed link.

cides with an optical head producing a straight reference beam. At the other end of the link, a detector circuit establishes the position of the projected light spot in the \$O'_1\$ coordinate frame. The deflection from the straight line can be represented by a transformation from coordinate frame \$O_1\$ to \$O'_1\$. Since the error components in \$Z\$-direction (the elongation of the link) are usually very small, they can be neglected [11] within defined temperature conditions. By using a single reference beam and a quadrant detector, the linear displacements in the plane perpendicular to the beam (\$X\$ and \$Y\$ translational errors) can be measured. Often, the rotations around \$X\$- and \$Y\$-axes can also be inferred from this information, e.g. when only gravitational loads are present, or by assuming the dominant mode shapes in oscillating structures [13]. Therefore, at most four of total six components of deviation can be identified.

When the segment is undisturbed, the reference beam hits the center of the photodiode, producing equal output in each of the quadrants. Any deviation of the detector in the plane perpendicular to the beam causes a displacement of the light spot (Fig. 2). The maximum deviation from the center position is limited by the spot diameter and is usually $< 0.9r$. A simple measure of the displacement can be found as:

$$dX' = \alpha \frac{(V_B + V_C) - (V_A + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1)$$

$$dY' = \alpha \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (2)$$

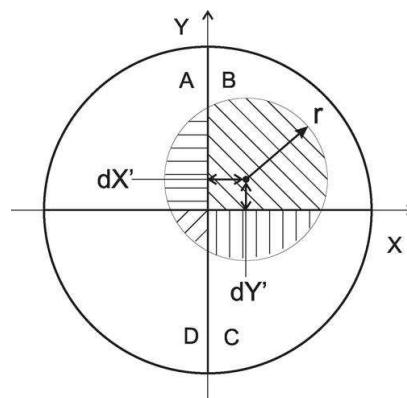


Fig. 2. A quadrant photodiode and an incident beam.

where V_A , V_B , V_C and V_D are the voltages proportional to illumination of respective photodiode quadrants and α is proportional to the beam diameter. These equations are exact only in case of a perfectly rectangular beam with a uniform intensity distribution. In reality, however, the circular shape and the beam intensity distribution cause significant non-linear deviations from these idealized equations, as it was discussed in [9]. The beam diameter also influences the resolution of the measurement. A complete theoretical characterization of the displacement curve is difficult because of the Bessel distribution of the beam [6] and has only limited applicability on account of beam irregularities, caused by lens and scattered light. An experimental calibration is therefore necessary.

The plane of the PSD is expected to be normal to the laser beam. Nevertheless, the bending of the link will cause an angular deviation of the link and the PSD plane. This will introduce a cosine error in the measurement and effectively change the sensitivity of the detector to the lateral movement, since it is now inclined with regard to the reference beam. But the extent of this sensitivity variation is in most cases very small. If we assume a uniform profile of the link, the Eqs. (3) and (4) describe the lateral and angular deflections of the link under point load at the end of the link, respectively [14]:

$$f = \frac{Fl^3}{3EI_Y} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{Fl^2}{2EI_Y} \quad (4)$$

Here, f and α denote the lateral and angular deflections, F the applied force, l the length of the link and I_Y is the area momentum of the link cross-section. The relation between the two is therefore:

$$\frac{\alpha}{f} = \frac{3}{2} \frac{1}{l}. \quad (5)$$

The equation demonstrates that the ratio of angular to the lateral deflection is inversely proportional to the link length. Similar relation can be found for a load distributed along the link (e.g. gravity load). At link lengths, greater than 30 mm, the sensitivity change results in less than 0.01% reading deviation, so this effect can be neglected.

