

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Aleš Zore

**RAZISKAVA VPLIVA MANIPULACIJE
Z ROBOTOM NA NEGOTOVOST
MERITEV DIMENZIJ IZDELKOV**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, 2024

Senat Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani je na seji dne, 08.09.2022 odobril kandidatu:

ALEŠ ZORE

temo za doktorsko disertacijo z naslovom:

Raziskava vpliva manipulacije z robotom na negotovost meritev dimenzij izdelkov

Research on the influence of robotic manipulation on the uncertainty of product dimension measurements

Komisija za doktorski študij Univerze v Ljubljani je po pooblastilu Senata Univerze v Ljubljani temo potrdila na seji dne: 18.10.2022.

Senat Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani je kandidatu na seji dne, 05.09.2024 priznal naslednje izvirne prispevke k znanosti:

- 1 Ovrednotenje vpliva kompleksnosti manipulacije z robotom na dimenzijska merjenja v merilni robotski celici.
- 2 Identifikacija vplivov hitrosti, razdalje in načina giba robota na dimenzijske meritve pri vstavljanju objektov v merilno napravo.
- 3 Opredelitev učinka robotskega prijemanja na negotovost dimenzijskih meritev kot posledica neželenega odstopanja orientacije osno-simetričnega merjenja.

Komisija za zagovor doktorske disertacije:

izr. prof. dr. Boštjan Batagelj , predsednik
prof. dr. Matjaž Mihelj, član
prof. dr. Janko Drnovšek, član
izr. prof. dr. Aljaž Kramberger, član
prof. dr. Niko Herakovič, član
prof. dr. Marko Munih, mentor



Dekan:
prof. dr. Marko Topič

Spodaj podpisani študent, **ALEŠ ZORE**, vpisna številka 64120155, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **RAZISKAVA VPLIVA MANIPULACIJE Z ROBOTOM NA NEGOTOVOST MERITEV DIMENZIJ IZDELKOV**,
IZJAVLJAM,

1. a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V: Ljubljani
Datum: 10. 9. 2024

Podpis študenta:



¹ Obkrožite varianto a) ali b).

Zahvala

Iskreno bi se zahvalil mentorju prof. dr. Marku Munihu za pomoč, usmerjanje in kritično razmišljanje tekom raziskovalne poti in predvsem v nastajanju te doktorske disertacije.

Zahvalil bi se podjetju Kolektor in posameznikom za možnost uporabe in sodelovanja z ARC-K.

Nadalje gre zahvala vsem kolegom iz Laboratorija za robotiko, Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani za vse kreativne odmore ob kavi, nasvete in dodatno pomoč pri reševanju raznoraznih problemov. Izpostavil bi Sebastjana Šlajpaha, ki je svojo ekspertizo poskrbel za urejen izgled grafov in tabel v disertaciji in za vso pomoč z oblikovanjem v okolju \LaTeX .

Zahvaljujem se študentom Mihi Zupančiču, Anžetu Baši in Maruši Petrovčič za pomoč pri zajemu meritev pri obravnavi vpliva trajektorije, za pomoč pri zasnovi in sestavi optičnega sistema zaznavanja zasukov in analizi zajetih meritev.

Zahvalil bi se Mancu, ki je nešteto dni in večerov poskrbela za Nika in Piko, da so mi bili zagotovljeni popolni pogoji za brezskrbno raziskovalno delo.

Zahvala gre tudi staršem, bratoma in razširjenemu krogu družine za spodbudo in podporo med študijem.

Zahvalil bi se tudi Andreji Mežan za slovnični pregled in ureditev disertacije.

Zahvala gre tudi Laboratoriju za robotiko in Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, ki sta omogočila izvedbo doktorskega študija.

Kazalo

Seznam uporabljenih kratic	xi
Seznam uporabljenih simbolov	xiii
Povzetek	1
Abstract	3
1 Uvod	5
1.1 Proizvodne meritve	6
1.2 Nadzor kakovosti in robotika	8
1.3 Cilji	11
2 Eksperimentalni sistem	15
2.1 Robotska celica	15
2.2 Merilni objekti	22
2.3 Statistične metode	24
2.3.1 Analiza merilnega sistema	24
2.4 Merilna negotovost in meroslovna sledljivost	27
2.4.1 Meroslovna sledljivost v praksi	28
3 Kompleksnost manipulacije z robotom	33
3.1 Vpliv manipulacije z robotom	33

3.2	Eksperimentalni scenariji manipulacije z robotom	34
3.3	Eksperimenti	41
3.3.1	Statistična porazdelitev dimenzijskih meritev	42
3.3.2	Magnet	43
3.3.3	PKR	46
3.4	Razprava	47
3.4.1	Magnet	48
3.4.2	PKR	49
3.4.3	Splošna razprava	50
4	Parametri trajektorije gibanja vrha robota	53
4.1	Navidezna daljica	53
4.2	Linearen gib in gib po sklepih	55
4.3	Število aktivnih sklepov	55
4.4	Eksperimenti	56
4.4.1	Linearen gib in gib po sklepih	57
4.4.2	Število aktivnih sklepov	58
4.4.3	Analiza variance – ANOVA	59
4.5	Razprava	64
4.5.1	Primerjava načinov giba robota	65
4.5.2	Število aktivnih sklepov	68
4.5.3	Splošna razprava	71
5	Prijemanje z robotom	73
5.1	Merilni sistem	74
5.1.1	Zaznavanje zasukov	75
5.2	Vpliv prijemanja z robotom	79
5.3	Eksperimenti	82

5.3.1	Verifikacija optičnega merilnega sistema zaznavanja zasukov . . .	82
5.3.2	Merjenje zasukov pri manipulaciji z robotom	83
5.4	Razprava	88
5.4.1	Verifikacija optičnega merilnega sistema	90
5.4.2	Vpliv prijemanja in izpenjanja	91
5.4.2.1	Zasuki okoli osi-x	92
5.4.2.2	Zasuki okoli osi-y	93
5.4.2.3	Zasuki okoli osi-z	93
5.4.3	Vpliv sile prijemanja	94
5.4.3.1	Zasuki okoli osi-x	95
5.4.3.2	Zasuki okoli osi-y	95
5.4.3.3	Zasuki okoli osi-z	95
5.4.4	Vpliv PME	96
5.4.5	Vpliv prijemanja na dimenzijske meritve	96
6	Zaključek	99
	Izvirni prispevki doktorske disertacije	103
	Literatura	105
	Dodatek A: Dodatek poglavju <i>Prijemanje z robotom</i>	111
	Dodatek B: Applied Sciences, 2021	121

Slike

2.1	Adaptivna robotska celica predstavljena na sejmu IFAM 2020 v Ljubljani (levo) in oštevilčenih pet modulov.	16
2.2	Predstavitev osi posameznih sklepov robota UR5e.	17
2.3	Prijemalo Weiss Robotics CRG 30-050 s sistemom izmenljivih prstov.	18
2.4	Sistem izmenljivih prstov. Kovinsko ohišje in pnevmatski cilinder sestavljata statični del, medtem ko je izmenljivi del sestavljen iz pnevmatskega čepa, izmenljivega kovinskega ohišja in 3D natisnjene delca.	19
2.5	Primerjalni merilnik Renishaw Equator.	20
2.6	Specialno pasivno mehansko vpenjalo - ležišče za fiksiranje objektov.	21
2.7	Obravnavani geometrijski karakteristiki objekta Magnet.	22
2.8	Obravnavane geometrijske karakteristike objekta PKR.	23
2.9	Točke merjenja objekta Magnet. Rdeči krogi nakazujejo točke merjenja premera, zeleni križci in rumeni kvadrati prikazujejo definiranje ravnin za merjenje višine.	24
2.10	Kalibracijska piramida.	29
3.1	Translatorni (a), rotacijski izmik (b) in kombinacija obojega (c).	35
3.2	Celoten avtomatiziran cikel operacij manipulacije z robotom.	37
3.3	Verjetnostna normalna porazdelitev za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet.	43
3.4	Verjetnostna normalna porazdelitev za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR.	44

3.5	Prikaz merilnih rezultatov MSA analize za geometrijsko karakteristiko 20 (premer) objekta Magnet za, ločeno, vse tri merilne metode PME in povprečje.	45
3.6	Prikaz merilnih rezultatov MSA analize za geometrijsko karakteristiko 30 (višina) objekta Magnet za, ločeno, vse tri merilne metode PME in povprečje.	45
3.7	Prikaz merilnih rezultatov MSA analize za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR.	46
4.1	Tlorisna ponazoritev navidezne daljice s točkami P0, P1, P2 in P3. . .	54
4.2	Variabilnost dimenzijskih meritev v odvisnosti od načina izvedbe giba robota, hitrosti in dolžine giba za objekt Magnet.	58
4.3	Variabilnost dimenzijskih meritev v odvisnosti od načina izvedbe giba robota, hitrosti in dolžine giba za objekt PKR.	59
4.4	Variabilnost dimenzijskih meritev v odvisnosti od števila aktivnih sklepov, hitrosti in zasuka v sklepih robota za objekt Magnet.	60
4.5	Variabilnost dimenzijskih meritev v odvisnosti od števila aktivnih sklepov, hitrosti in zasuka v sklepih robota za objekt PKR.	61
5.1	Postavitev linijskih laserskih senzorjev Omron in Micro-Epsilon znotraj delovnega območja PME.	74
5.2	Tlorisna ponazoritev postavitve linijskih laserskih senzorjev Omron in Micro-Epsilon.	76
5.3	Aproksimacija krožnice in detekcija markerja z LLS Micro-Epsilon. . .	77
5.4	Grafična ponazoritev osi valja in izračun zasukov α in β iz projekcij na YZ in XZ ravnini.	79
5.5	Aproksimacija valja z dvema krožnicama na podlagi meritev laserskih skenerjev Omron in Micro-Epsilon.	80
5.6	Zasuki α objekta za dotik ter izpenjanje z robotom in pri vseh treh silah prijemanja.	84
5.7	Zasuki β objekta za dotik ter izpenjanje z robotom in pri vseh treh silah prijemanja.	84

5.8	Zasuki γ objekta za dotik ter izpenjanje z robotom in pri vseh treh silah prijemanja.	85
5.9	Zasuki α objekta za dotik s prijemalom.	86
5.10	Zasuki α objekta pri izpenjanju.	86
5.11	Zasuki β objekta za dotik s prijemalom.	87
5.12	Zasuki β objekta pri izpenjanju.	87
A.1	Zasuki α objekta pri dotiku in sili prijemanja 50 % nazivne sile.	113
A.2	Zasuki α objekta pri dotiku in sili prijemanja 80 % nazivne sile.	113
A.3	Zasuki α objekta pri dotiku in sili prijemanja 100 % nazivne sile.	114
A.4	Zasuki α objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 80 % nazivne sile.	114
A.5	Zasuki α objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 100 % nazivne sile.	115
A.6	Zasuki β objekta pri dotiku in sili prijemanja 50 % nazivne sile.	115
A.7	Zasuki β objekta pri dotiku in sili prijemanja 80 % nazivne sile.	116
A.8	Zasuki β objekta pri dotiku in sili prijemanja 100 % nazivne sile.	116
A.9	Zasuki β objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 80 % nazivne sile.	117
A.10	Zasuki β objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 100 % nazivne sile.	117
A.11	Zasuki γ objekta pri dotiku in sili prijemanja 50 % nazivne sile.	118
A.12	Zasuki γ objekta pri dotiku in sili prijemanja 80 % nazivne sile.	118
A.13	Zasuki γ objekta pri dotiku in sili prijemanja 100 % nazivne sile.	119
A.14	Zasuki γ objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 80 % nazivne sile.	119
A.15	Zasuki γ objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 100 % nazivne sile.	120

Tabele

3.1	Scenariji robotske manipulacije za preučevanje sposobnosti merilnega procesa.	35
3.2	Operacije manipulacije z robotom sestavljene iz osnovnih operacij robota.	39
3.3	Hitrosti v in pospeški a izvajanja posameznih operacij manipulacije z robotom.	40
3.4	Izračuni Anderson-Darling metode preizkušanja normalne porazdelitve.	42
4.1	Scenariji kombinacije sklepov za preučevanje odvisnosti merilne negotovosti od števila aktivnih sklepov.	56
4.2	Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt Magnet pri virih variabilnosti: način robotskega giba, hitrost giba in dolžina giba.	62
4.3	Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt PKR pri virih variabilnosti: način robotskega giba, hitrost giba in dolžina giba.	62
4.4	Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt Magnet pri virih variabilnosti: Kombinacija sklepov, hitrost gibanja in zasuk sklepov.	63
4.5	Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt PKR pri virih variabilnosti: Kombinacija sklepov, hitrost gibanja in zasuk sklepov.	63
5.1	Izračun standardne deviacije središč aproksimiranih krožnic laserskih merilnikov, srednje lege zaznanega markerja ter zasukov α , β in γ v postopku verifikacije optičnega merilnega sistema.	82
5.2	Izračun srednjih vrednosti zasukov α , β in γ v postopku verifikacije optičnega merilnega sistema.	83

5.3	Srednje vrednosti in raztros zasukov α in β za scenarija manipulacije dotik in izpenjanje pri vseh treh silah prijemanja s prijemalom.	88
5.4	Povprečne spremembe zasukov $\Delta\gamma$ med zaporednimi meritvami in linearna aproksimacija spremembe zasukov $\Delta\gamma_a$	89
5.5	Izračuni MSA analize dimenzijskih meritev pri operacijah prijemanja za karakteristiko 20 objekta Magnet.	89
5.6	Izračuni MSA analize dimenzijskih meritev pri operacijah prijemanja za karakteristiko 30 objekta Magnet.	90

Seznam uporabljenih kratic

KRATICA	OPIS
AD	Anderson-Darling metoda preizkušanja normalne porazdelitve
ARC	Adaptivna robotska celica
KMS	koordinatni merilni stroj
KS	koordinatni sistem
MSA	analiza merilnega sistema
PME	primerjalni merilnik Renishaw Equator
SM	skenirni način merjenja
SM+	skenirni način merjenja z dodatno povečanim številom vzorčnih točk
SMO	srednja razdalja merilnega območja
SPC	statistična procesna kontrola
TCP	središčna točka vrha robota
TTM	metoda diskretnega dotikanja

Seznam uporabljenih simbolov

SIMBOL	ENOTA	OPIS
μ		srednja vrednost seta meritev
C_p		indeks sposobnosti
R		razpon meritev
α	°	kot rotacije objekta okoli osi x
β	°	kot rotacije objekta okoli osi y
γ	°	kot rotacije objekta okoli osi z
$\Delta\gamma$	°	sprememba zasuka okoli osi z med zaporednimi meritvami
$\Delta\gamma_a$	°	linearizirana ocena spremembe zasuka okoli osi z med zaporednimi meritvami
ϑ_i		i-ta os rotacije v sklepu robota UR5e
σ		standardni odklon

Povzetek

V doktorski disertaciji predstavljamo raziskavo vpliva manipulacije z robotom na izmerjeno negotovost dimenzij izdelkov. Delo obravnava robotsko merilno celico namenjeno statističnim procesnim meritvam. Z robotizacijo meritev v proizvodnih procesih robot postane del merilnega sistema in njegove lastnosti neposredno vplivajo na proces meritev. V sklopu doktorske disertacije je robot ter manipulacija z robotom obravnavana kot vplivni element na negotovost meritev dimenzij objektov.

Prvo poglavje predstavlja vpogled v statistične procesne meritve trenutno uporabljene v kosovni proizvodnji. Prikazani so kriteriji zmogljivosti merilnih sistemov in sistemov za vodenje proizvodnega procesa. Trenutno stanje robotizacije proizvodnih meritev in temeljna vprašanja disertacije zaključujejo uvodno poglavje.

Drugo poglavje predstavlja uporabljen eksperimentalni sistem – robotsko celico namenjeno statistični procesni kontroli. Poudarjene so ključne lastnosti uporabljenega sodelujočega robota UR5e in primerjalno-merilnega robot Renishaw Equator 300 (PME). Poglavje se nadaljuje z opisom dveh obravnavanih geometrijsko in dimenzijsko različnih tipov serijskih produktov. Šestim najbolj kritičnim dimenzijskim karakteristikam, vsebovanih v vsakodnevno statistično procesno kontrolo, sledi opis izvajanja in vrednotenja procedur analize merilnega sistema (MSA). Najbolj pogosti rezultati MSA so parameter sposobnosti C_g , standardni odklon σ in razpon meritev R v primeru vrednotenja sposobnosti merila ter parameter ponovljivosti in primerljivosti GRR (ang. repeatability and reproducibility) pri verifikaciji sposobnosti merilnega procesa. Sledi teoretični prikaz merilne negotovosti in meroslovne sledljivosti v praksi.

Izhodiščno vprašanje, ali ima manipulacija z robotom vpliv na dimenzijske meritve, je obravnavano v tretjem poglavju disertacije. V definiranih devetih različnih scenarijih manipulacije z robotom, od nič manipulacije do polne robotske manipulacije, je bil robot uporabljen kot manipulator za prenašanje in vstavljanje merilnih objektov v PME. Posamezen scenarij manipulacije z robotom vsebuje tri serije meritev s po

25 ponovitvami manipulacije z robotom in dimenzijskih meritev s PME. Vpliv manipulacije z robotom je obravnavan na podlagi procedure 1 MSA statistične analize. Poleg obravnave kompleksnosti robotske manipulacije sta bila ločeno obravnava način delovanja (diskretno dotikanje in skeniranje) in vzorčenja PME. Z višanjem kompleksnosti robotske manipulacije (dodajanje daljših gibov, večje spremembe v orientaciji in večkratna prijemanja) raztros meritev narašča, medtem ko razlika v raztrosu pri dveh načinih delovanja in pri različnem številu vzorčnih točk PME ni bila zaznavna.

V četrtem poglavju je posebna pozornost usmerjena v obravnavo trajektorije vrha robota. Izpostavljen je način interpolacije giba robota (linearen gib oziroma gib po sklepih), različne hitrosti giba, dolžina giba in število aktivnih sklepov za izvedbo robotskega giba. Prepoznan je vpliv na točnost in natančnost vrha robota. Napaka točnosti in natančnosti vrha robota je zaznana posredno preko raztrosa meritev dimenzij, večji raztros meritev dimenzij je posledica variabilnosti lege vstavljenega merilnega objekta v ležišču merilnika. Zajeti dimenzijski podatki so analizirani s proceduro 1 analize MSA, statistične neodvisnosti posameznih vplivnih parametrov trajektorije pa so nadalje obravnavane z metodo analize variance (ANOVA). Vsak izpostavljen parameter ima vsaj minimalen vpliv na točnost in natančnost robota oziroma na negotovost meritev dimenzij.