2.2. System components and operation

The main components of the system are presented in Fig. 3. The laser control unit drives the laser diode producing a visible output wavelength of 670 nm. A feedback circuit provides a constant optical power output of the laser diode, which is coupled to a single-mode optical fiber. This is known to reduce the lateral and angular drift of the beam common to laser diodes. The beam emanating from a single-mode fiber has a constant, Bessel distribution and does not suffer from any spatial drift. The optical fiber is terminated by an optical head containing a lens system. It collimates the light emerging from the fiber, producing a beam with an approximate diameter of 1 mm and 0.5 mrad divergence. Through usage of an optical fiber and stable laser

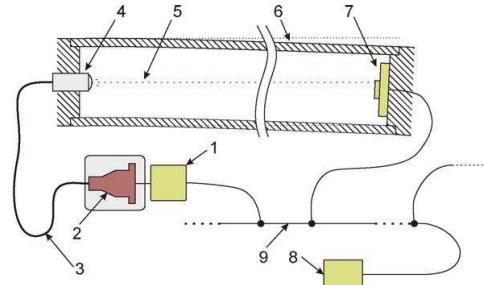


Fig. 3. Main system components: (1) laser driving unit, (2) laser diode, (3) optical fiber, (4) optical head, (5) reference beam, (6) deflected link, (7) detector circuit, (8) master circuit, and (9) digital bus.

driver components [6,8], a high-quality reference beam of an adequate stability is generated.

The detector circuit board is placed at the other end of the measured segment. A schematic diagram of the detector assembly is shown in Fig. 4. The incident beam hits the quadrant photodiode, consequently generating four photocurrents, proportional to optical power over each quadrant. These small currents are then amplified and converted to voltages, to be added and subtracted as per Eqs. (1) and (2). A 16-bit ADC digitizes the values, which are processed and stored by an onboard microcontroller. The quantization step (1 LSB) of the A/D conversion in the current system corresponds to approximately 0.01 μm resolution.

The distinct advantages of this measurement device are its small size and low weight. Since the optical head is separated from the laser source by the optical fiber, its dimensions can be kept very small. This also has an additional advantage of dislocating the heat source from critical mechanical components. The compactness of the detector was achieved by developing small size electronic boards. Merely the components needed for the purpose were included and space efficient surface-mount technology was utilized. The components are located on two stacked boards, which were size-optimized to meet the dimensions as specified in Table 1. The finished prototypes of the optical head and the detector unit are pictured in Fig. 5. Because both main parts of the system, the optical head and the detector unit, are of small physical dimensions, they can be completely contained in the measured segment. The entire optical path of the reference beam is then held in an enclosed space with stable environmental parameters, therefore some disturbing factors that affect similar systems, namely the ambient lightning and air turbulence, can now be minimized. Two example applications of the system are shown on Fig. 6.

A multitude of such detector units can be connected to a digital bus, all communicating with a single master unit. The exact moment when the deflection data is converted and stored can be defined by asserting the common trigger signal, thus synchronizing the measurement of all detector units. Alternatively, the measurement can be software triggered by an external controller or the detected position can be continuously output with the maximum sample rate. The master board contains the hardware facilities and protocols to transfer all deflection and control data to an external controller or computer. At this stage it is equipped

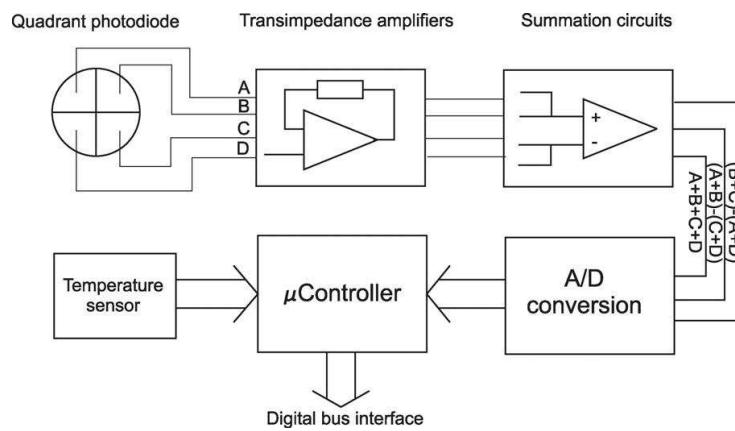


Fig. 4. Detector circuit board components.

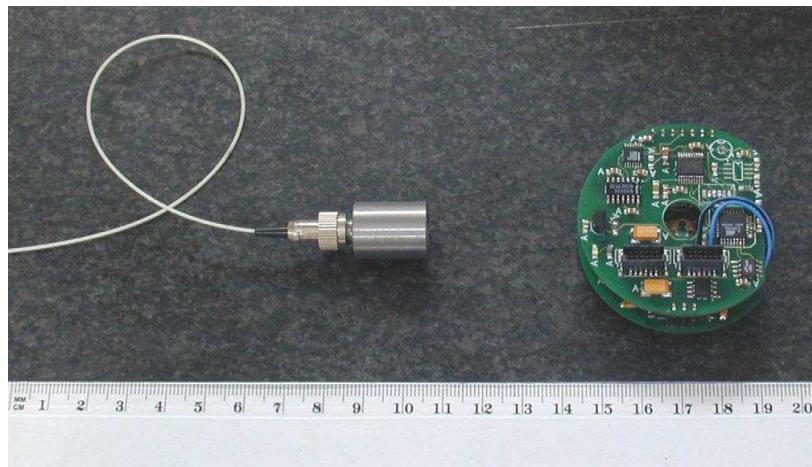


Fig. 5. The finished optical head and detector components.

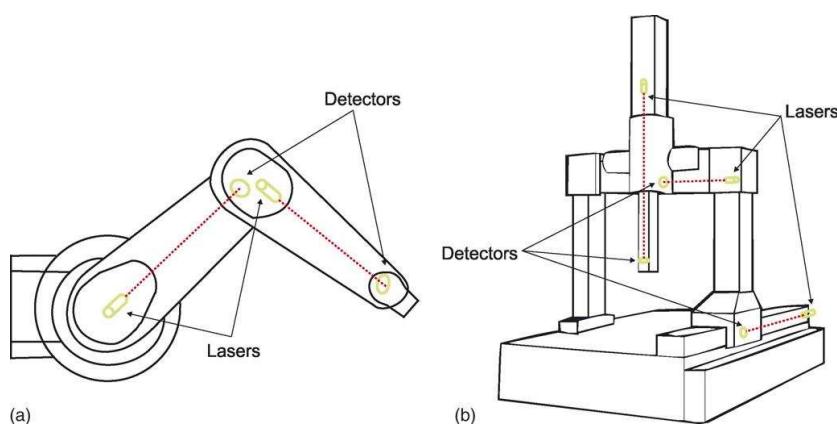


Fig. 6. Example applications of the measuring system: (a) in a robot and (b) in a CMM.

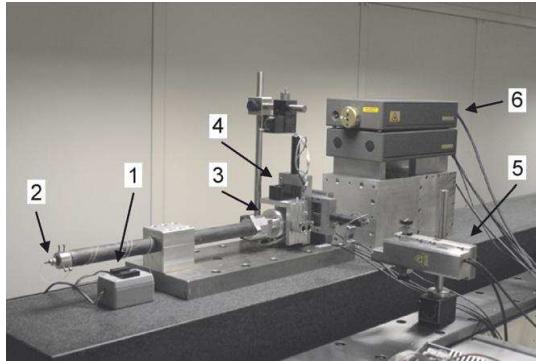


Fig. 7. Experimental system setup: (1) laser unit, (2) optical head, (3) detector, (4) micropositioning stages, (5) X -axis interferometer, and (6) Y -axis interferometer.

with an USB interface, enabling the system to be connected to any personal computer and capture data with a 1.2 kHz sampling frequency.