Zadnje poglavje je namenjeno obravnavi operaciji robotskega prijemanja. Za opazovanje spremembe orientacije objekta je zasnovan optični merilni sistem z dvema linijskima laserskima senzorjema. Poleg dimenzijskih meritev so opazovane razlike v vseh treh kotih orientacije pri samo dotiku in izpenjanju z robotom. Zasuk okoli vertikalne osi osno-simetričnega objekta je izrazitejši izpenjanju s primerjavo samo dotika. Zasuka okoli preostalih dveh osi nista izrazita. Glede na spremembe med dotikom in izpenjanjem so razlike v zaznanih zasukih med različnimi apliciranimi silami prijemanja praktično zanemarljive.

Ključne besede: robot, proizvodne meritve, merilna negotovost, merjenje dimenzij, primerjalne meritve, manipulacija z robotom, robotizacija meritev

Abstract

IN this doctoral thesis, we present research on the influence of robotic manipulation on the uncertainty of product dimension measurements. We have been studying a robotic measurement cell dedicated to statistical process measurements. By robotizing process measurements, the robot becomes part of the measurement system, and the properties of the robot directly influence the measurement process. As part of the PhD thesis, the robot and robot manipulation were considered influential elements in the uncertainty of object dimension measurements.

The first chapter provides insight into statistical process measurements currently used in the process industry. Performance criteria for measurement and process control systems are presented. The introductory chapter concludes with the current state of the art of robotic process measurement and the fundamental issues of the thesis.

Chapter 2 presents the experimental system used – a robotic cell for statistical process control. It highlights the key features of the UR5e collaborative robot and the Renishaw Equator 300 comparative principle based measurement robot (PME). The chapter describes the two geometrically and dimensionally different types of serial products considered. The six most critical dimensional characteristics in the daily statistical process control are followed by a description of the implementation and evaluation of the measurement system analysis (MSA) procedures. The most common MSA outputs are the capability parameter C_g , the standard deviation σ and the range of measurements R in the case of the evaluation of the capability of a gauge, and the repeatability and reproducibility parameter GRR in the case of the verification of the capability of a measurement process. This is followed by a theoretical demonstration of measurement uncertainty and metrological traceability in practice.

Chapter 3 of the thesis addresses the initial question of whether robot manipulation impacts dimensional measurements. Nine different manipulation scenarios, ranging from zero manipulation to full manipulation, used the robot as a manipulator to

carry and insert measurement objects into the PME. Each robot manipulation scenario consists of three measurement runs with 25 repetitions, each of which is a robot manipulation and PME dimensional measurement. The effect of robot manipulation is discussed based on procedure 1 MSA statistical analysis. In addition to addressing the complexities of robotic manipulation, the mode of operation (discrete touch and scan) and PME sampling were addressed separately. As the complexity of the robotic manipulation increases (adding longer movements, larger changes in orientation, and multiple grasps), the scatter of the measurements increases. However, no difference in scatter was detectable for the two modes of operation and for different numbers of PME sampling points.

In Chapter 4, special attention is paid to the trajectory of the robot's end-effector. The way of interpolating the robot's motion (linear or joint motion), the different velocities of the motion, the length of the motion, and the number of active joints to perform the robot's motion are highlighted. The influence on the accuracy and precision of the robot tip is identified. The error in the accuracy and precision of the robot tip is detected indirectly through the variability of the dimension measurements. The more significant variability of the dimension measurements is due to the variability of the position of the inserted measurement object in the fixture. The captured dimensional data were analysed using the MSA procedure 1, and the statistical independencies of the individual influential trajectory parameters are further addressed using the analysis of variance (ANOVA) method. Each exposed parameter has at least a minimal influence on the robot's accuracy and precision or on the uncertainty of the dimensional measurements.

The last chapter focuses on the robotic grasping operation. An optical measurement system with two line laser sensors is designed to observe the change of orientation of an object. In addition to the dimensional measurements, the differences in all three orientation angles are observed when the robot is only touched and released. The rotation about the vertical axis of the axisymmetric object is more pronounced in the self-touch comparison. The rotation about the other two axes is not pronounced. Considering the variation between touch and release, the differences in the perceived twist between the different applied gripping forces are practically negligible.

Key words: robot, process measurement, measurement uncertainty, dimensional measurement, comparative measurement, robot manipulation, measurement robotization

1 Uvod

VEDNO večje zahteve po kakovosti izdelkov v industriji, tako v smislu procesne proizvodnje kot v smislu kosovne proizvodnje, narekuje stalen razvoj proizvodnega procesa. Zaradi visokih tolerančnih zahtev dimenzij izdelkov je potrebno nenehno izboljševati proizvodni proces ali izboljšati obstoječe sisteme nadzora kakovosti.

Dosedanji pristopi so zagotavljali zadostno kakovost izdelkov in nadzor proizvodnega procesa. Na primer, v avtomobilski industriji je statistična procesna kontrola (ang. statistical process control - SPC) [1–3] ustaljena metoda nadzora kakovosti in procesov. Več tehnik SPC, ki vključujejo histograme, kontrolne diagrame ali diagrame razpršenosti, lahko oceni zmogljivost oziroma sposobnost proizvodnega procesa. Hkrati se s pomočjo statistične obdelave meritev predvidi potrebne spremembe v nastavitvah procesa.

V meritvah proizvodnih procesov, ki imajo sočasno namen nadzora kakovosti, velja koordinatni merilni stroj (KMS) za referenčni merilnik. Kljub vsestranskosti in visoki ločljivosti ima KMS veliko omejitev, med katerimi izstopajo predvsem časovna zahtevnost meritev, temperaturna odvisnost od okolice in vpliv operaterja pri vstavljanju in vpetju merjenca (objekta).

Delovanje KMS v primerjalnem načinu ali uporaba namenskih primerjalnih merilnikov predstavlja enostavnejši pristop meritev dimenzij. Kljub manjšemu naboru zmogljivosti, se v primerjalnem načinu izniči sistematični pogrešek in dodatno zmanjša odvisnost oziroma vpliv okolice.

Robot v osnovi zagotavlja točne in natančne gibe in s tem namenom lahko z njim nadomestimo operaterja za manipulacijo in vstavljanje objektov v merilne naprave ali pa na sam vrh robota namestimo merilno napravo samo, na primer laserski skener. Posledično robot postane del merilnega sistema, lastnosti robota pa neposredno vplivajo na proces meritev dimenzij. Z vpeljavo robota v merilni sistem se zmanjša oziroma

odpravi vpliv operaterja-človeka, poveča zanesljivost in zmanjša negotovost meritev.

Na račun staranja robota, mehanskih obrab sklepov, kinematičnih napak in preostalih mehanskih napak sicer konstantno ponavljajoče se gibanje robota pridobiva na pozicijskem in orientacijskem odklonu od zelene lege. Posledično pričakujemo povečanje negotovosti merilnih rezultatov. Lega vstavljenega objekta v merilni napravi je orientacijsko in translacijsko izmaknjena od zelene lege, s tem pa se v procesu meritev izmerijo druge točke na površini objekta od zelenih.

Ne gre samo za vpliv robotskega mehanizma, predvsem na orientacijsko odstopanje v legi vstavljenega objekta v merilni napravi vpliva tudi operacija robotskega prijemanja s prijemalom. Nezaželen zasuk ob prijemu in tudi izpustu (osno-simetričnega) objekta je na račun ne-sočasnega stika posameznih prstov z objektom. Nezaželena napaka v fazi prijema je torej lahko posledica napak robotove točnosti in natančnosti ter tudi zaradi kinematičnih in mehanskih napak prijemala. Pomembno vlogo pri odstopanju v legi objekta ima tudi naleganje objekta s podlago, kjer je merjenec položen.

Robotizacija proizvodnih meritev je mogoča in se že izvaja v kosovni proizvodnji, toda nobena izmed dosedanjih raziskav ne navaja vpliva manipulacije z robotom na proizvodne meritve. Z izpostavljenimi raziskovalnimi vprašanji smo želeli v okviru naše disertacije raziskati in kasneje tudi ovrednotiti vpliv kompleksnosti manipulacije (tj. število različnih operacij manipulacije) z robotom, trajektorije gibanja in prijemanja na negotovost kontaktnih meritev dimenzij. Zanimalo nas je, ali različna kompleksnost manipulacije z robotom, različne trajektorije gibanja in različno število prijemanj in izpustov, različno vplivajo na negotovost dimenzij meritev.

1.1 Proizvodne meritve

Statistična procesna kontrola je metoda vodenja kakovosti, ki temelji na uporabi statistike za vodenje celotnega procesa [2]. S tem se zagotovi tekoče in neprekinjeno delovanje procesa ter omogoči proizvodnjo več izdelkov, ki ustrezajo dogovorjenim zahtevam. To se enosmerno odraža na številu manj zavrženih produktov, ki bi bili potrebni dodatne obdelave, sočasno pa je zmanjšana absolutna količina odpadnega/izvrženega materiala. SPC metode lahko uporabimo v vsakem procesu, pri katerem merimo izhodne veličine produktov in jih neposredno primerjamo z referenčnimi vrednostmi.

Prednost uporabe procesnih meritev pred drugimi metodami vodenja kakovosti je

v sposobnosti zgodnje zaznave in odprave nepravilnosti znotraj samega procesa.

Pri opredelitvi zmogljivosti (sposobnosti) procesa je potrebno upoštevati statistično analizo samega procesa, na podlagi statističnih parametrov srednje vrednosti procesa μ in standardnega odklona σ . V kombinaciji z SPC metodami je v uporabi več statističnih kriterijev sposobnosti, kot so na primer razmerje med točnostjo in tolerančnim območjem (ang. precision to tolerance ratio – PTR) [4–11], število neodvisnih kategorij podatkov (ang. number of distinct categories – NDC) [5, 11], ponovljivost in primerljivost (ang. repeatability and reproducibility – R&R) [8, 11, 12] ter ločljivost (ang. discrimination ratio – DC) [11, 12]. V grobem lahko kriterije razdelimo v dve kategoriji, ki temeljita na:

- primerjavi predvidenega tolerančnega območja obravnavanega izdelka (procesa) z variabilnostjo merilnega sistema σ ,
- ujemanju variabilnosti procesa σ_p z variabilnostjo merilnega sistema σ .

Na račun svoje preprostosti so kriteriji PTR najbolj razširjeni. Njihov osnovni namen je izračunati uporabljen delež tolerančnega območja TOL zaradi spremenljivosti meritev σ_m . Splošna oblika je zapisana z enačbo (1.1), konstanta k ustreza mejnemu številu standardnih odklonov. Običajno je k enak vrednosti 6 (interval 6σ z 99,7 % stopnjo zaupanja).

$$PTR = \frac{k \sigma_m}{TOL} \quad (1.1)$$

Kriteriji NDC, odstotek ponovljivosti in primerljivosti (%GR&R) ter DC temeljijo na spremenljivosti procesa in meritev. Nadalje, kriterij NDC se pogosto navaja tudi kot razmerje med signalom in šumom (ang. signal to noise ratio – SNR).

Prvo skupino kriterijev zmogljivosti je potrebno upoštevati pri procesu merjenja in pri izbiri merilnega sistema. V primeru vodenja procesa, izbira merilnega sistema temelji na uporabi kriterijev iz druge skupine. V številnih primerih, ko želimo na podlagi podatkov neposredno iz posameznih meritev določiti spremenljivost procesa, je potrebno izbrati merilni sistem z upoštevanjem obeh skupin kriterijev hkrati.

V literaturi nižja vrednost PTR kriterijev od mejne vrednosti (običajno določena med 5-10 % [8, 13, 14]) pomeni sprejemljivo merilno metodo. Kriterij NDC ima nasprotno obravnavanje vrednosti. Višja vrednost pomeni bolj sprejemljivo merilno metodo,

mejna vrednost zadostne sprejemljivosti pa je običajno nastavljena na 5 [1, 15]. Potrebno je poudariti, da ni navedeno, kako so bile te mejne vrednosti določene.

Prvi kriterij, kateremu je bila v 80. letih prejšnjega stoletja posvečena največja pozornost, je kriterij točnosti C_p (ang. precision indeks, Enačba (1.2)) [6]. Sodi med PTR kriterije, vrednost pa se določi kot razmerje med definiranim tolerančnim območjem T in šestkratnikom standardnega odklona meritev $6\sigma_p$. Zaradi svoje preprostosti pa ne zagotavlja odklona od sredine tolerančnega območja, zato je bil naknadno definiran kriterij natančnosti C_a (Enačba (1.3)). Parameter d predstavlja polovico tolerančnega območja T , μ predstavlja srednjo vrednost meritev, medtem ko je m središče med zgornjo in spodnjo tolerančno mejo.

$$C_p = \frac{T}{6 \sigma_p} \quad (1.2)$$

$$C_a = 1 - \frac{|\mu - m|}{d} \quad (1.3)$$

Kombinacija obeh omenjenih kriterijev tvori kriterij C_{pk} (Enačba (1.4)). ZTM in STM predstavljata vrednosti zgornje in spodnje tolerančne meje. Poudariti moramo, da omenjene kriterije C_p , C_a in C_{pk} lahko uporabimo le v primeru normalne porazdelitve merilnih podatkov.

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{ZTM - \mu}{3 \sigma}, \frac{\mu - STM}{3 \sigma} \right\} = \frac{d - |\mu - m|}{3 \sigma} \quad (1.4)$$

1.2 Nadzor kakovosti in robotika

V industriji se večinoma uporablja dvostopenjski nadzor kakovosti in vodenja procesa. Prvo stopnjo sestavljajo ročne meritve operaterjev z merilnimi pripravami in napravami na gosti časovni skali. Z manjšo frekvenco so obravnavane referenčne meritve izbranih vzorcev, ki predstavljajo drugo stopnjo. Kot standard za referenčne meritve se je uveljavil KMS. Poleg dobrih lastnosti, kot so visoka natančnost, točnost in ločljivost, ima KMS nekaj pomembnih pomanjkljivosti, kot sta časovna zahtevnost in odvisnost od okolice, v obliki temperature in vlage. Časovna zahtevnost v povratno zanko referenčnih meritev vnaša časovni zamik, posledično meritve niso izvedene v realnem času. Nenazadnje, nezanemarljivo z vstavljanjem, pozicioniranjem in vpetjem znotraj KMS na merilno negotovost KMS vpliva tudi operater [16, 17].

Merjenje KMS v primerjalnem načinu ima lastnost kompenzacije vpliva parametrov okolja [18–20]. Dodatno se izniči vpliv kinematične napake merilnika, saj identična sistematična napaka vpliva v operaciji merjenja etalona in objekta/merjenca. Posledično se lahko merilnik nahaja v bližini proizvodne linije, s poudarkom na rednem umerjanju z etalomom.

Kombinacija dimenzijskih toleranc objektov, hitrosti proizvodnega procesa, časovne potratnosti referenčnih meritev in vpliva operaterja stremi k avtomatizaciji proizvodnih meritev. Avtomatizacija in zlasti robotizacija proizvodnih meritev skrajša čas procesa meritev, poveča zanesljivost in zmogljivost meritev ter zmanjša oziroma izniči vpliv operaterja pri vstavljanju in vpetju merjenca [21–26].

Robota so avtorji v merilnih sistemi uporabili na dva načina, kot manipulatorja objektov [24–26] ali kot nosilca merilne naprave [21–23]. Rosati et al. [24] so robota uporabili za paletizacijo naključno pozicioniranih objektov po opravljenih optičnih meritvah dimenzij. Lemeš et al. [25, 26] so s 5-osnim robotom prinesli objekt v delovno območje KMS in objekt držali v prijemu med procesom merjenja. Posledično so meritve vsebovale vibracije robota. V obeh navedenih primerih je možno razbrati odstranitev vpliva operaterja na meritve. Altinisik et al. [21], Kirachi et al. [22] in Kirachi et al. [23] so izkoristili prilagodljivost robotske aplikacije in na vrh robota namestili laserski skener oziroma optični KMS. Čas merjenja se je kljub povečanju vzorčnih točk znatno zmanjšal v primerjavi z referenčnimi meritvami KMS. Vendar, kljub veliki prilagodljivosti oziroma vsestranskosti robotskega merilnega sistema, v smislu merjenja objektov različnih dimenzij in oblik, s sistemom robot-laserski skener, avtorji niso mogli dostopati in izmeriti vseh zadanih geometrijskih karakteristik objektov. Nenazadnje je sistem uporaben tudi za objekte večjih dimenzij, npr. avtomobilska karoserija, s tolerančnim območjem vsaj 3 mm ($\pm 1,5$ mm).

Osnovna naloga zagotavljanja kakovosti je elementarna, vedno meriti enako na enak način. Industrijski roboti imajo v povprečju karakteristiko pozicijske natančnosti v območju 0,01 mm - 0,05 mm (karakteristike točnosti proizvajalci navadno ne navajajo), zato v osnovi izpolnjujejo zahteve za izvajanje operacij za zagotavljanje kakovosti, izvajanje identičnih operacij na enak način.

Točnost in natančnost robota sta lastnosti, ki definirata, kako blizu se je robot sposoben približati želeni legi in kako natančno se v to isto lego vrne. Poleg ostalih karakteristik delovanja robota sta točnost in natančnost definirani v standardu

ISO 9283 [27].

Področje točnosti in natančnosti industrijskih robotov je dobro raziskano. Pozicijsko in orientacijsko odstopanje vrha robota, ki vplivata na točnost in natančnost robota sta posledica napak vodenja robota, interpolacijskega algoritma, kinematičnih napak, dinamičnih napak in mehanskih napak [28]. Avtorji so v svojih raziskavah najpogosteje izpostavili vplive hitrosti gibanja robota [29–33], obremenitev v točki vpetja orodja robota (TCP, ang. Tool center point) [29, 32–34], dolžino izvedenega robotskega giba [30, 33, 34], lokacijo vrha robota znotraj delovnega prostora robota [35, 36] in, nenazadnje, vplive kinematičnih modelov [37–41].

Offodile et al. [29], Offodile et al. [30], Brink et al. [31], Sirinterlikci et al. [32] ter Mehrez et al. [33] so izpostavili hitrost gibanja robota kot vplivni parameter z največjim vplivom na karakteristiki točnosti in natančnosti robota. Offodile et al. [30], Brink et al. [31], Vocetka et al. [34], Sirinterlikci et al. [32] in Mehrez et al. [33] so izpostavili parameter obremenitve vrha robota. Višje obremenitve, podobno kot višje hitrosti, oslabijo delovanje robota v smislu večjih napak točnosti in natančnosti. Offodile et al. [29], Vocetka et al. [34] in Mehrez et al. [33] so iskali vpliv dolžine giba na karakteristiki točnosti in natančnosti, vendar niso potrdili statistične odvisnosti. Nadalje so Slamani et al. [35] in Riemer et al. [36] pokazali vpliv lege vrha robota znotraj delovnega prostora robota na točnost in natančnost. Bližje ko se vrh robota nahaja zunanemu robu delovnega območja, slabši sta karakteristiki točnosti in natančnosti, kar je v skladu s poznavanjem Jacobijeve matrike mehanizma. V navezavi na večsmerno točnost in natančnost so Vocetka et al. [34] poudarili vpliv smeri prihoda v želeno lego na karakteristiki točnosti in natančnosti robota.

Vse predhodno omenjene raziskave vplivnih parametrov na točnost in natančnost robota temeljijo na sledenju/merjenju vrha robota. Shiakolas et al. [38] so izračunali oziroma ocenili najpomembnejši karakteristiki robota na podlagi Denavit-Hartenberg kinematičnega modela [42]. Osnovni kinematični metodi so dodali neničelne komponente dolžin segmentov d_i in a_{i-1} in zasukov med segmenti α_{i-1} . Podobno so Azadivar et al. [37] dodali pozicijsko negotovost v posameznih sklepih robota in iskali največje odstopanje med doseženo in želeno lego pri uspešno izvedeni nalogi vstavljanja (ang. peg-in-hole).

Točnost in natančnost robota sta pomembni tudi z ekonomskega vidika. Mehrez et al. [33] svetujejo uporabo srednjih hitrosti gibanja robotov, saj je pri teh hitrostih giba-

nja zadovoljiva hitrost proizvodnega procesa ter minimalna količina izvršenih izdelkov. Večja točnost in natančnost robota prav tako neposredno vplivata na kakovost izdelkov, zlasti v procesu sestave. V primerih zahtevane izjemne točnosti vrha robota so vzpostavljene metode za kompenzacijo pozicijske napake. Metode temeljijo na upoštevanju predvidenega pozicijskega odstopanja [28, 40] ali s sprotnimi metodami sledenja vrha robota [43, 44].

Besedna zveza manipulacija objekta z robotom ne zajema zgolj premikanja objektov, temveč tudi operacijo prijemanja in izpusta z robotskim prijemalom. Pri aplikaciji precizne robotske sestave je zelo pomembno optimalno prijemanje. Kluz et al. [45] so iskali optimalno orientacijo vrha robota z robotskim prijemalom glede na objekt in s tem posledično izboljšali sposobnost procesa sestavljanja. Na statistični način so prikazali, da v primeru cilindričnih objektov orientacija vpliva na učinkovitost robotske operacije.

1.3 Cilji

Naštete dosedanje raziskave prikazujejo, da je robotizacija proizvodnih meritev mogoča in se že izvaja. Robotizirane proizvodne meritve so fleksibilnejše in hitrejšje od trenutno obstoječih merilnih postopkov uporabljenih v kosovni proizvodnji. Nenazadnje je tudi minimiziran vpliv človeškega faktorja. Toda dosedanje raziskave so bile usmerjene zgolj v izboljšave samega merilnega sistema zaradi vpeljave robota in ne posvečajo dodatne pozornosti vplivu manipulacije z robotom na proizvodne meritve.

Prav s tem namenom bomo v naši disertaciji raziskali vpliv manipulacije z robotom pri stregi objektov v kontaktni dimenzijski merilnik. Robot prej ni bil upoštevan kot del merilnega sistema, s tem delom pa postaja robot del merilnega sistema, torej optimalni robotski pristopi lahko prispevajo k manjši negotovosti meritev objektov.

Na podlagi dosedanjih raziskav in ugotovitev smo naslovili naslednja raziskovalna vprašanja:

1. Ali ima manipulacija z robotom vpliv na dimenzijske meritve?

V izhodiščnem razmišljanju se sprašujemo, ali ima vsakršna manipulacija objekta z robotom vpliv na končne dimenzijske meritve. Primarni poudarek je na dilemi, ali vpliv manipulacije z robotom na meritve dimenzij obstaja. Cilj vprašanja je pokazati, da se večja kompleksnost manipulacije (večje število operacij manipula-

cije) objekta z robotom pri vstavljanju objekta v vpenjalno napravo primerjalno-merilne naprave preslika v večjo negotovost meritev dimenzij.

2. **Kateri parametri trajektorije giba robota vplivajo na kontaktne dimenzijske meritve?**

Različni robotski gibi, torej različne trajektorije vrha robota, se odražajo v različnih odstopanjih dosežene lege od zahtevane oziroma želene lege vrha robota. Identificirali smo vplivne parametre hitrost, dolžino in način robotskega giba ter, dodatno, število aktivnih sklepov za izvedbo robotskega giba. Odstopanje v poziciji in orientaciji vrha robota, posledično vstavljenega objekta, se odraža v merjenju drugih točk na objektu od predvidenih oziroma zahtevanih.

3. **Kateri so vplivni parametri preciznega prijemanja z robotskim prijemalom, ki rezultirajo predvsem v nezaželenem odstopanju orientacije objekta v fazi prijemanja?**

Zaradi napak točnosti in natančnosti robota, mehanskih napak in kinematičnih napak prijemala eden izmed prstov prijemala pride v stik z objektom pred drugim. To lahko privede predvsem do nezaželenne rotacije (osno-simetričnega) objekta v prijemalu kljub prijemanju po obliki.

Vrednotenje vpliva manipulacije robota na dimenzijske meritve je slonelo na uporabi Adaptivne robotske celice (ARC), ki je bila načrtovana in sestavljena z namenom robotiziranih proizvodnih meritev v okviru projekta GOSTOP (Gradniki, orodja in sistemi za Tovarne prihodnosti). Osnovna gradnika celice sta sodelujoči robot UR5e in primerjalno-merilni paralelni robot Renishaw Equator (PME), kot poenostavitev KMS. Robot UR5e je bil zadolžen za manipulacijo in strego objektov, medtem ko je bil PME zadolžen za izvedbo kontaktnih dimenzijskih meritev.

V procesu manipulacije je robot pred izvedbo dimenzijskih meritev iz dane začetne lege in z izbrano manipulacijo vstavil objekt v pasivno mehansko vpenjalno napravo (ležišče) v delovnem prostoru PME. Ležišče zagotavlja stabilno vpetje objekta za izvedbo dimenzijskih meritev. Merilne sete smo obravnavali z metodo analize merilnih sistemov (MSA) procedure 1 ter drugimi statističnimi metodami, saj je bil poudarek na raztrosu meritev dimenzij pri več ponovitvah meritev referenčnega objekta.

Doktorska disertacija je razdeljena na štiri poglavja. V Poglavju 2 je predstavljen eksperimentalni sistem, ki smo ga uporabili skozi celotno doktorsko disertacijo. Poleg robotske celice, namenjene meritvam dimenzij v kosovni proizvodnji, sta predstavljena

tudi merilna objekta in statistične metode, ki smo jih uporabili. V Poglavju 3 smo raziskali vpliv kompleksnosti manipulacije z robotom na meritve dimenzij. Vpliv kompleksnosti manipulacije bo izražen v smislu sprememb standardnega odklona dimenzijskih meritev s primerjalnim merilnikom. Vplivi različnih parametrov trajektorije gibanja robota so predstavljeni v Poglavju 4. Različni parametri trajektorije se odražajo na različnih trajektorijah vrha robota in posledično v različnih napakah točnosti in natančnosti. Vplivni parametri prijemanja so predstavljeni v Poglavju 5. Različna kompleksnost manipulacije z robotom in prijemanje objekta z različnimi silami se različno manifestirajo v spremembi orientacije objekta v vpenjalni napravi merilne naprave. Posamezne raziskave so temeljile na predpostavki o nekoleriranih vplivnih veličinah.

2 Eksperimentalni sistem

To poglavje predstavlja osnovo doktorske disertacije – Eksperimentalni sistem, ki ga sestavlja Adaptivna robotska celica (ARC) s svojimi moduli. Celica je namenjena merjenju dimenzij izdelkov v kosovni proizvodnji in je prilagodljiva za številne različne objekte. V sklopu disertacije smo podrobneje raziskali vplive manipulacije z robotom z obravnavo dveh geometrijsko in dimenzijsko različnih merilnih objektov, poimenovanih objekt Magnet in objekt PKR. V nadaljevanju poglavja je predstavljena metoda analize merilnih sistemov MSA, ki smo jo uporabili kot osrednjo statistično orodje in indikator vpliva manipulacije z robotom na merilno negotovost meritev dimenzij. Poglavje je zaključeno z merilno negotovostjo in sledljivostjo v primeru uporabe ARC.

2.1 Robotska celica

Doktorska disertacija sloni na uporabi ARC, robotski celici namenjeni statistični procesni kontroli. S pomočjo ARC so proizvodne meritve izvedene samodejno brez posredovanja operaterja in s tem je izničen vpliv operaterja. Robotska celica je bila razvita v Laboratoriju za robotiko v sodelovanju s podjetjem Kolektor v okviru projekta GOSTOP – Gradniki, orodja in sistemi za tovarne prihodnosti.

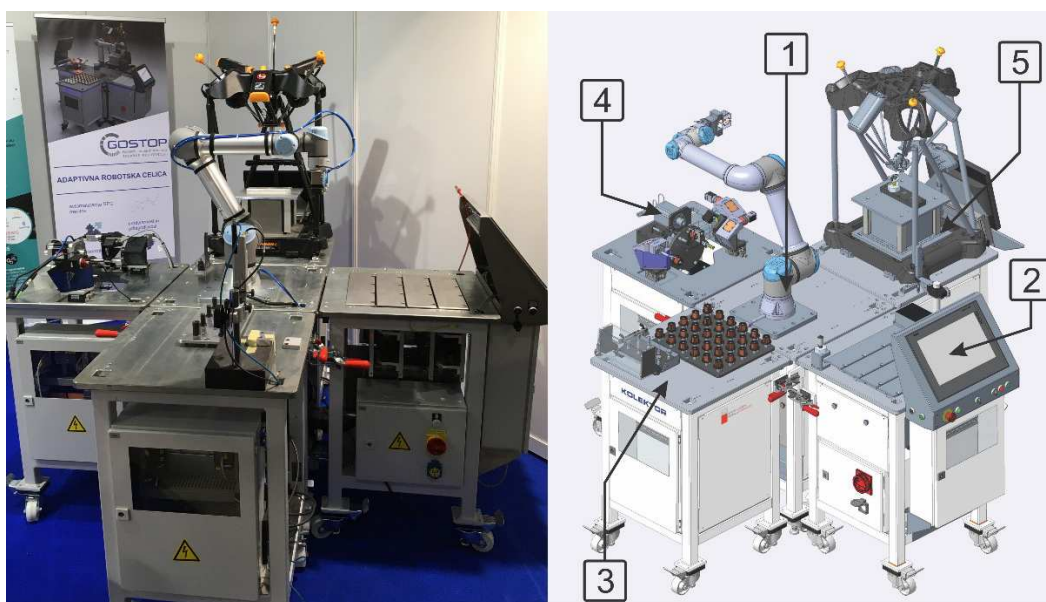
Celotna zasnova celice, tako mehanska kot programska, je modularna in s tem primerna različnim konfiguracijam robotske celice kot tudi uporabe različnih modulov. V obravnavani konfiguraciji celica sestoji iz petih modulov, 1) osrednji modul z robotom, 2) modul z zalogovniki, 3) modul za dostavo merilnih pladnjev z objekti, 4) modul za optične meritve in 5) modul za kontaktne meritve s primerjalnim merilnikom (Slika 2.1). ARC torej omogoča kontaktne in ne-kontaktne meritve dimenzij objektov. Na osrednjem modulu z robotom je nameščen sodelujoči robot UR5e proizvajalca Universal Robots, na katerem je bilo nameščeno sodelujoče servo prijemalo CRG 30-050 proizvajalca Weiss Robotics. Na modulu za kontaktne meritve je nameščen primerjalno-merilni

robot Renishaw Equator 300.

Že začetne meritve so indicirale, da ima zaradi narave merjenja manipulacija z robotom izrazitejši vpliv na variabilnost kontaktnih meritev v primerjavi z ne-kontaktnimi meritvami, zato v sklopu disertacije modula za optične meritve nismo obravnavali. Uporabili smo preostale štiri module, modul z robotom, modul za dostavo pladnjev z objekti, modul za kontaktne meritve in modul z zalogovniki. Modul z zalogovniki smo uporabili, saj so v posameznih zalogovnikih pred prahom in vplivom okolice shranjeni izmenljivi prsti, ležišča in referenčni kosi posameznih objektov.

Sodelujoči robot UR5e

Sodelujoči robot UR5e je 6-osni robot antropomorfne konfiguracije. Vsak izmed sklepov se lahko zavrti $\pm 360^\circ$, maksimalna hitrost posameznega sklepa pa znaša $\pm 180^\circ/\text{s}$. Poimenovanje sklepov robota od spodaj navzgor (Slika 2.2) je sledeče: B–Base, S–Shoulder, E–Elbow, W1–Wrist 1, W2–Wrist 2 in W3–Wrist 3. Specificirana maksimalna obremenitev je 5 kg, medtem ko je maksimalni doseg 850 mm. Najvišja linearna hitrost gibanja orodja znaša 1 m/s oziroma $\pm 180^\circ/\text{s}$ po posameznih sklepih



Slika 2.1: Adaptivna robotska celica predstavljena na sejmu IFAM 2002 v Ljubljani (levo) in oštevilčenih pet modulov: 1) osrednji modul z robotom, 2) modul z zalogovniki, 3) modul za dostavo merilnih pladnjev z objekti, 4) modul za optične meritve in 5) modul za kontaktne meritve s primerjalnim merilnikom Equator.

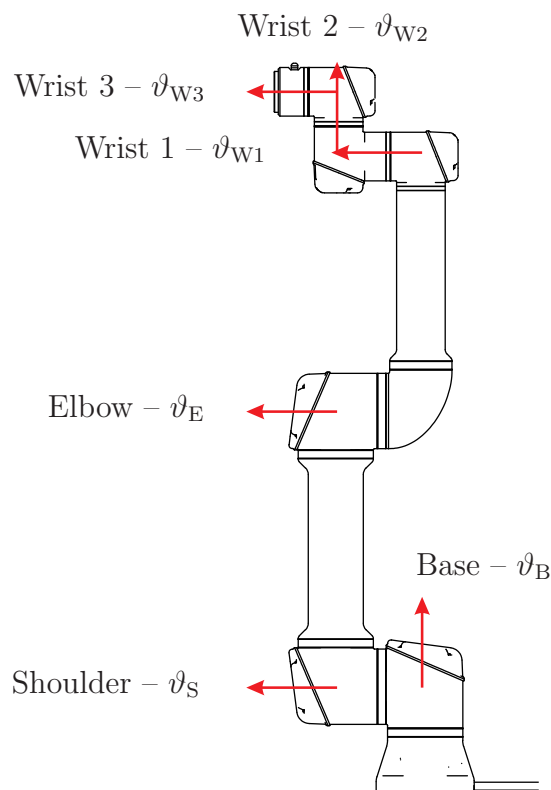
robota. Pri polni obremenitvi in polni linearni hitrosti orodja pozicijska natančnost robota znaša $\pm 0,03$ mm.

Z vgrajenim senzorjem sile in navorov na vrhu robota in merjenju tokov v motorjih v posameznih sklepih je robot sposoben zaznati sile interakcije z okolico, zato je robot primeren tako za klasične industrijske aplikacije kot tudi za sodelujoče aplikacije.

Poleg zagotavljanja dodatne varnosti lahko sposobnost zaznavanja interakcije z okolico uporabimo tudi za bolj zahtevne operacije manipulacije robota, kot je denimo vstavljanje čepa (ang. peg in hole) ali pa zagotavljanje optimalnejše lege prijema z iskanjem minimalne sile in navorov na vrhu robota.

Krmilnik robota, poleg standardnih digitalnih ter analognih vhodov in izhodov, omogoča tudi številne komunikacijske protokole, kot so TCP/IP, Ethernet socket, Modbus TCP/IP, ProfiNet itd.

Širok nabor povezljivosti in izraba lastnosti zaznavanja interakcije sta bila poglobljena parametra za izbiro robota UR5e pri sestavi ARC. Namreč, z različnimi komuni-



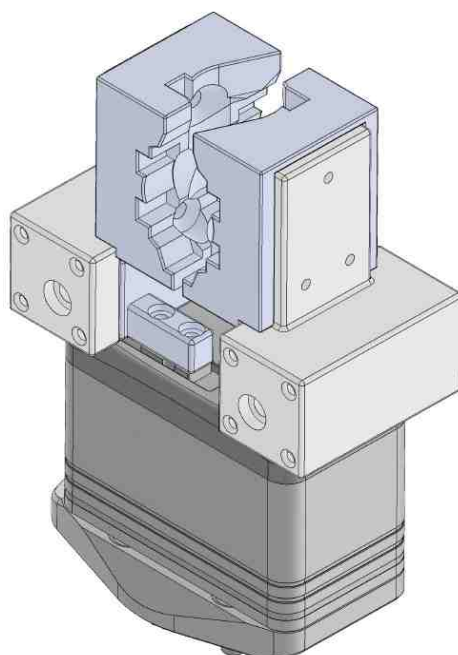
Slika 2.2: Predstavitev osi posameznih sklepov robota UR5e. Poimenovanje robotskih sklepov: B–Base, S–Shoulder, E–Elbow, W1–Wrist 1, W2–Wrist 2 in W3–Wrist 3.

kacijskimi protokoli lahko robota s krmilnikom povežemo s številnimi različnimi programirljivimi logičnimi krmilniki (PLK), pri zaznavanju sil in navorov lahko z ustrezno manipulacijo objektov z robotom izvedemo atributivne meritve (GO NOGO) z merilnimi trni.