3. Experiments

3.1. Experimental setup

To characterize, calibrate and validate the new measurement system as proposed in Sections 2.1 and 2.2, an experimental setup as pictured in Fig. 7 was employed. The optical head was fastened to one end of a 0.6 m long carbon-fiber tube having 23 and 30 mm outer diameter, respectively. The practical implication of the tube was to contain the laser beam in stable (non-turbulent) environment and was not actively deformed. Instead, the detector was moved in the measuring plane by means

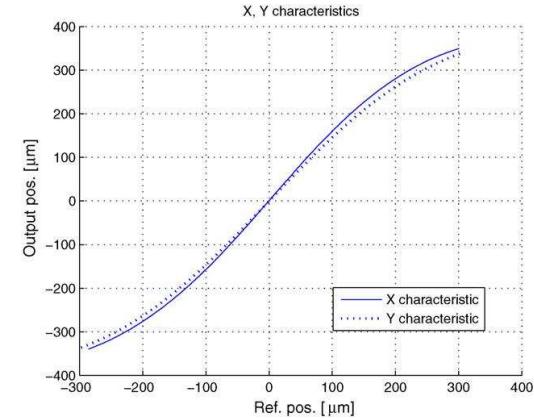


Fig. 8. X and Y detector response.

of two Physik-Instrumente M-150.10 micropositioning stages, arranged in a X - Y configuration. The measured resolution of the stages was approximately 0.2 μm and the bidirectional repeatability 2 μm . The detector was contained in aluminium housing and fastened to the positioning stages, which were, in turn, fixed to the base steel plate together with the tube and optical head. The whole setup was then rested on a massive granite table, providing a stable and vibration-free support.

To accurately measure the actual relative position of the detector, two laser interferometer systems were used. The horizontal movement was measured by the Heidenhain ILM-1131 interferometer and the vertical by Renishaw ML10+EC10 system. The stated resolutions of the reference measuring systems were 0.1 and 1 nm, respectively. In the laboratory environment, the accuracy of these systems is 0.1 μm , which was sufficient for the intended experiments. The retroreflectors were rigidly

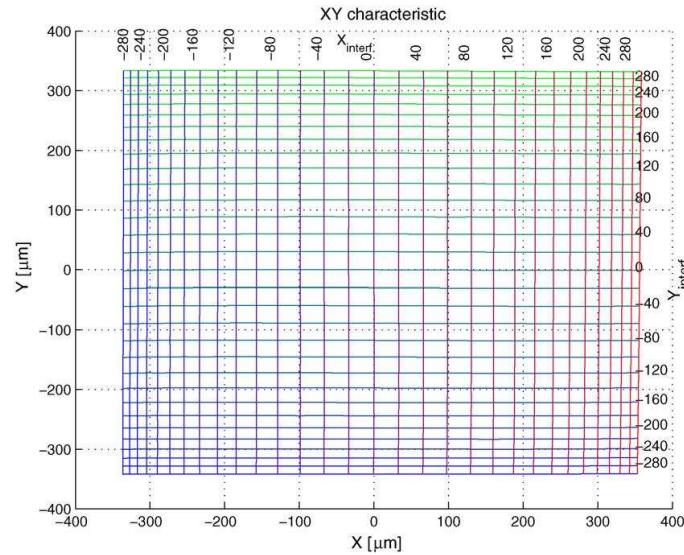


Fig. 9. 2D detector response.

mounted to the detector housing in the axes of quadrant photodiode in order to minimize errors caused by angular deviations of positioning stages.

The measuring setup was located in a climate-controlled chamber [15] at the Institute of Production Engineering, TU Graz, to avoid temperature induced deformations of the critical elements. A desktop PC was used to control the positioning stages and retrieve the captured data from deflection measurement system and both interferometers. A common trigger signal was used for exact synchronization of all measuring systems. At the same time, the temperature values of the surrounding air and the steel base were also acquired. A PC application for unattended execution and control of measuring sequences was developed, creating an automated calibration and test system. Therefore, it was possible to avoid any possible external disturbance to the measurements.