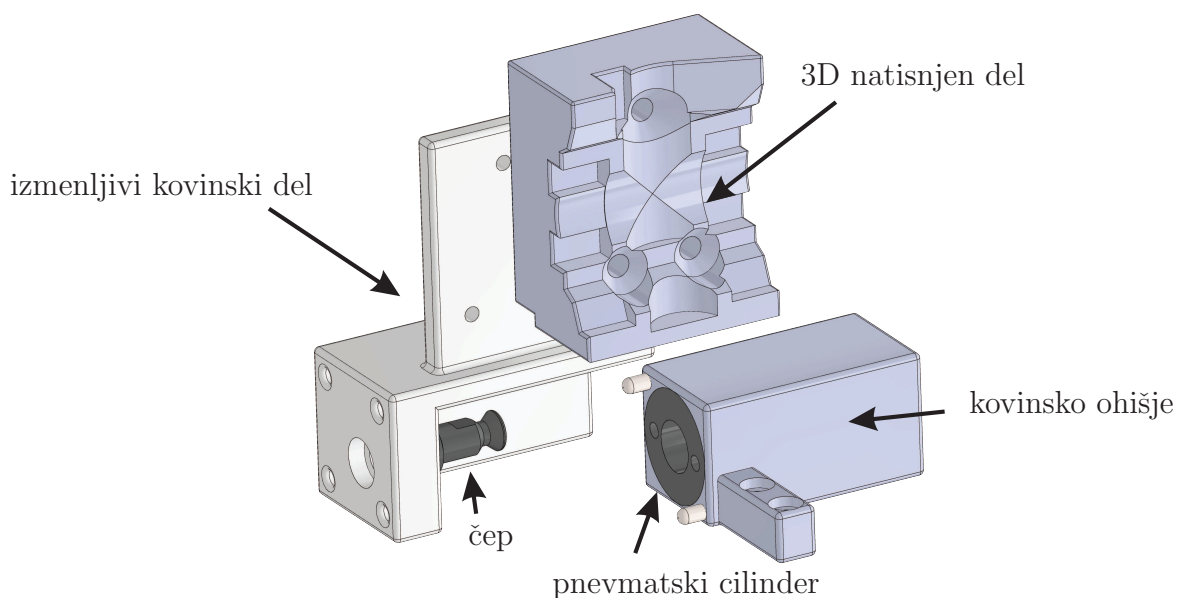
Sodelujoče prijemalo CRG 30-050 in prsti prijemala

Paralelno prijemalo CRG 30-050 je sodelujoče servo prijemalo z maksimalno silo 30 N (Slika 2.3). V neposredni povezavi z nastavljivo silo prijema in izpusta se nastavlja hitrost odpiranja in zapiranja prijemala. Maksimalni razmik med prstoma znaša 50 mm. Preko IO-Link komunikacijskega protokola lahko nastavimo parametre v obliki željene sile, pozicije prstov in smeri pomikanja prstov do osem različnih prijmov.

Na samem prijemalu je nameščen sistem izmenljivih prstov (Slika 2.4). Sistem omogoča robotu avtonomno menjavo prstov na mizi z zalogovniki. Sistem je sestavljen iz statičnega dela kovinsko ohišje s pnevmatskim cilindrom), ki je ves čas nameščen na prijemalu. Izmenljivi del prsta je setavljen iz kovinskega ohišja s pnevmatskim čepom in nameščenim 3D natisnjenim delom za optimalno prileganje objektov po obliki. Uporaba 3D natisnjenega dela omogoča hitrejšo in preprostejšo izdelavo, hkrati pa se lahko izdelata prste poljubnih oblik.



Slika 2.3: Prijemalo Weiss Robotics CRG 30-050 s sistemom izmenljivih prstov.



Slika 2.4: Sistem izmenljivih prstov. Kovinsko ohišje in pnevmatski cilindar sestavljata statični del, medtem ko je izmenljivi del sestavljen iz pnevmatskega čepa, izmenljivega kovinskega ohišja in 3D natisnjenega dela.

Z namenom boljšega stika med objekti in prsti prijemala, je bil na 3D natisnjen del dodan tanek gumiran premaz. S tem je bil zagotovljen stabilnejši prijem pri tudi nekoliko nižjih apliciranih silah prijemanja s prijemalom. Predvsem je premaz preprečil zdrs objekta pri operacijah vstavljanja in pobiranja.

Primerjalni merilnik Equator

Primerjalni merilnik Equator (PME), model 300 Extended Height, je robot paralelne konfiguracije in temelji na poenostavljeni osnovi KMS (Slika 2.5). Konfiguracija paralelnega robota omogoča izvedbo relativno hitrih gibov vrha robota (500 mm/s) za prosto gibanje, v načinu skeniranja pa je hitrost omejena na 200 mm/s, kar ustreza hitrosti merjenja 1000 točk/s. Paralelna konfiguracija pa poleg relativno visokih hitrosti omogoča izjemno pozicijsko natančnost (orientacija je konstantna), ki rezultira v ovrednoteni merilni negotovosti ponovljivosti PME $\pm 0,002$ mm in ločljivosti $\pm 0,0002$ mm.

Kljub izjemni natančnosti samega merilnika pa PME ni absolutni merilnik za razliko od KMS. Njegova točnost se spreminja glede na pozicijo v delovnem območju, zato PME ni absolutni merilnik. Njegova izjemno majhna negotovost v ponovljivosti mu omogoča merjenje v primerjalnem načinu.



Slika 2.5: Primerjalni merilnik Renishaw Equator.

V primerjalnem načinu se v prvem koraku izvede proceduro umerjanja/kalibracije (re-master) z referenčnim etalonom. PME zajame dimenzijske vrednosti, toda zaradi slabe točnosti samega merilnika meritve dimenzijsko niso ustrezne. Vendar ima referenčni etalon znane dimenzije, saj je bil predhodno pomerjen na referenčnem merilniku, npr. KMS. Odstopanje dimenzij med referenčnim merilnikom in dejanskimi meritvami PME se shrani v krmilnik za nadaljnje korekcije.

V naslednjem koraku se na identičnem položaju kot prej z referenčnim etalonom zajamejo vrednosti z identičnim merilnim programom za dimenzijsko neznan merilni objekt. Z upoštevanjem korekcij za referenčni etalon, je PME zmožen s primerjavo novih odstopanj za drugi objekt izračunati ustrezne meritve/dimenzije. Te predpostavke veljajo, v kolikor se lega merilnega objekta in referenčnega etalona med procesom merjenja in umerjenja ne razlikujeta za več kot 1 mm.

Merilni program PME (neodvisno od procesa merjenja ali umerjanja) je nadalje razdeljen na del poravnave in del izvajanja meritev. V prvem delu (poravnava) PME določi lokalni koordinatni sistem merjenja v koordinatnem sistemu PME, ki se ga nadalje uporabi pri samem izvajanju meritev (nominalne točke se prilagodijo dejanskim razmeram). Zatorej manjše spremembe lege objekta v osnovi ne povzročajo napačno

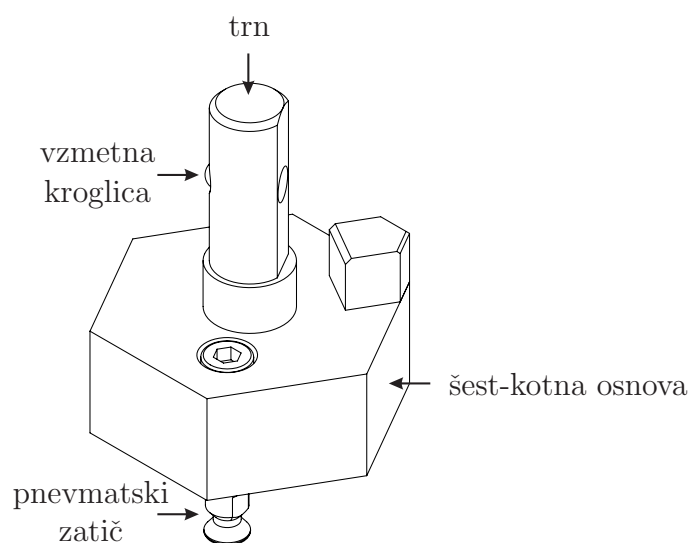
izvedenih meritev.

Prednost primerjalnega merjenja je v enakih prispevkih vplivov parametrov okolja, seveda pri predpostavki pogostega umerjanja. Za primerjalne merilnike torej velja, da ne potrebujejo temperaturno stabilnih komor. Prav tako se izniči vpliv kinematičnih napak merilnika PME, saj identična sistematična napaka vpliva v operaciji umerjanja etalona kot merilnega objekta. Posledično je merilnik lahko lociran bližje proizvodnji liniji.

Vpenjalna naprava – Ležišče

Za fiksiranje merilnih objektov v delovnem območju PME smo skupaj s Kolektor Orodjarno zasnovali specialna pasivna mehanska vpenjala - ležišča (Slika 2.6). Ležišča so za objekte različnih dimenzij in oblik osnovana na enakem principu, vendar se zaradi različnih dimenzij nekoliko razlikujejo. Sama zasnova ležišča najprej zagotavlja ustrezno fiksiranje objektov, istočasno omogoča posege manipulacije z robotom, funkcijsko pa je še vedno omogočen dostop merilnih konic PME za izvedbo dimenzijskih meritev. Izdelava ležišč je bila izvedena v Kolektor Orodjarni.

Trn ležišča se z zunanjim premerom prilega notranjemu premeru merilnega objekta in sicer sta dimenziji za oba merjenca (Poglavje 2.2) $15,97 \pm 0,02$ mm ter $12,87 \pm 0,02$ mm (nominalna notranja premera objektov znašata 16 mm ter 12,9 mm). Za dodatno stabilnost vpetja objekta je v trn nameščena vzmetna kroglica. Osnova ležišča je šest-



Slika 2.6: Specialno pasivno mehansko vpenjalo - ležišče za fiksiranje objektov.

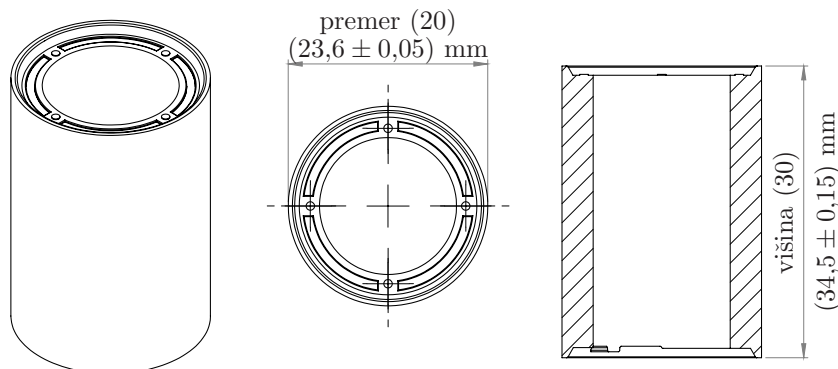
kotne oblike, s katero lahko zagotavljamo ustrezno orientacijo vstavljenega ležišča v delovnem območju PME. Samo ležišče je znotraj delovnega območja PME togo vpeto s pomočjo pnevmatskega cilindra (nameščen znotraj PME) in zatiča, ki je nameščen na spodnjem delu šest-kotne osnove ležišča.

2.2 Merilni objekti

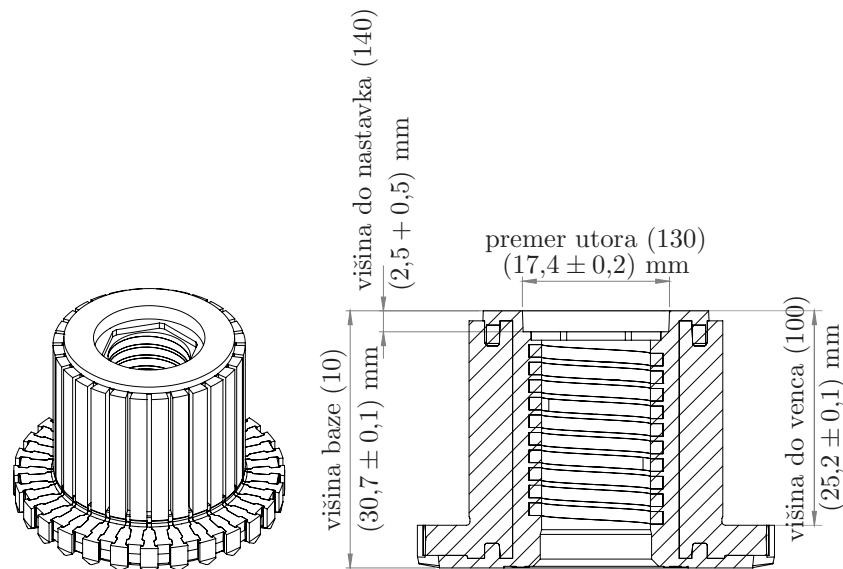
Obravnavali smo dva geometrijsko in dimenzijsko različna tipa serijskih produktov, valju podoben objekt Magnet in komutator PKR. Oba tipa produktov sta predstavnika izdelkov v avtomobilski industriji. Objekt Magnet ima votlo, cilindrično obliko za rotorje, medtem ko je objekt PKR komutator za zagonski motor. Za oba objekta smo v obravnavo vključili najbolj kritične dimenzijske karakteristike, ki so vključene v vsakodnevno statistično procesno kontrolo.

V primeru objekta Magnet smo obravnavali dve geometrijski karakteristiki, in sicer premer magneta z oznako 20 in višino magneta z oznako 30 (Slika 2.7). Pri objektu PKR smo obravnavali štiri geometrijske karakteristike, in sicer višino baze, višino venca, premer utora in višino do nastavka z oznakami 10, 100, 130 in 140 (Slika 2.8).

Skupaj smo torej obravnavali šest geometrijskih karakteristik, med katerimi so bile štiri dolžinske karakteristike (višina oziroma globina) ter dve karakteristiki premerov. Z obravnavo obeh tipov geometrijskih karakteristik smo se v prvem koraku spraševali, ali ima manipulacija z robotom vpliv na negotovost meritev, v drugem koraku pa, ali je vpliv manipulacije z robotom enak na dolžinske meritve in na meritve premerov.



Slika 2.7: Obravnavani geometrijski karakteristiki objekta Magnet.



Slika 2.8: Obravnavane geometrijske karakteristike objekta PKR.

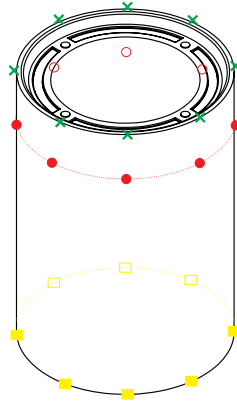
Točke merjenja

Merjenje premera Magneta sestoji iz dotikanja tipala in objekta na enakomerno porazdeljenih točkah na krožnici 4 mm pod zgornjim robom magneta (rdeči krogi na Sliki 2.9). Višina magneta se izračuna kot razdalja med zgornjo (zeleni križci na Sliki 2.9) in spodnjo ravnino magneta (rumeni kvadrati na Sliki 2.9). Vsaka ravnina je določena s točkami merjenja v obliki krožnice z enakomerno porazdeljenimi točkami na skrajnih robovih.

Pri merjenju premera je smer pomikanja tipala neposredno proti središču objekta. Pri merjenju zgornje ravnine je smer dotikanja navpično navzdol, medtem ko je pri merjenju spodnje ravnine navpično navzgor.

Na podoben način so definirane točke merjenja za objekt PKR. Premer utora se izmeri kot dotikanje na enakomerno porazdeljenih točkah na krožnici znotraj utora, smer dotikanja pa je usmerjena navzven/stran od središča. Višina baze je definirana kot razdalja med zgornjo in spodnjo ravnino. Obe ravnini sta definirani z enakomerno razporejenimi točkami na krožnici. Meritve na zgornji ravnini so usmerjene pravokotno navzdol, pri spodnji ravnini pa pravokotno navzgor. Podobno, z razdaljo med dvema ravninama, je definirana višina do venca. V tem primeru so smeri dotikanja obeh ravnin navpično navzdol. Prav tako se določi višino do nastavka kot razliko med ravninama na

vrhu objekta in na dnu nastavka. Tudi tu je smerni vektor dotikanja pri obeh ravninah usmerjen navpično navzdol.



Slika 2.9: Točke merjenja objekta Magnet. Rdeči krogi nakazujejo točke merjenja premera, zeleni križci in rumeni kvadrati prikazujejo definiranje ravnin za merjenje višine.

2.3 Statistične metode

V poglavju 1.1 so v grobem predstavljeni kriteriji sposobnosti merilne opreme oziroma merilnega sistema za vodenje sistema proizvodnje na temeljih procesnih meritev.

2.3.1 Analiza merilnega sistema

Najbolj razširjena metoda vrednotenja merilne sposobnosti merilnih sistemov, predvsem v avtomobilski industriji, je analiza merilnega sistema – MSA (ang. measurement system analysis) [3,46]. Metoda opisuje pet različnih procedur vrednotenja sposobnosti merilnega sistema in procesa kvantitativnih karakteristik:

- **Procedura 1** - Sposobnost merila,
- **Procedura 2** - Ponovljivost in primerljivost z vplivom operaterja,
- **Procedura 3** - Ponovljivost in primerljivost brez vpliva operaterja,
- **Procedura 4** - Linearnost,
- **Procedura 5** - Stabilnost

ter dve proceduri vrednotenja atributivnih karakteristik. Kvantitativne karakteristike pomenijo rezultate v smislu številske vrednosti meritve, medtem ko diskretne/atributivne karakteristike vrednotijo karakteristike kot ustrezne ali neustrezne.

Izpostavili bi dve proceduri vrednotenja kvantitativnih karakteristik, proceduro 1 (sposobnost merila) in proceduro 3 (ponovljivost in primerljivost $R\&R$ brez vpliva operaterja). Z vpeljavo avtomatizacije oziroma robotizacije želimo odpraviti vpliv operaterja (variacije pri vpenjanju, načini merjenja itd.), kar se ovrednoti pri proceduri 2 (ponovljivost in primerljivost $R\&R$ z vplivom operaterja).

MSA procedura 1 je namenjena verifikaciji merilnega procesa (kot testni proces posamezne karakteristike) glede na lokacijo in variacijo izmerjenih vrednosti znotraj tolerančnega območja preverjane karakteristike. Za izvedbo procedure je potrebna karakteristika z obojestransko tolerančno mejo (zgornjo tolerančno mejo ZTM in spodnjo tolerančno mejo STM), tako da iz danih karakteristik lahko izračunamo velikost tolerančnega območja T kot razdaljo med tolerančnima mejama. V primeru enostransko omejenih karakteristik z določeno eno tolerančno mejo in obstojem naravne zgornje ali spodnje tolerančne meje (meja, ki ne more biti dosežena ali presežena), se za velikost tolerančnega območja izbere T^* , kjer eno izmed tolerančnih mej nadomestimo z naravno tolerančno mejo.

Pri izvajanju merilne procedure se uporablja kalibrirani merilni vzorec – etalon, ki mora biti pomejen najmanj 25-krat, zaželeno 50-krat. Referenčna vrednost x_m etalona naj bo v sredini tolerančnega območja T , če je to le mogoče. Iz izmerjenih vrednosti se izračuna odklon, odstopanje srednje vrednosti od referenčne vrednosti etalona, in standardni odklon izmerjenih vrednosti. Iz izračunanih statističnih vrednosti lahko izračunamo parametra sposobnosti C_g in kritične sposobnosti C_{gk} po Enačbah (2.1) in (2.2). Zaradi omejenega števila meritev uporabljamo eksperimentalni standardni odklon s kot približek standardnega odklona (2.3).

$$C_g = \frac{0,2 T}{6 s} \quad (2.1)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 T - |\bar{x} - x_m|}{3 s} \quad (2.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.3)$$

O uspešni verifikaciji merilnega sistema govorimo, ko sta vrednosti parametrov C_g in C_{gk} enaki ali višji od 1,33.

Procedura 3 metode MSA je namenjena verifikaciji sposobnosti merilnega procesa v smislu preverjanja variacije ob uporabi meritev serijskih izdelkov brez vpliva operaterja. Pred izvedbo procedure 3 je potrebno preveriti, ali je vsako vplivanje operaterja na meritve izključeno. Izvede se na vsaj 25 ponovljivo merljivih in naključno izbranih izdelkih. Karakteristike tega izdelka morajo ležati znotraj tolerančnega območja. Upoštevati je potrebno vse vplivne faktorje, ki se bodo pojavljali tudi med serijskim procesom izvajanja meritev. Če niso podane posebne zahteve, se analizo izvede z dvema ponovitvama meritev, pri čemer se pomerijo v naključnem vrstnem redu pod ponovljivimi pogoji merjenja. Procedure se ne da uporabiti, če ustrezni izdelki niso na voljo za izvedbo meritev. Metoda analize variance (ANOVA) ima prednostno vlogo za izračun kriterija $\%GR\&R$. Postopek za izračun $\%GR\&R$ zajema izračun številnih parametrov [3], v osnovi pa je definiran z (2.4) in (2.5).

$$\%GR\&R = \frac{6 GRR}{T} 100\% \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \%GR\&R \leq 10 \% & \quad \text{merilni proces je sposoben} \\ 10 \% < \%GR\&R \leq 30 \% & \quad \text{merilni proces je pogojno sposoben} \\ \%GR\&R > 30 \% & \quad \text{merilni proces ni sposoben} \end{aligned} \quad (2.5)$$

GRR predstavlja parameter ponovljivosti in primerljivosti in je rezultat geometrijske vsote variacije opreme EV (ponovljivost, ang. equipment variation) in variacije operaterjev AV (primerljivost, ang. appraiser variation).

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (2.6)$$

Za proceduro 3 velja, da v sistemu ni vpliva operaterja, torej $AV = 0$. Vrednost variacije opreme pa izrazimo z (2.7), kjer \bar{R} predstavlja povprečno vrednost razponov meritev in K_1 odčitamo iz tabel v skladu s sistemom in načinom merjenja [47].

$$EV = \bar{R}K_1 \quad (2.7)$$

Kot priporočilo dodatnega kriterija sposobnosti se predlaga uporabo kriterija števila

skupin podatkov NDC, ki naj ne bo manjši od 5. Ta kriterij nam opisuje zastopanost posameznih podintervalov tolerančnega območja.

2.4 Merilna negotovost in meroslovna sledljivost

V meroslovju je zelo pomembno, da izmerjene vrednosti predstavljajo tudi pravilne vrednosti. To pomeni, da nam morajo merilniki pri merjenju prikazovati pravilne vrednosti oziroma zelo blizu njih. To lahko zagotovimo s tem, da merilnike umerimo (kalibriramo) z referenčnimi etaloni oziroma referenčnimi merilniki in s tem vzpostavimo meroslovno sledljivost.

Strnjeno in močno poenostavljeno si lahko meroslovno sledljivost razlagamo kot določen proces k zaupanju merilnemu rezultatu določenega merilnika/merilnega sistema. Zavedati se je potrebno, da je popolno zapisan merilni rezultat MR v sledeči obliki

$$MR = [IzVr + Kor] \pm k \cdot Neg \{enota\} \quad (2.8)$$

in IzVr predstavlja izmerjeno vrednost, Kor korekcijo merilnika, k faktor zaupanja in Neg merilno negotovost. Na koncu ima merilni rezultat tudi enoto veličine, ki jo meri. Korekcija izmerjene vrednosti je rezultat kalibracije in nam opredeljuje odstopanje pridobljene vrednosti od pravilne/kalibrirane vrednosti na račun sistematičnega pogreška. Korekcijo lahko napravimo takrat, ko fizikalno in matematično poznamo vplivne parametre na merilni rezultat. Nepoznavanje fizikalnega in posledično matematičnega modela vplivnih parametrov se odraža v merilni negotovosti. Manjše ko je fizikalno poznavanje, večja je merilna negotovost. Merilna negotovost je nenegativni parameter povezan z rezultatom meritve, ki na podlagi uporabljenih informacij označuje razpršenost vrednosti veličin, pripisanih meritvi.

Standard ISO 1425-2 [48] izpostavlja ključne vplivne parametre na merilno negotovost pri merjenju s KMS. Povsem logično je začeti z obravnavo predvidene merilne opreme, saj orodje namenjeno merjenju lahko predstavlja znaten delež k merilni napaki in posledično k točnosti meritev. Nadalje je potrebna obravnavo referenčnega etalona za umerjanje merilne opreme. Sledijo prispevki zaradi vplivov parametrov okolice (temperatura, vlaga, idr.), vpliva operaterja, postavitve ter definicije merilnega objekta in vpliv postopka merjenja. Nazadnje ne smemo zanemariti negotovosti v definicijah fizikalnih konstant.

Razširjeno merilno negotovost merilnega sistema U oziroma bolj specifično za KMS po standardu ISO 15530-3 [49] izračunamo z naslednjo enačbo:

$$U = k\sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} \quad (2.9)$$

Parameter k predstavlja faktor razširjene negotovosti, u_{cal} predstavlja prispevek k merilni negotovosti zaradi negotovosti etalona, u_p predstavlja prispevek zaradi merilne procedure ter u_w predstavlja prispevek zaradi samega merilnega objekta.

Z uporabo primerjalne merilne metode se izračun merilne negotovosti poenostavi v naslednji izraz:

$$U = ku(x) + |\bar{x} - x_{cal}|, \quad (2.10)$$

kjer je

$$u(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.11)$$

in \bar{x} povprečna vrednost merilnih podatkov, x_i i -ta meritev, n število meritev in x_{cal} izmerjena vrednost etalona.

Na podlagi kataloških specifikacij robota UR5e in PME bi lahko izračunali merilno negotovost po enačbah (2.9) in (2.10), kjer ima robot ovrednoteno pozicijsko natančnost $\pm 0,03$ mm ter PME merilno negotovost $\pm 2 \mu\text{m}$. Toda zavedati se moramo, da v našem primeru, zaradi velike poenostavitve, ti izračuni ne bi bili pravilni.

Prispevek robota k merilni negotovosti sistema ni samo na podlagi pozicijske natančnosti, temveč tudi pri orientacijski natančnosti ter negotovost pri operaciji prijemanja s prijemalom.

V zadnjem času na veljavi pridobiva pojem ciljne negotovosti (ang. target uncertainty), ki opredeljuje zgornjo mejo merilne negotovosti. Pojem s tem dodatno vzpodbudi končnega uporabnika, da realno oceni svoje zahteve.

2.4.1 Meroslovna sledljivost v praksi

Postopek za vzpostavljanje in dokazovanje meroslovne sledljivosti je zapisan v standardu ISO 17025 [50] in se vzpostavi ob upoštevanju in nato z zagotavljanjem:

1. specifikacije merjenja (merjene veličine);

2. dokumentirane neprekinjene verige kalibracij, segajoče nazaj do navedenih in ustreznih referenc (ustrezne reference vključujejo nacionalne in mednarodne etalone ter lastne etalone);
3. da je za vsak korak v verigi sledljivosti ovrednotena merilna negotovost v skladu z dogovorjenimi metodami;
4. da se korak verige izvede v skladu z ustreznimi metodami, z merilnimi rezultati in s pripadajočimi, zapisanimi merilnimi negotovostmi;
5. da laboratoriji, ki izvajajo en ali več korakov v verigi, predložijo dokaze o svoji strokovni usposobljenosti.

Sistematični merilni pogrešek oziroma napaka (včasih imenovan “odstopanje”) kalibrirane opreme se upošteva za širitev meroslovne sledljivosti na merilne rezultate v laboratoriju. Na voljo je več mehanizmov za upoštevanje sistematičnih merilnih pogreškov pri prenosu meroslovne sledljivosti meritev na nižje ravni.

Za širjenje meroslovne sledljivosti se lahko uporabijo etaloni, ki jih spremljajo informacije usposobljenega laboratorija, ki vsebuje samo izjavo o skladnosti s specifikacijo (niso navedeni merilni rezultati in pripadajoče negotovosti).

Slika 2.10 predstavlja kalibracijsko piramido. Na vrhu imamo sistem SI enot, pod



Slika 2.10: Kalibracijska piramida.

njim so nacionalni metrološki inštituti z nacionalnimi etaloni, dalje so akreditirani kalibracijski laboratoriji, še nižje kalibracijski laboratoriji znotraj proizvodnje in na najnižji stopnji vodenje proizvodnega procesa na podlagi kalibriranih senzorjev, instrumentov in artefaktov. Z vsakim pomikom po piramidi navzdol se večja merilna negotovost, hkrati pa se večja število kalibracij, ki so potrebne za namen sledljivosti.

ARC je robotska celica namenjena avtomatizaciji sistema nadzora kakovosti. Glavni cilj je merjenje dimenzij izdelkov, za različnimi merilnimi sistemi pa se dimenzije lahko meri na kontakten in ne-kontakten način. Med kontaktne merilnike štejemo PME in linearni pomični merilnik Keyence GT-2, ne-kontaktne način merjenja pa predstavlja optični sistem s telecentričnimi lečami.

Vpliv manipulacije z robotom na negotovost meritev dimenzij smo raziskovali z uporabo PME, zato si oglejmo meroslovno sledljivost v primeru merjenja s PME.

PME deluje v primerjalnem načinu merjenja, kjer se ga pred ciklom meritev kalibrira z delavnim etalonom (katerega dimenzije/karakteristike so absolutno znane), s tem se določi korekcijo merilnika, same merjence pa neposredno primerja z etalonom.

Metoda zamenjave (ang. substitution method), ki temelji na standardu ISO 15530-3, je metoda, ki poenostavi oceno merilne negotovosti s podobnostjo med dimenzijo in obliko obdelovanca ter enim kalibriranim referenčnim kosom. Poleg tega morajo biti merilni postopek in okoljski pogoji med vrednotenjem merilne negotovosti in dejansko meritvijo karseda podobni.

Za namen metode zamenjave se izbere vzorec kot referenčni kos, ki se ga z referenčnim merilnikom, npr. KMS in zagotavlja merilno sledljivost, izmeri (na nivoju proizvodnje). Ta delavni etalon je torej referenca za merilnike znotraj same proizvodnje. Za premik višje v kalibracijski piramidi (Slika 2.10) se na nivoju akreditiranih kalibracijskih laboratorijev ali na nivoju nacionalnih metroloških inštitutov izvede kalibracijske meritve etalona, katerega merilna negotovost je bistveno manjša od delovnega etalona.

Za ustrezno korekcijo je potrebno na določeno časovno obdobje (določi se na podlagi zahtev) izvesti kalibracijo tipala z referenčno kroglo. S kalibracijo tipala merilni sistem pridobi informacijo o učinkovitem premeru tipala, srednjo napako tipala, standardni odklon, okroglost tipala itd. Z redno kalibracijo konic in tudi ponovno kalibracijo (re-master) z delavnim etalonom ob spremembi parametrov merilne okolice (temperatura, vlaga) ali po določenem časovnem obdobju se zagotavlja sledljivo merilno negoto-

vost PME 0,002 mm pri zagotavljanju pozicijske ponovljivosti vpetega objekta znotraj 1 mm.

Sledljivost meritev oziroma meroslovna sledljivost je pri zagotavljanju kakovosti izdelkov izjemnega pomena. Pri poznavanju meroslovne sledljivosti pa je potrebno natančno poznati proces merjenja in ovrednotiti vplivne parametre, ki vplivajo na meritve, ter izraziti merilno negotovost. Za popolno sledljivost je potrebno poznati kalibracijske podatke vseh vmesnih korakov (merilnih sistemov), ki ne navajajo zgolj kvalitativnih izjav, temveč tudi večino karakteristik merilne opreme, med katere spadajo: območje, odstopanje, ponovljivost, stabilnost, histereza, lezenje, učinek vplivnih veličin, ločljivost, prag odzivnosti, pogrešek itd. Samo poznavanje vseh korakov v procesu merjenja in kalibracije nam zagotavlja tudi končno ustrezno kakovost.

3 Kompleksnost manipulacije z robotom

POGLAVJE obravnava do sedaj nepoudarjeno in neraziskano, ampak zelo pomembno področje vpliva robotove manipulacije na rezultate proizvodnih meritev. V prvem delu so predstavljena izhodiščna vprašanja na vpliv kompleksnosti manipulacije z robotom, nato so predstavljeni eksperimentalni scenariji manipulacije. Scenariji so sestavljeni iz operacij, ki potencialno relevantno vplivajo na negotovost dimenzijskih meritev s PME. Nadalje je pozornost posvečena različnim metodam merjenja PME in merilnemu ciklu ARC. Sledi predstavitev rezultatov eksperimentalnih scenarijev, katerim v nadaljevanju sledi razprava.

3.1 Vpliv manipulacije z robotom

Vprašanje vpliva kompleksnosti manipulacije nam postavlja izhodiščno in zelo široko zastavljeno razmišljanje. Kompleksnost manipulacije si lahko predstavljamo kot zaporedje robotskih operacij manipulacije z objektom. O višji kompleksnosti manipulacije govorimo, ko robot izvede večje število različnih operacij manipulacije (prijemanje, translacijski in rotacijski gibi, prenašanje, odlaganje) in obratno.

Za začetek smo si postavili tri ključna osnovna vprašanja, na katere smo želeli pridobiti odgovore:

1. Ali ima manipulacija z robotom vpliv na dimenzijske meritve?
2. Ali se negotovost meritev oziroma variabilnost dimenzijskih meritev spreminja pri različni kompleksnosti robotove manipulacije?
3. Katere so kritične operacije manipulacije z robotom?

Torej se sprašujemo, ali ima vsakršna manipulacija merjenca z robotom vpliv na končne dimenzijske meritve. Primarni poudarek je na dilemi, ali vpliv manipulacije z robotom na meritve dimenzij obstaja, kolikšen je vpliv manipulacije z robotom, pa je v začetni fazi raziskav sekundarnega pomena.

Vpliv manipulacije robota bo izražen skozi različne negotovosti oziroma variabilnosti končnih dimenzijskih meritev. Izhodišče nam bo predstavljal scenarij brez robotove manipulacije, v tem primeru gre za zgolj več zaporednih ponovitev dimenzijskih meritev s primerjalnim merilnikom Equator. Ta scenarij predstavlja najboljši možni primer, hkrati tudi zgornjo limito sposobnosti samega merilnega sistema, tj. PME v kombinaciji z ležiščem. V nadaljnjih scenarijih so dodane sprva preproste in zatem različne kompleksnosti robotove manipulacije, prijemanje objekta, translacije, rotacije in prenašanje.

Cilj vseh treh izpostavljenih vprašanj je bil pokazati, da se večja kompleksnost manipulacije (večje število operacij manipulacije) merjenca z robotom, pri vstavljanju merjenca v ležišče znotraj PME, preslika v večjo negotovost meritev dimenzij ter potencialno identificirati najbolj kritične operacije manipulacije z robotom.

3.2 Eksperimentalni scenariji manipulacije z robotom

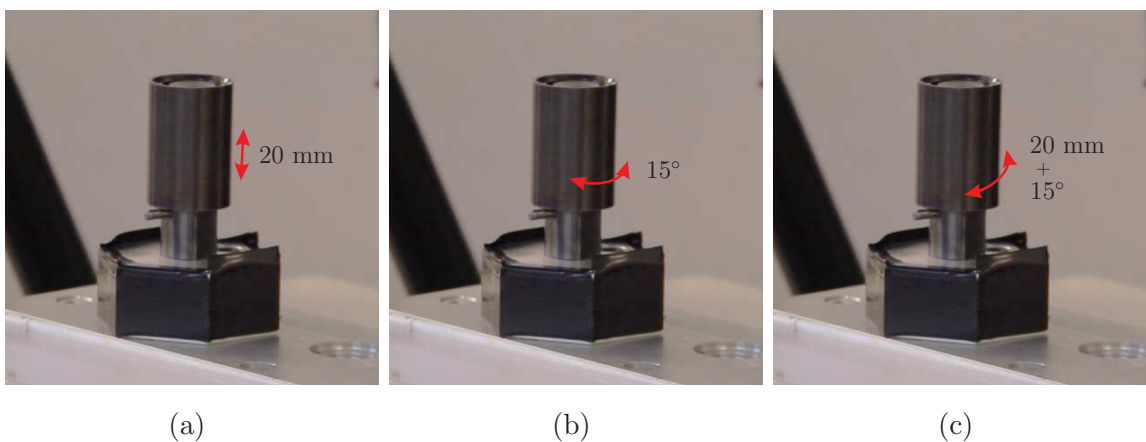
Identificirali smo potencialno relevantne operacije robota, ki vplivajo na negotovost dimenzijskih meritev in jih razdelili na robotsko prijemanje, trajektorijo robotskega giba, način vstavljanja objekta v ležišče PME in nazadnje tudi sam proces dimenzijskih meritev. Nadalje, način vstavljanja objekta v ležišče PME smo dodatno razdelili na translacijsko in rotacijsko. Na podoben način smo tudi trajektorijo giba vrha robota razdelili v enem primeru na linearne gibe in v drugem primeru na gibe po posameznih sklepih robota.

Definirali smo devet različnih scenarijev manipulacije z robotom, od nič robotove manipulacije do najvišje kompleksnosti manipulacije z robotom. Scenariji manipulacije z robotom s kratkimi opisi so predstavljeni v Tabeli 3.1. Z višanjem števila v poimenovanju scenarija se viša tudi kompleksnost manipulacije, torej je vključenih več sklepov robota za izvedbo giba, večje število prijemanj in izpustov objekta s prijemalom in večje spremembe v orientaciji vrha robota. Pri vseh scenarijih manipulacije z robotom smo za merjenje dimenzij geometrijskih karakteristik vedno uporabili PME.

Tabela 3.1: Scenariji robotske manipulacije za preučevanje sposobnosti merilnega procesa.