3.2. Results and discussion

The purpose of the experiments was to assess basic system characteristics, calibrate it and evaluate its accuracy properties. First, one-dimensional response curves of the detector were recorded (Fig. 8). Detector response in *X*-direction was measured with *Y*-axis in center position and for *Y*-direction with *X*-axis in center position. The curves were found concordant with theoretical predictions. With increasing distance from central region with good linearity, the sensitivity is falling because of circular beam shape and its distribution. The slight difference in sensitivity of *X*- and *Y*-axis originates from beam ovalness and deviations in analog electronics. Unwanted properties such as hysteresis and dead-zone were below the limit of detection. The position resolution of the system depends on well definable and measurable factors, such as electronic noise and A/D conversion resolution as well as on random circumstances, such as thermal conditions and air turbulence in the light path. The former amounts to less than $0.05 \mu\text{m}$ and the overall resolution was experimentally verified to be $0.1 \mu\text{m}$ in conditions, as specified in Section 3.1. In static measurements, the resolution can be increased by time averaging techniques.

Next, a 2D characteristic was measured (Fig. 9). Because of the above mentioned small irregularities in beam distribution and analog electronics, the response curves in *X*-axis direction depend on *Y*-axis coordinate and vice versa. For this reason, a 2D response calibration is necessary for accurate results. The procedure for acquiring Fig. 9 was as follows. The response curves of the detector in *X*-direction were recorded and the *Y* position was then shifted for $20 \mu\text{m}$ repeatedly across the measurement range in order to obtain the horizontal lines. The same was done with *Y*-axis for the vertical lines. The resulting curves in Fig. 9 are plotted in uncalibrated space, according to Eqs. (1) and (2). The *X*- and *Y*-axes represent the detector output coordinates and the plotted horizontal and vertical arrays correspond to actual positions as measured by the interferometers. It is evident that the sensitivity is falling with increasing distance from the center point. With the measurement range chosen as $-300 \mu\text{m} < X, Y < 300 \mu\text{m}$, the sensitivity on the edge is about one-third of maximum (center) sensitivity.

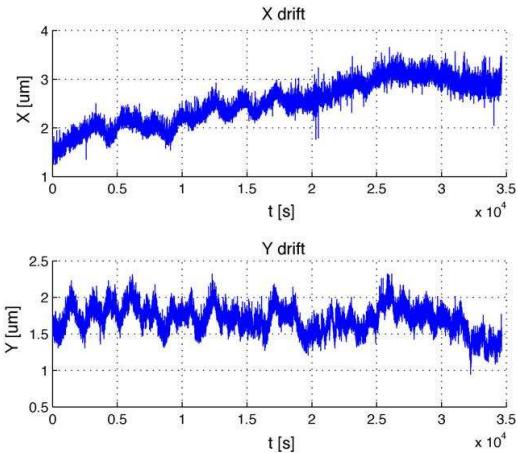


Fig. 10. Position drift of the system.

The system drift was also measured. In a thermally stable environment, the position was measured for a period of 10 h with 1 Hz sampling frequency. The positioning stages were left fixed in approximate center position of the detector. The results, shown in Fig. 10, indicate position reading drift of less than $2 \mu\text{m}$ for *X*-axis and $1 \mu\text{m}$ for *Y*-axis in the stated interval of 10 h. The likely sources of positional drift are mechanical deformations caused by the remaining temperature changes and small spatial deviations of the laser beam. The drift quantified here does not prevent higher degree of accuracy in shorter period of time. Successive calibrations, if possible, could bring the short term stability within $0.5 \mu\text{m}$ over 30 min time interval.

Finally, the system accuracy was tested. The data acquired for 2D characteristics presented in Fig. 9 was used to calibrate the system, after which the detector was moved into 400 random positions, uniformly distributed in the measuring range. The position output from our detector was calculated using 2D interpolation of the calibration data, and the true positions were measured simultaneously by the interferometers as reference values. The resulting positional deviations of successive measurements are in Fig. 11. It can be seen that the maximum error after detector calibration was $1.3 \mu\text{m}$ for the *X*-axis and $1 \mu\text{m}$ for the *Y*-axis. Slightly better agreement of the measured and reference position is visible in the *Y*-axis results. Also, small drift is present in *X*-axis position, since the duration of measurement was more than 30 min. The statistical distribution of the errors is in Fig. 12. As expected, the shape of the distribution is close to Gaussian (dashed line in the graphs). The standard deviations of the error data for *X*- and *Y*-axes amount to $\sigma_X = 0.4$ and $\sigma_Y = 0.35$, respectively. We can therefore expect with approximately 95% ($\pm 2\sigma$) certainty the measurement result is within $\pm 0.8 \mu\text{m}$ of the true value. These values could be further improved by applying better calibration and position estimation methods, e.g. spline instead of linear interpolation. Again, accuracy can be further enhanced in static or quasi-static conditions by averaging the measurements in a sufficient time interval.

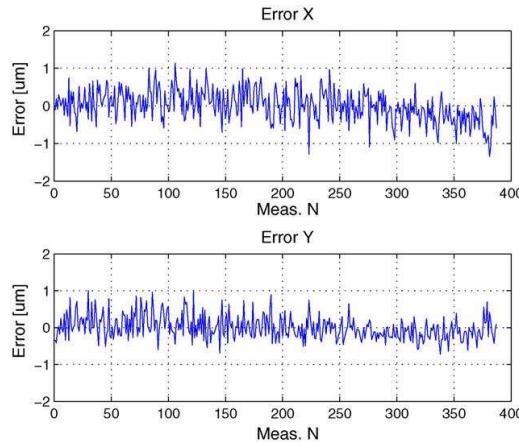


Fig. 11. Measurement error in test points.

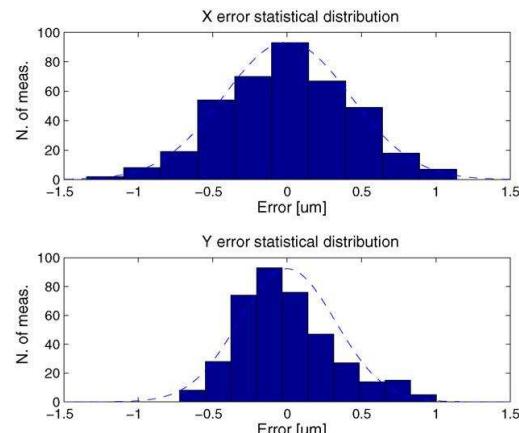


Fig. 12. Statistical distribution of measurement error.

The accuracy alleged here applies to the specific detector unit in the calibration setup. The misalignment of the PSD relative to the detector mounting has been taken into account by the calibration procedure. However, care must be taken when positioning the detector unit into the target system. The out-of-plane rotation of the unit will cause an observable cosine error if the mounting error is greater than 1.5° . Likewise, the in-plane ro-

Table 1
System characteristics

Range	X, $\pm 300 \mu\text{m}$; Y, $\pm 300 \mu\text{m}$
Resolution	$0.1 \mu\text{m}$
Accuracy ($\pm 2\sigma$)	$\pm 0.8 \mu\text{m}$
Maximum sample rate	1.2 kHz
Trigger response time	<20 μs
Trigger modes	Software, hardware, continuous
Optical head dimensions	$\varnothing 15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$
Optical head weight	20 g
Detector dimensions	$\varnothing 52 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$
Detector weight	25 g

tation error will exceed the resolution limit of the system if the misalignment is greater than 0.02° . By careful mounting, these errors can be minimized.

The system properties are gathered in Table 1. It must be noted that the measurement range, now equal to $\pm 300 \mu\text{m}$ could optionally be adjusted simply by changing the beam diameter. By increasing it, the range is correspondingly expanded, provided that the beam diameter remains smaller than the detector radius. Doing so, however, also proportionally reduces the positional resolution and accuracy.