Scenarij manipulacije	Kratek opis scenarija
Scenarij 1	Brez robotske manipulacije.
Scenarij 2	Prijem in spust.
Scenarij 3	Prijem in translacija.
Scenarij 4	Prijem in rotacija.
Scenarij 5	Prijem, rotacija in translacija.
Scenarij 6	Prijem, translacija in izpust.
Scenarij 7	Izpenjanje.
Scenarij 8	Preprijemanje.
Scenarij 9	Celoten avtomatiziran merilni cikel.

Scenarij 1 nam je predstavljal izhodiščni scenarij, referenčno vrednost. Merilni objekt (ločeno Magnet in PKR) je bil fiksno vstavljen v ležišče znotraj delovnega prostora PME brez dodatne manipulacije z robotom (Slika 3.2k). Objekt je bil identično pozicioniran ves čas merjenja brez kakršnihkoli zunanjih posredovanj oziroma intervencij. Do stika je prišlo zgolj z merilno konico PME v procesu dimenzijskih meritev (Slika 3.2l). Zatorej lahko trdimo, da imamo v scenariju 1 najboljše možne merilne pogoje in hkrati ta scenarij sovpada z zgornjo mejo sposobnosti PME in ležišča.



Slika 3.1: Translatorni (a), rotacijski izmik (b) in kombinacija obojega (c).

V nadaljnjih scenarijih smo osnovnemu poteku, scenariju 1, dodali vedno več operacij manipulacije z robotom in tako višali kompleksnost manipulacije z robotom. V scenariju 2 smo osnovnemu scenariju dodali kratko in preprosto operacijo dotika (prijem in spust) s prsti prijemala. Iskali smo, ali samo prijetanje objekta, vstavljenega v ležišču, s prijemalom robota vpliva na dimenzijske meritve. Robot se je po zaključenem procesu dimenzijskih meritev PME iz začetne lege, izven delovnega območja PME, približal objektu, ki je bil vstavljen v ležišču znotraj PME. Robot je s prijemalom za izrazito kratek čas prijel objekt ter prste na hitro razprl nazaj (Slika 3.2j). Nato se je robot odmaknil v začetno lego izven delovnega območja PME.

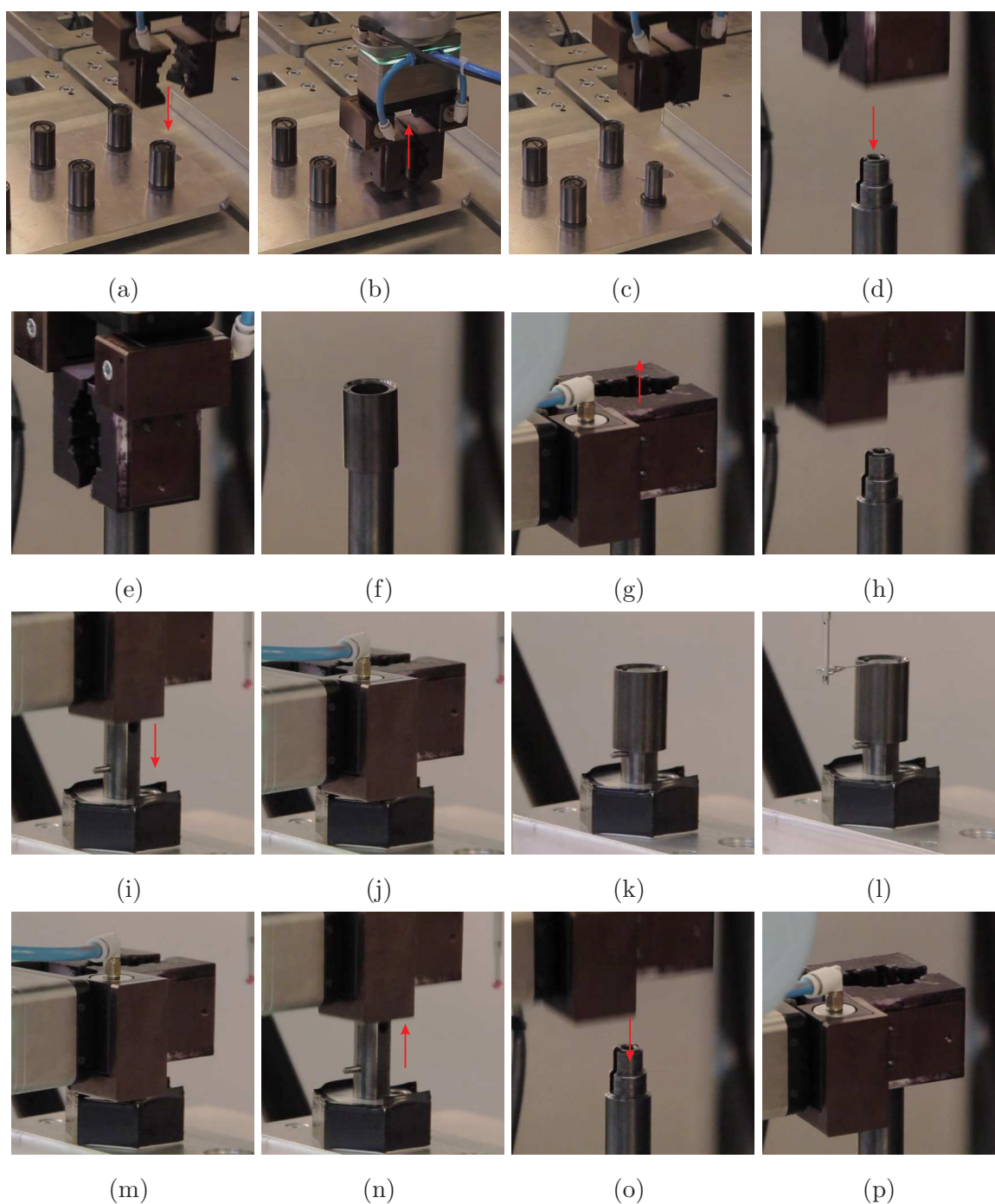
Scenariji od 3 do 6 se razlikujejo v različnih začetnih izmikih objekta, denimo translatorsni izmik vzdolž osi-z objekta, rotacijski izmik okoli osi-z ali kombinacija obojega. Različni začetni izmiki predstavljajo različne gibe robota za vstavljanje objekta v ležišče v lego primerno za izvedbo meritev. V scenariju 3 je bil objekt predhodno izmaknjen za 20 mm vzdolž osi-z (Slika 3.1a), v scenariju 4 je bil objekt predhodno zavrt za 15° okoli osi-z (Slika 3.1b), medtem ko je bil objekt translatorsno izmaknjen za 20 mm in zavrt za 15° v scenariju 5 (kombinacija scenarijev 3 in 4, Slika 3.1c).

Za izvedbo linearnega (translatorsni) giba vzdolž osi-z objekta je potrebna rotacija v treh sklepih robota UR5e (drugi, tretji in četrti sklep; S, E in W1) (Slika 2.2), medtem ko sta aktivna samo dva sklepa (prvi in peti sklep; B in W2) za izvedbo rotacije objekta okoli osi-z objekta.

Pri scenarijih od 3 do 6 se je robot iz začetne mirovne lege izven delovnega območja PME približal objektu, ki smo ga predhodno izmaknili iz lege merjenja (translatorsno za 20 mm, zavrt za 15° ali oboje), prijel objekt s prijemalom in ga ustrezno namestil v lego merjenja, objekt izpustil in se odmaknil iz delovnega območja PME (zaporedje Slik 3.2i-3.2k). Po končanem ciklu dimenzijskih meritev se je robot ponovno približal objektu, ki je bil tokrat v legi merjenja, prijel s prijemalom in ga zopet izmaknil v začetno izmaknjeno lego objekta. Za scenarije od 3 do 5, ob zaključku cikla scenarija, robot objekta ni izpustil iz prijema, temveč je nadaljeval s ponovitvami merilnih ciklov. Pri scenariju 6 pa je bil dodan dodatni izpust merjenja iz prijema v začetni izmaknjeni legi objekta.

Za vse dosedanje scenarije je veljalo, da je bil objekt ves čas v ležišču znotraj delovnega območja PME, bodisi v legi merjenja bodisi v izmaknjeni legi. Tudi izmiki iz lege merjenja so bili relativno majhni (translatorsno 20 mm ali rotacijsko 15°). V

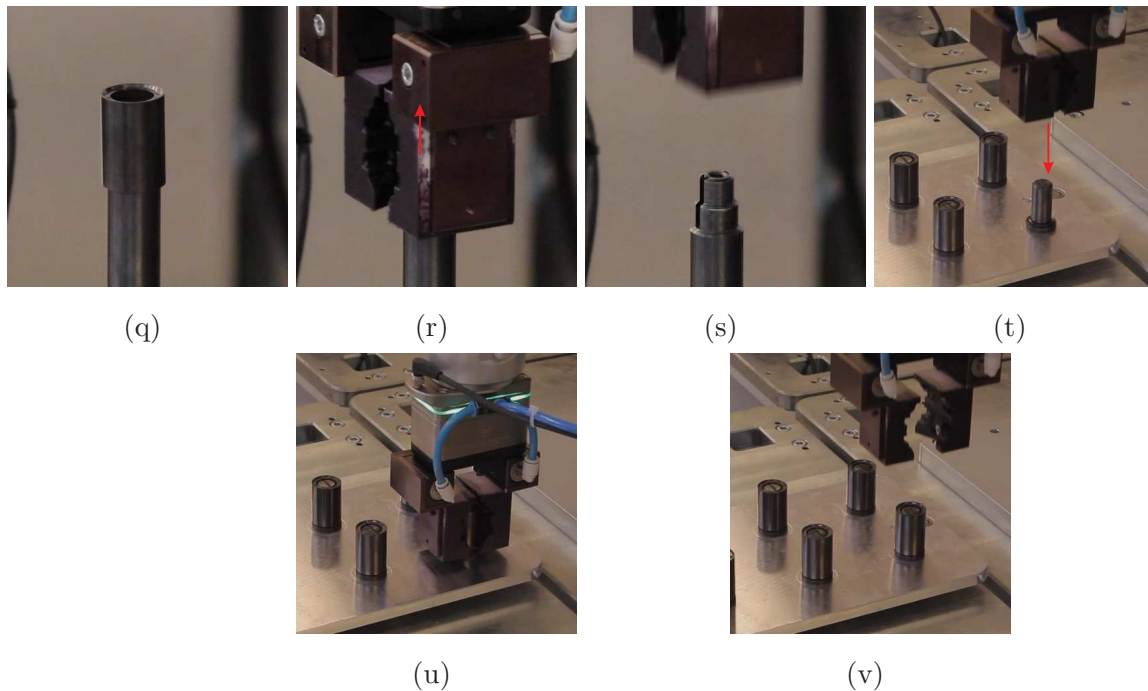
scenariju 7 je bil izmik bistveno večji (30 cm), saj je robot objekt popolnoma odstranil iz ležišča znotraj delovnega območja PME – izpel, in z objektom v prijemu zapustil delovno območje PME.



Slika 3.2: Celoten avtomatiziran cikel operacij manipulacije z robotom.

Povsem nova operacija robota je dodana v scenariju 8 – preprijem. Predvsem z namenom spremembe orientacije objekta v prijemu robota smo dodali vmesno konstrukcijo – mesto za preprijem. V primerjavi s prejšnjim scenarijem, scenarijem 7, je bil poudarek na opazovanju vpliva večkratnih prijemanj in spremembe orientacije objekta (vertikalni prijem v horizontalni in obratno). Po odlaganju objekta z vertikalnim prijemom na mesto za preprijemanje je robot spremenil orientacijo in objekt ponovno prijel s horizontalnim prijemom (zaporedje Slik 3.2d-3.2h). Nato je sledil identičen proces kot za scenarij 7, tj. vstavljanje objekta v ležišče PME, dimenzijske meritve s PME in odstranjevanje objekta. Na koncu je robot objekt s horizontalnim prijemom odložil na mesto za preprijem, spremenil orientacijo in na koncu ponovno prijel objekt, tokrat z vertikalnim prijemom (zaporedje Slik 3.2o-3.2s).

Zadnji scenarij, scenarij 9, predstavlja celoten avtomatiziran merilni cikel ARC (Slika 3.2). Merilni cikel se je pričel s pobiranjem objekta iz merilne palete z vertikalnim prijemom (zaporedje Slik 3.2a-3.2c), nato je robot objekt preprijel iz vertikalnega v horizontalni prijem na mestu za preprijem in vstavil objekt v ležišče znotraj delovnega območja PME ter se odmaknil iz delovnega območja PME. Izvedle so se dimenzijske meritve s PME, po zaključku se je robot približal merjencu v ležišču, prijel objekt in ga odnesel izven delovnega območja PME. V zaključku cikla je robot preprijel objekt iz



Slika 3.2: Celoten avtomatiziran cikel operacij manipulacije z robotom (nadaljevanje).

horizontalnega prijema v vertikalni prijem na mestu za preprijem ter na koncu odložil objekt nazaj na začetno mesto v merilni paleti (zaporedje Slik 3.2t-3.2v).

Operacije manipulacije z robotom so sestavljene iz osnovnih operacij robota in so zbrane v Tabeli 3.2. Nadalje so v Tabeli 3.3 zbrane hitrosti in pospeški posameznih operacij manipulacije z robotom. Operacije, ki vključujejo precizne gibe (npr. vstavljanje objekta v ležišče) ali gibe v omejenem prostoru, so izvedene na podlagi linearnih gibov vrha robota, medtem ko operacije, pri katerih ni prostorske omejitve, vključujejo gibe robota po sklepih (Tabela 3.2). S podobnim razmišljanjem lahko opazimo, da so gibi izvedeni v prostorsko neomejenem prostoru izvedeni s precej višjimi hitrostmi in pospeški (Tabela 3.3).

Tabela 3.2: Operacije manipulacije z robotom sestavljene iz osnovnih operacij robota za izvedbo merilnih scenarijev, način giba robota za posamezno operacijo in vključenost v merilnih scenarijih.

Operacije manipulacije	Način giba	V scenariju
Približevanju objektu v ležišču PME	linearen	2, 6-9
Odmikanje od objekta v ležišču PME	linearen	2, 6-9
Vstavljanje objekta	linearen	3-9
Odstranjevanje objekta	linearen	3-9
Preprijem (V v H in H v V)	po sklepih	8-9
Lega za preprijem do roba delovnega območja PME (in v obratno smer)	po sklepih	8-9
Pobiranje in odlaganje v paleti	linearen	9
Od palete do lege za preprijem (in v obratno smer)	po sklepih	9

V–vertikalna orientacija, H–horizontalna orientacija

Pomembno je poudariti, da se prve štiri operacije manipulacije z robotom v Tabelah 3.2 in 3.3 (približevanju objektu, odmikanju od objekta, vstavljanje in odvzemanje) spreminjajo v skladu z izbranim scenarijem. Na primer, v scenariju 3 vstavljanje objekta v ležišče vključuje linearen gib vzdolž osi-z objekta za 20 mm, rotacijo za 15° okoli osi-z v scenariju 4 in kombinacijo obeh gibov v scenariju 5. Preostale operacije manipulacije z robotom so neodvisne od izbire scenarija.

Tabela 3.3: Hitrosti v in pospeški a izvajanja posameznih operacij manipulacije z robotom.

Operacije manipulacije	a	v
Približevanju objektu v ležišču PME	0,5 m/s ²	0,5 m/s
Odmikanje od objekta v ležišču PME	0,5 m/s ²	0,5 m/s
Vstavljanje objekta	0,5 m/s ²	0,5 m/s
Odstranjevanje objekta	0,5 m/s ²	0,5 m/s
Preprijem (V v H in H v V)	2,5 rad/s ²	1,5 rad/s
Lege za preprijem do roba delovnega območja PME (in v obratno smer)	5,0 rad/s ²	3,0 rad/s
Pobiranje in odlaganje v paleti	0,5 m/s ²	0,5 m/s
Od palete do lege za preprijem (in v obratno smer)	5,0 m/s ²	3,0 m/s

V–vertikalna orientacija, H–horizontalna orientacija

Načini dimenzijskih meritev

Merilna negotovost oziroma raztros dimenzijskih meritev je odvisna od načina merjenja merilnika PME. Pri KMS je velika odvisnost merilne negotovosti od okolice (temperatura, vlaga in vibracije), izbrane merilne opreme, vpliva operaterja in izbrane merilne procedure.

Vpliv operaterja je minimiziran oziroma praktično izničen z nadomestitvijo operaterja z robotom, merilna oprema se tekom merjenja tudi ne more spreminjati. Potencialno ostaja odvisnost merilne negotovosti od izbrane merilne procedure, torej definiranega načina delovanja PME (način skeniranja ali način diskretnega dotikanja), števila zajetih točk meritev za posamezno geometrijsko karakteristiko in porazdelitve točk merjenja.

Pri merjenju objekta Magnet, ki je služil kot testni objekt, smo definirali tri različne načine merjenja/vzorčenja PME ter preučevali vpliv vzorčenja na raztros dimenzijskih meritev. Prvi način merjenja temelji na diskretnem dotikanju (TTM – touch triggering), drugi način je način skeniranja (SM – scanning mode) s povečanjem števila točk vzorčenja, z 8 na 25 točk za definiranje ravnine in z 12 na 25 točk za merjenje sferičnih karakteristik. V zadnjem načinu (SM+) smo dodatno zgostili število točk vzorčenja

geometrijskih karakteristik, ločeno na 200 in 400 točk za definiranje ravnin oziroma sferičnih karakteristik.

Za merjenje geometrijskih karakteristik objekta PKR je PME deloval v hibridnem načinu merjenja diskretnih točk in načina skeniranja (TTM+SM).

Merilni cikel

Izvedba enega merilnega cikla je zajemala 25 ponovitev robotske manipulacije objekta, stopnja katere je odvisna od scenarija, in dimenzijskih meritev, neposredno za postopkom umerjanja (mastering oziroma re-mastering). Skupek 25 meritev za posamezno geometrijsko karakteristiko smo statistično ovrednotili z metodo statistične analize MSA procedure-1. Kot rezultat so nas najbolj zanimali koeficient sposobnosti merila C_g , razpon meritev R in raztros meritev (standardni odklon) σ .

Merilnik PME ima z možnostjo ponovnega umerjanja (re-master) sposobnost kompenzacije vpliva parametrov okolja. Za vsakega izmed merilnih setov smo definirali temperaturno tolerančno okno $\Delta T = \pm 1^\circ C$. V kolikor se temperatura okolice spremeni za več kot je dovoljeno temperaturno okno, se proži zahteva za ponovno umerjanje in posledično ponovitev celotnega merilnega cikla/seta.

V primeru merjenja dimenzijskih karakteristik 20 in 30 objekta Magnet in karakteristike 100 objekta PKR celoten set meritev obsega tri ponovitve meritev vseh devet scenarijev manipulacije z robotom. Za preostale tri dimenzijske karakteristike objekta PKR (10, 130 in 140) celoten set sestoji iz dveh ponovitev meritev vseh devetih scenarijev. Vsak merilni scenarij sestoji iz 25 meritev posamezne geometrijske karakteristike, torej celoten set meritev zajema skupno 2700 dimenzijskih meritev.

3.3 Eksperimenti

Eksperimenti v Podpoglavju 3.3.1 prikazujejo izračune preizkušanja normalne porazdelitve merilnih podatkov na osnovi Anderson-Darling statistične metode preizkušanja [51] ter izris verjetnosti normalne porazdelitve (ang. normal probability plot) [52] za primera brez in z največ manipulacije z robotom. V nadaljevanju bodo ločeno v Podpoglavjih 3.3.2 in 3.3.3 predstavljeni eksperimentalni rezultati vpliva kompleksnosti manipulacije z robotom na variabilnost meritev za objekta Magnet in PKR za vse scenarije manipulacije z robotom.

3.3.1 Statistična porazdelitev dimenzijskih meritev

Uporaba statističnega indeksa sposobnosti C_g pogojuje normalno porazdelitev podatkov. V primeru porazdelitve drugačne od normalne so potrebne dopolnitve indeksa sposobnosti za določen tip porazdelitve.

Za preizkus normalnosti porazdelitve rezultatov dimenzijskih meritev vseh geometrijskih karakteristik smo uporabili Anderson-Darling metodo preizkušanja s 95 % stopnjo zaupanja. Statistična metoda preizkušanja normalne porazdelitve ovrže hipotezo normalne porazdelitve, v kolikor je vrednost statističnega parametra p nižja ali enaka mejni vrednosti $p_{min} = 0,05$.

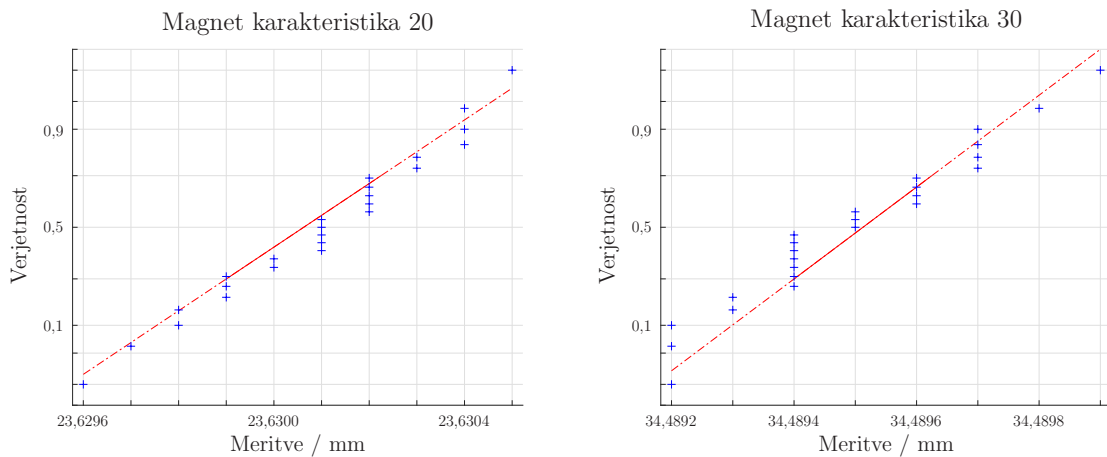
AD statistična metoda preizkušanja rezultat vrne kot končno številko. Preizkus normalne porazdelitve meritev lahko opravimo tudi grafično z izrisom verjetnosti normalne porazdelitve. Podatki so izrisani tako, da bi morale točke na grafu tvoriti približno ravno črto–premico, odstopanje od le-te premice kažejo na odstopanje od normalne porazdelitve.

Izračuni statističnega indeksa p za vseh šest geometrijskih karakteristik objektov

Tabela 3.4: Vrednosti statističnega indeksa p Anderson-Darling metode preizkušanja normalne porazdelitve. Normalno porazdelitev smo preizkušali v scenarijih 1 in 9.

Objekt	Karakteristika	Scenarij	p -vrednost
Magnet	20	1	0,910
		9	0,518
	30	1	0,754
		9	0,441
PKR	10	1	0,743
		9	0,639
	100	1	0,226
		9	0,086
	130	1	0,588
		9	0,678
	140	1	0,968
		9	0,717

Magnet in PKR so zbrani v Tabeli 3.4 v primeru scenarija 1 (brez manipulacije z robotom) in scenarija 9 (najvišja stopnja kompleksnosti manipulacije z robotom). Nadalje, Sliki 3.3 in 3.4 ločeno prikazujeta izris verjetnosti normalne porazdelitve za karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet ter karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR. Modri “+” predstavljajo dejanske vrednosti meritev dimenzij s PME. Na navpični osi je predstavljena verjetnost, medtem ko je na vodoravni osi predstavljena velikost izmerjenih karakteristik.

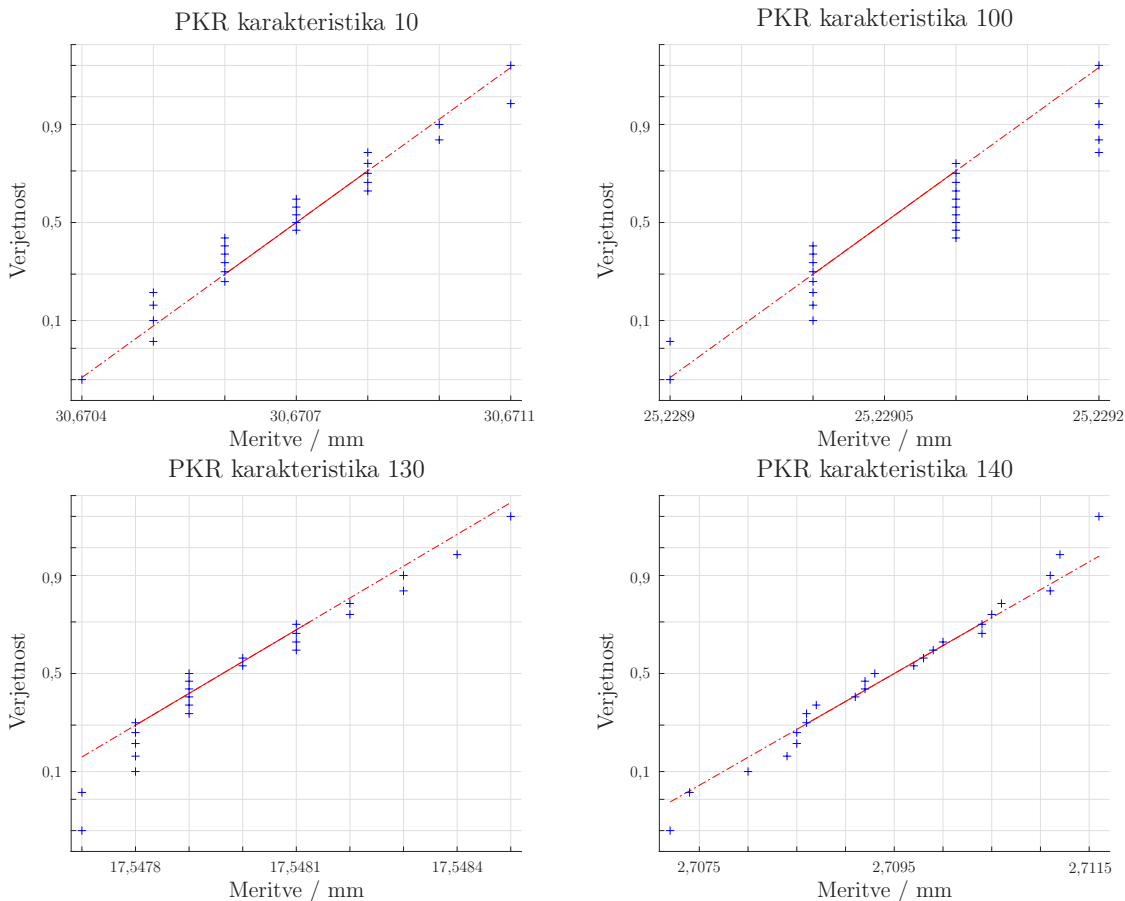


Slika 3.3: Verjetnostna normalna porazdelitev za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet ene ponovitve scenarija 1 ($n = 25$). Pripadajoči vrednosti indeksa p Anderson-Darling preizkusa normalne porazdelitve sta 0,910 in 0,754.

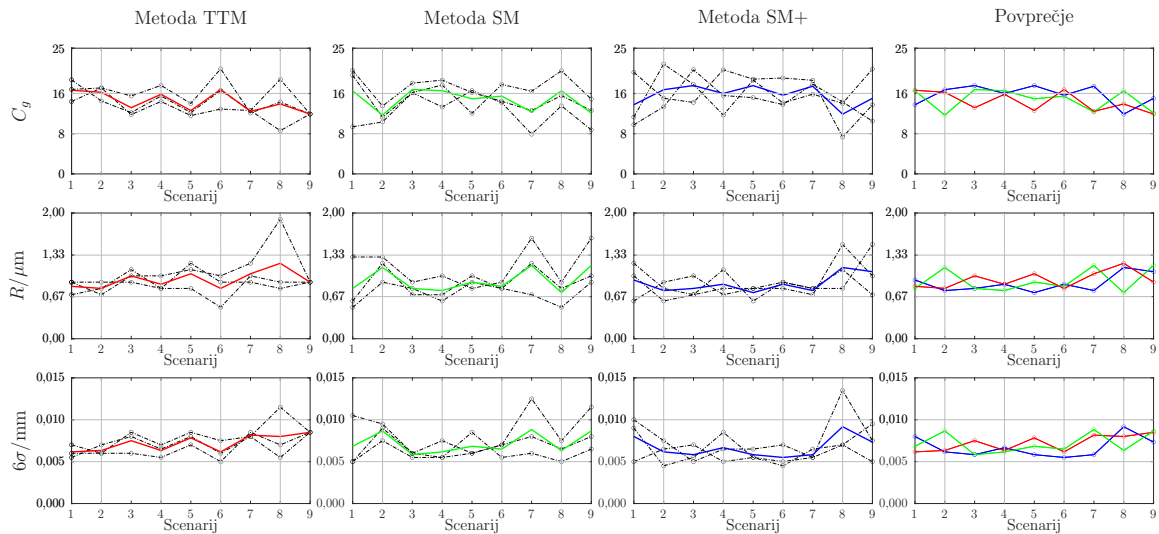
3.3.2 Magnet

Slika 3.5 prikazuje statistične izračune parametrov MSA analize procedure 1 za geometrijsko karakteristiko 20 (premer) objekta Magnet za vseh devet scenarijev, medtem ko Slika 3.6 prikazuje statistične izračune MSA analize procedure 1 za geometrijsko karakteristiko 30 (višina) istega objekta prav tako za vseh devet scenarijev. Grafi v zgornji vrsti vsake slike prikazujejo izračune indeksa sposobnosti C_g , srednja vrsta prikazuje razpon meritev R in v spodnji vrsti vsake slike so predstavljene vrednosti šestkratnika standardnega odklona 6σ posameznih ponovitev meritev. Stolpci v obeh slikah prikazujejo posamezne sete meritev, ki pripadajo metodam merjenja PME (opis v Podpoglavju 3.2). Skrajno levi stolpec predstavlja analizirane podatke prvega seta meritev, pri katerem je PME deloval v načinu diskretnega dotikanja (TTM). Sledi stolpec, ki predstavlja

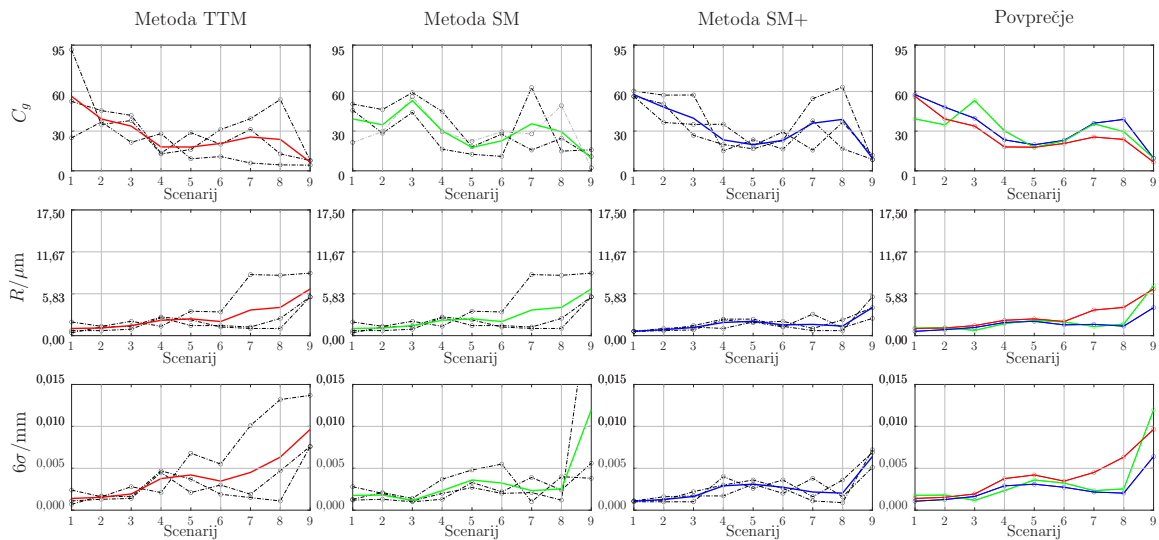
podatke drugega seta meritev z načinom skeniranja (SM) PME. Predzadnji stolpec z desne pa predstavlja podatke tretjega seta meritev z dodatnim povečanjem vzorčnih točk v načinu skeniranja (SM+). V skrajnem desnem stolpcu so na skupnem grafu prikazane povprečne vrednosti posameznih setov meritev. Rdeče polne črte predstavljajo povprečne vrednosti prvega merilnega seta (TTM), zelene polne črte povprečne vrednosti drugega merilnega seta (SM), modre polne črte povprečne vrednosti tretjega seta meritev (SM+), medtem ko črne prekinjene črte na vseh grafih predstavljajo po tri posamezne ponovitve meritev. Trend naraščanja/padanja posameznih statističnih parametrov (C_g , R in 6σ) ima pomembnejšo vlogo od samih absolutnih vrednosti. Na vodoravni osi so predstavljene številke scenarijev manipulacije z robotom.



Slika 3.4: Verjetnostna normalna porazdelitev za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR ene ponovitve scenarija 1 ($n = 25$). Pripadajoče vrednosti indeksa p Anderson-Darling preizkusa normalne porazdelitve so 0,743, 0,226, 0,588 in 0,968.



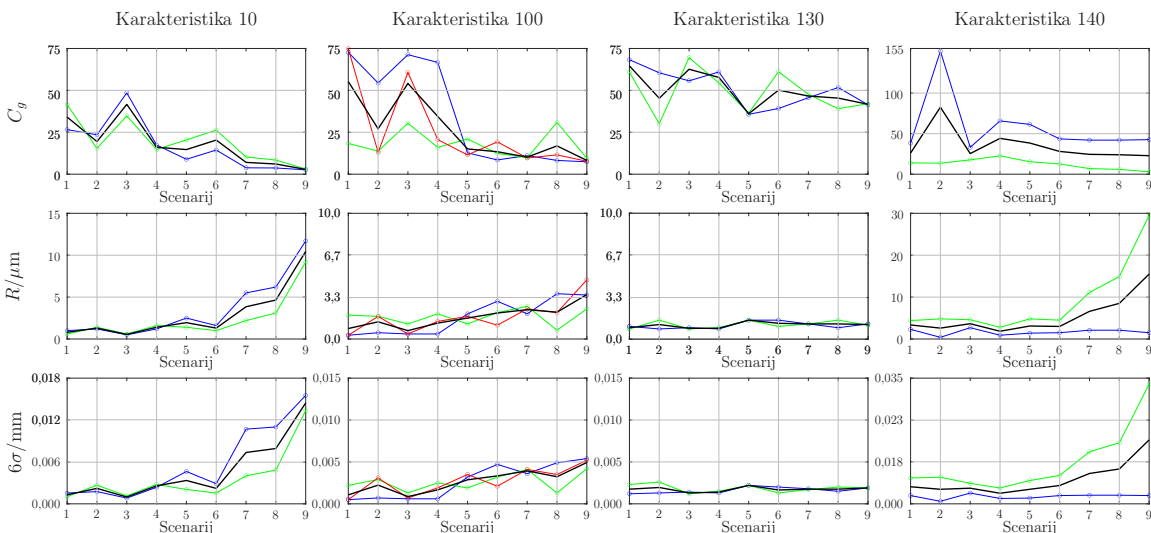
Slika 3.5: Prikaz merilnih rezultatov MSA analize za geometrijsko karakteristiko 20 (premer) objekta Magnet za, ločeno, vse tri merilne metode PME in povprečje. Rdeča, zelena in modra črta ločeno predstavljajo povprečne vrednosti za metodo TTM, metodo SM in metodo SM+, medtem ko črne črtkane črte ponazarjajo posamezne ponovitve meritev. Na vodoravni osi so predstavljene številke scenarijev, na navpičnih oseh pa indeks sposobnosti C_g , razpon meritev R in šestkratnik standardnega odklona 6σ .



Slika 3.6: Prikaz merilnih rezultatov MSA analize za geometrijsko karakteristiko 30 (višina) objekta Magnet za, ločeno, vse tri merilne metode PME in povprečje. Rdeča, zelena in modra črta ločeno predstavljajo povprečne vrednosti za metodo TTM, metodo SM in metodo SM+, medtem ko črne črtkane črte ponazarjajo posamezne ponovitve meritev. Na vodoravni osi so predstavljene številke scenarijev, na navpičnih oseh pa indeks sposobnosti C_g , razpon meritev R in šestkratnik standardnega odklona 6σ .

3.3.3 PKR

Rezultati analize parametrov MSA procedure 1 za vse štiri geometrijske karakteristike objekta PKR so prikazani na Sliki 3.7. Zgornja vrsta prikazuje izračunane indekse sposobnosti C_g za posamezne karakteristike pri vseh devetih scenarijih, srednja vrsta prikazuje izračunane razpone meritev R in spodnja vrsta prikazuje šestkratnik standardnega odklona 6σ posameznih meritev. Od leve proti desni, prvi stolpec predstavlja analizo merilnih rezultatov za karakteristiko 10, drugi stolpec predstavlja analizo merilnih rezultatov za karakteristiko 100, tretji stolpec predstavlja analizo merilnih rezultatov za karakteristiko 130 in zadnji, četrti stolpec predstavlja analizo merilnih rezultatov za karakteristiko 140. Rdeče, zelene in modre krivulje predstavljajo posamezne ponovitve meritev, medtem ko črne črte predstavljajo izračunane povprečne vrednosti iz posameznih setov po 25 meritev. Na vodoravni osi posameznih grafov so predstavljene številke scenarijev manipulacije z robotom.