4. Conclusion

An optical measuring system, capable of direct measuring of two translational degrees of freedom was presented, suitable specifically for measuring deformations in mechanical components. The system is composed of optical head producing a stable reference beam, and a detector board with digital interface. The system was calibrated and the resulting accuracy was found to be adequate for applications in precision systems. The verified value of resolution is at least $0.1 \mu\text{m}$ and the error distribution shows a standard deviation of $0.4 \mu\text{m}$. Stability tests in temperature-controlled environment indicate positional drift under $2 \mu\text{m}$ in 10 h in both DOF. Real-time static and dynamic measurements with sampling rates up to 1.2 kHz are possible. Multiple laser-detector sets can be connected to a single master board, thus measuring arbitrary number of DOF in a flexible mechanical system. The fact that the only necessary components in the affected structure are the modestly dimensioned optical head and detector unit, makes the integration of the system feasible in existing and future machinery. Being under the focus of commercial partners, a number of industrial applications is emerging.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the assistance of Boštjan Batagelj (University of Ljubljana), Primož Kušar (Jožef Stefan Institute) and members of Institute of Production Engineering, TU Graz.

References

- [1] Sohn YJ, Kwon JH, Choe OS. Portable autocollimators using the laser diode and the position sensitive detector. *Rev Sci Instrum* 1998;69:402–5.
- [2] Armstrong TR, Fitzgerald MP. An autocollimator based on the laser head of a compact disc player. *Measur Sci Technol* 1992;3:1072–6.
- [3] Fan KC, Chu CL, Liao JL, Mou JI. Development of a high precision straightness measuring system with DVD pick-up head. *Measur Sci Technol* 2003;14:47–54.
- [4] Kovač I, Frank A. Testing and calibration of coordinate measuring arms. *Precis Eng* 2001;25:90–9.
- [5] Huang PS, Ni J. On-line error compensation of coordinate measuring machines. *Int J Mach Tools Manuf* 1995;35:725–38.
- [6] Feng Q. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module. *Optics Laser Technol* 2004;36:279–83.
- [7] Fan KC, Zhao Y. A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques. *Int J Mach Tools Manuf* 2000;40: 2073–81.

M. Vrhovec et al. / Precision Engineering 31 (2007) 188–195

195

- [8] Kuang C, Feng Q, Zhang B, Liu B, Chen S, Zhang Z. A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module. *Sens Actuators A: Phys* 2005;125:100–8.
- [9] Golnabi H. Linearity in output signal of optical position-sensing detector systems. *Optics Laser Technol* 2000;32:311–6.
- [10] Deemester F, Van Brussel H. Real-time optical measurement of robot structural deflections. *Mechatronics* 1991;1:73–86.
- [11] Xu WL, Tso SK. Sensor-based deflection modelling and compensation control of flexible robotic manipulator. *Mech Mach Theory* 1998;33: 909–24.
- [12] Yang TW. Dynamic modeling based on real-time deflection measurement and compensation control for flexible multi-link manipulators. *Dynam Control* 2001;11:5–24.
- [13] Tso SK, Yang TW, Xu WL, Sun ZQ. Vibration control for a flexible-link robot arm with deflection feedback. *Int J Non-Linear Mech* 2003;38: 51–62.
- [14] Beitz W, Kuttner KH. Dubbel handbook of mechanical engineering; 1994.
- [15] Hirn C. Entwicklung eines klimatisierten Präzisionskomparators für Längen und Geradheitsmessungen bis 5 Meter. Technik report 19, no. 6, 1992. p. 23–6 [in German].

IZJAVA O AVTORSTVU

Izjavljam, da sem avtor te doktorske naloge, ki je plod raziskovalnega dela pod mentorstvom prof. dr. Marka Muniha. Že objavljeni dosežki drugih avtorjev so navedeni v Literaturi.

Ljubljana, 10. marec 2009

Miha Vrhovec