Slika 3.7: Prikaz merilnih rezultatov MSA analize za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR. Rdeče, zelene in modre krivulje predstavljajo posamezne ponovitve meritev, medtem ko črne črte predstavljajo povprečne vrednosti. Na vodoravni osi so predstavljene številke scenarijev, na navpičnih oseh pa indeks sposobnosti C_g , razpon meritev R in šestkratnik standardnega odklona 6σ .

3.4 Razprava

Potrebno je izrazito poudariti, da glavni cilj raziskave ni bilo potrditi zmožnosti oziroma primernosti merilnega sistema robot-PME, temveč raziskati vplive posameznih elementarnih posegov manipulacije z robotom na končne dimenzijske meritve objektov. Za avtomatizirane meritve v kosovni proizvodnji se predvideva, da je merilna negotovost veliko manjša od tradicionalnih/ročnih merilnih metod. Kot glavni vzrok pri tej predpostavki je vpliv človeka-operaterja, ki aktivno ali pasivno prisostvuje pri meritvah. Pri avtomatiziranih meritvah je ta vplivni parameter občutno zmanjšan ali odpravljen.

Uporaba MSA postopkov vrednotenja merilnih sistemov in procesov zahteva normalno porazdelitev merilnih podatkov. Rezultati testiranja normalne porazdelitev meritev dimenzij po Anderson-Darling metodi preizkušanja so zbrani v Tabeli 3.4 ter nadalje prikazani na Sliki 3.3 za objekt Magnet in na Sliki 3.4 za objekt PKR. Preizkus normalne porazdelitve smo napravili za meritve pridobljene v eksperimentalnem scenariju manipulacije z robotom 1 in 9, torej pri nič robotske manipulacije in največ robotske manipulacije.

Za merilni set z normalno porazdelitvijo pri preverjanju z AD metodo velja, da ima statistični indeks p večji od $p_{min} = 0,05$. Iz podatkov v Tabeli 3.4 lahko razberemo, da statistični preizkus za oba scenarija (1 in 9) in za vseh šest karakteristik potrdi normalno porazdelitev, saj so posamezne p -vrednosti znatno višje od p_{min} . Ker smo potrdili normalno porazdelitev za začetni in končni scenarij manipulacije z robotom, lahko privzamemo, da imajo tudi meritve v preostalih scenarijih manipulacije normalno porazdelitev. Posledično lahko za nadaljnjo obravnavo rezultatov meritev dimenzij uporabimo MSA analizo in dane statistične parametre C_g , R in 6σ .

Na Slikah 3.3 in 3.4 normalno porazdelitev izmerjenih podatkov dimenzij lahko razumemo kot ujemanje le teh z rdečo premico. Bolj ko se meritve ujemaajo s premico, višja je vrednost pripadajočega parametra p (objekt PKR karakteristika 140) in obratno, manjše ko je ujemanje, manjša je vrednost parametra p (objekt PKR karakteristika 100).

Iz splošnega opazovanja posameznih grafov na Slikah 3.5, 3.6 in 3.7 lahko trdimo, da imajo posredovanja robotske manipulacije vpliv na dimenzijske meritve, saj vrednosti parametrov MSA analize niso konstantne pri pomikanju od scenarija 1 do scenarija 9. Nadalje, različni posegi robota, torej različne kompleksnosti manipulacije imajo različne

vplive na merilno sposobnost celotnega merilnega sistema. Z nekoliko bolj podrobnim opazovanjem in primerjavo grafov na Slikah 3.5, 3.6 in 3.7 s Slikama 2.7 in 2.8, ki prikazujeta geometrijske karakteristike obravnavanih objektov, lahko opazimo, da je vpliv manipulacije z robotom na negotovost dimenzijskih meritev bolj opažen v primeru merjenja dolžin (karakteristika 30 objekta Magnet in karakteristike 10, 100 in 140 objekta PKR). Vpliv pri merjenju premerov (karakteristika 20 objekta Magnet in karakteristika 130 objekta PKR) ni tako izrazit.

3.4.1 Magnet

Rezultati, ki opisujejo rezultate dimenzijskih meritev analizirane z MSA proceduro 1 za geometrijsko karakteristiko 20 objekta Magnet, so prikazani na Sliki 3.5. Povečevanje kompleksnosti manipulacije, pomikanje od scenarija 1 do scenarija 9, se ne odraža na bistvenem vplivu na parametre dimenzijskih meritev. Statistični indeksi C_g , R in 6σ se od scenarija 1 do scenarija 9 bistveno ne spremenijo, temveč imajo bolj ali manj podobne vrednosti za vse scenarije. Tudi povprečne vrednosti za vse tri različne merilne sete (zadnji stolpec), ki pripadajo različnim merilnim metodam PME, so približno enakih vrednosti. Prvi stolpec pripada prvemu setu meritev in zajema merjenje PME z metodo diskretnega dotikanja (TTM), povprečna vrednost treh ponovitev pa je predstavljena z rdečo polno črto. Naslednji stolpec pripada drugemu setu meritev in delovanju PME z metodo skeniranja (SM), povprečna vrednost treh ponovitev pa je predstavljena s polno zeleno črto. Metoda skeniranja s povečanim številom vzorčenih točk (SM+) zaobjema tretji stolpec, tretji set meritev, povprečna vrednost treh ponovitev je predstavljena s polno modro črto. Prekinjene črne črte predstavljajo posamezne ponovitve znotraj posameznih merilnih setov.

Potek parametrov C_g , R in 6σ je primarnega pomena, njihove absolutne vrednosti pa sekundarnega pomena. Vrednost C_g je za vse scenarije manipulacije z robotom bistveno višji (≈ 15) od vrednosti, ki je sprejemljiva za merilni sistem (1,33). Indeks sposobnosti in tolerančnemu območju za karakteristiko 20 ($T = \pm 0,05$ mm) znaša $6\sigma \approx 8 \mu\text{m}$ (enačba 2.1). Torej je tolerančno območje T več kot desetkrat večje od šest-kratnika variabilnosti meritev dimenzij 6σ .

Na Sliki 3.6, ki prikazuje analizirane dimenzijske meritve za karakteristiko 30 objekta Magnet, lahko hitro razberemo, da različne operacije robota vplivajo na dimenzijske meritve. Generalno gledano, s povečevanjem kompleksnosti manipulacije indeks

sposobnosti C_g pada, medtem ko razpon R in šestkratnik standardnega odklona 6σ naraščata, ko se pomikamo od scenarija 1 do scenarija 9. Identično kot pri predstavitvi rezultatov za karakteristiko 20, krivulje, ki opisujejo C_g , R in 6σ , pripadajo trem merilnim setom in trem merilnim metodam PME (TTM, SM in SM+). Tudi tukaj vidimo, da se končni rezultati v primeru različnih načinov delovanja PME ne razlikujejo. V vseh treh primerih je opazen padec C_g pri višjih številkah scenarijev, kar posledično pomeni povečanje variabilnosti podatkov (6σ).

Osredotočimo se na zadnji stolpec na Sliki 3.6 in obravnavajmo absolutne vrednosti statističnih parametrov za karakteristiko 30. Maksimalna vrednost indeksa sposobnosti pri scenariju 1 znaša $C_g \approx 60$. Posledično je vrednost $6\sigma \approx 1 \mu\text{m}$ pri istem scenariju. Vrednost 6σ do scenarija 5 narašča do vrednosti $\approx 5 \mu\text{m}$ ter indeks sposobnost pada do vrednosti $C_g \approx 25$. Za naslednje tri scenarije, torej scenarije 6-8, znaša indeks sposobnosti približno enak, oziroma se vrednost celo nekoliko zviša. Pri zadnjem scenariju, ki predstavlja celoten avtomatiziran cikel meritev, indeks sposobnosti pade na vrednost $C_g \approx 12$, medtem ko se šest-kratnik variabilnosti meritev poveča na vrednost $6\sigma \approx 10 \mu\text{m}$.

3.4.2 PKR

Objekt Magnet je bil naš primarni objekt za preučevanje vpliva manipulacije z robotom na dimenzijske meritve za dolžinske meritve in merjenje premera. S tem namenom je bilo na Magnetu izvedenih bistveno več meritev kot na objektu PKR. Pomembnost objekta PKR se odraža na dodajanju novih merilnih geometrijskih karakteristik. Nadalje, PKR je služil kot verifikacija predhodno odkritih trendov poteka statističnih indeksov C_g , R in 6σ . Nazadnje, z meritvami na objektu PKR smo potrdili vplive manipulacije z robotom na negotovost dimenzijskih meritev.

Slika 3.7 prikazuje potek statističnih parametrov analize MSA procedure 1 za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR. Karakteristike 10, 100 in 140 predstavljajo dolžinske meritve. Na grafih na Sliki 3.7 je mogoče opaziti trend upadanja faktorja C_g in naraščanja indeksov R in 6σ s povečevanjem kompleksnosti manipulacije (pomikanje od scenarija 1 do scenarija 9). V primeru dimenzije 130, premera, je opazen rahel trend upadanja indeksa C_g in posledično naraščanja R in 6σ , vendar trend ni tako izrazit kot pri preostalih geometrijskih karakteristikah.

Tudi pri Sliki 3.7 se dotaknimo absolutnih vrednosti statističnih parametrov, čeprav

je primarnega pomena sam potek od scenarija 1 do scenarija 9. Zaradi manjšega števila ponovitev meritev z objektom PKR v primerjavi z objektom Magnet, trendi niso tako gladki. V primeru karakteristike 10 je moč opaziti trend vpadanja indeksa sposobnosti od $C_g \approx 45$ za scenarij 1 do vrednosti 20 za scenarij 5. Posledično sta vrednosti šestkratnika variabilnosti ločeno $1 \mu\text{m}$ in $5 \mu\text{m}$ za scenarij 1 oziroma scenarij 5. Nato ostane vrednost približno enaka za tri scenarije, nakar vrednost indeksa sposobnosti ponovno pade na vrednost $C_g \approx 8$, vrednost variabilnosti pa naraste na $6\sigma \approx 15 \mu\text{m}$.

Praktično identičen trend je pri karakteristiki 100. Razlikujejo se zgolj vrednosti parametrov, v primerjavi s karakteristiko 10, so vrednosti pri karakteristiki 100 nekoliko višji. Pri scenariju 1 je vrednost $C_g \approx 60$, pri scenariju pa znaša vrednot $C_g \approx 20$ ter do scenarija 9 pade na vrednost $C_g \approx 15$.

Podobno je pri tudi pri karakteristiki 140, ki je prav tako dolžinska karakteristika. Vrednosti indeksa zmogljivosti so v primerjavi s preostalimi karakteristikami višje, saj je tolerančno območje za karakteristiko 140 največje ($T = 0,5 \text{ mm}$).

Vrednosti variabilnosti pri karakteristiki 130 so od scenarija 1 do scenarija 9 praktično enake ($6\sigma \approx 2 \mu\text{m}$). Medtem ko je iz poteka indeksa sposobnosti možnost zaznati padec od vrednosti $C_g \approx 70$ pri scenariju 1 do vrednoti $C_g \approx 50$ pri scenariju 9. V primerjavi s preostalimi tremi karakteristikami objekta PKR, padec indeksa C_g pri karakteristiki 130 ni tako izrazit.

3.4.3 Splošna razprava

Primerljivi poteki statističnih indeksov C_g , R in 6σ pri različnih metodah merjenja in vzorčenja PME (TTM, SM in SM+) pri obravnavi objekta Magnet niso presenetljivi. Podobnost v merilni negotovosti med različnimi načini merjenja, diskretno dotikanje ali skeniranje, so pokazali že Bastas et al. [53]. Avtorji so pokazali tudi, da se merilna negotovost zmanjša s povečanjem števila vzorčnih točk. V našem primeru direktne povezave med merilno negotovostjo (6σ) in številom vzorčnih točk nismo uspeli potrditi, saj so bile razlike v analiziranih merilnih rezultatih med posameznimi merilnimi seti/načini merjenja PME zanemarljive. Iz statističnega vidika sta v našem primeru TTM in SM enakovredni, s stališča proizvodnih meritev pa je način SM (oziroma SM+) bolj primeren, saj omogoča hitrejšo izvedbo posameznih meritev.

Merjenje PME v primerjalnem načinu ima lastnost izničenja kinematične napake merilnika, saj identična sistematična napaka vpliva v operaciji merjenja etalona in

objekta. Prav tako ima samodejno vsebovano lastnost kompenzacije vpliva parametrov okolja. Na podlagi primerjalnega načina merjenja in pogostega umerjanja PME lahko trdimo, da absolutna temperatura okolja ter njene spremembe nimajo izrazitejšega vpliva na dimenzijske meritve. Posledično se merilnik lahko nahaja v bližini proizvodne linije. Papananias idr. [18] so v svojih eksperimentih prikazali vpliv spremembe parametrov okolice na standardni odklon meritev dimenzij. Večja ko je bila sprememba temperature okolice med umerjanjem (re-master) in meritvami, večji je bil standardni odklon. V našem primeru smo v skladu s prikazanimi ugotovitvami nastavili ozko temperaturno tolerančno okno $\Delta T = \pm 1^\circ C$. Ker se v nobenem izmed merilnih setov ni prožila zahteva za re-master, lahko sklepamo, da so bili parametri okolice stabilni in posledično niso imeli vpliva na merilno negotovost meritev dimenzij.

Ciljna negotovost s strani podjetja Kolektor ni bila specificirana, zato bi za ciljno vrednost lahko privzeli zahteve analize MSA o ustreznosti merilnega sistema (faktor zmogljivosti C_g višji od 1,33). Iz predhodno omenjenih rezultatov analize MSA je v najslabšem primeru (objekt PKR karakteristika 10) faktor zmogljivosti C_g kar šestkrat višji od mejne vrednosti, kar potrjuje ustreznost merilnega sistema.

Eden izmed glavnih potencialnih vzrokov za naraščanje merilne negotovosti in posledično upad faktorja C_g je sprememba v legi objekta v ležišču glede na lego objekta pri procesu umerjanja (re-master). Pozicijskega odstopanja nismo zaznali, saj je robot pri vstavljanju objekt vedno potisnil do naležne površine, ležišče pa tudi ne dovoljuje "opletanja". Posledično lahko spremembo v legi označimo pretežno kot spremembo v orientaciji objekta. Sprememba v orientaciji objekta se odraža kot vsota ohlapnega nateganja objekta v paleti, v mestu za preprijem in v ležišču. Povečevanje kompleksnosti manipulacije z robotom pomeni več manipulacije v splošnem ali daljše gibe robota, ne nazadnje tudi večje število faz prijemanj med celotnim ciklom merjenja. Scenarij 1 ne vsebuje nobene manipulacije z robotom, nobene faze prijemanja, torej je sprememba v legi (tudi orientaciji) objekta praktično nična. Z dodajanjem kratke faze prijema v scenariju 2 je ta napaka v manjši meri že prisotna. Na Slikah 3.6 in 3.7 se evidentno vidi, da v primeru dolžinskih meritev sprememba v legi objekta med meritvami v primerjavi z lego med umerjanjem narašča skupaj z naraščanjem kompleksnosti manipulacije z robotom.

Vzrok je tudi v osni-simetričnosti obeh obravnavanih objektov, Magnet in PKR. Zaradi osne-simetrije objekta nimata izrazitega robu, ki bi zagotavljal optimalno in determinirano orientacijo objekta v prijemu in v ležišču znotraj PME. Zaradi napake

točnosti in natančnosti robota in splošne situacije v fazi prijemanja se zgodi, da eden izmed prstov pride v stik z objektom pred drugim prstom in ne na predvidenem mestu, kar v kombinaciji z ohlapnejšim naleganjem privede v majhno nezaželeno spremembo v legi objekta. Potencialna rešitev je tesnejše naleganje merjenca. Vendar se moramo zavedati omejitev tesnosti. Tesno naleganje zahteva zelo natančno pozicioniranje objekta v ležišče. V primeru pretesnega naleganja robot zaradi povečanih sil interakcije ne bi bil sposoben izpeti objekta iz palete oziroma ležišča, namreč merjenec bi spolzel iz prijema. Podobno neuspešno bi bilo vstavljanje objekta, saj bi prišlo do prevelike sile. Potencialno bi to privedlo do deformacije oziroma poškodbe objekta, v skrajni sili tudi do poškodbe prijemala in robota.

Najbolj izrazit vpliv na nezaželeno spremembo v legi objekta izvira iz faze prijemanja in tesnosti naleganja objekta v ležišču. Nadalje, pozicijska in orientacijska napaka robota privede do povečanja interaktivnih sil med objektom in trnom ležišča v fazi vstavljanja objekta v ležišče in odstranjevanju objekta, kar poveča nezaželeno spremembo v legi objekta.

Predstavljeni grafi na Slikah 3.5, 3.6 in 3.7 sugerirajo, da večje število prijemanj objekta z robotskim prijemalom povzroča večji raztros merilnih rezultatov. Identično velja za število aktivnih sklepov robota med izvajanjem giba. Manj vključenih aktivnih sklepov (scenarija 3 in 4) se preslika v manjši raztros meritev v primerjavi z gibi, ki imajo aktivnih več sklepov (scenarij 5 do scenarij 9). Nenazadnje, manjše spremembe v legi objekta tudi vodijo v manjši raztros merilnih podatkov. Praktični napotki, ki izvirajo iz prikazane raziskave v Poglavlju 3, so nasvet po minimizaciji števila prijemanj ter minimizaciji števila aktivnih sklepov za izvedbo robotskega giba.

4 Parametri trajektorije gibanja vrha robota

V PRAŠANJE o vplivu kompleksnosti manipulacije z robotom v Poglavlju 3 je postavljeno zelo široko. Specializirana raziskava v tem poglavju bolj ozkogledno obravnava specifično vpliv parametrov trajektorije gibanja vrha robota na raztros dimenzijskih meritev. Potek trajektorije giba robota pogojuje parametra točnosti in natančnosti vrha robota.

Začetne in končne lege trajektorij robota, ki pogojujejo dolžino robotskega giba, so predstavljene najprej. Sledi vrednotenje vpliva parametrov trajektorije na negotovost meritev dimenzij, ki je razdeljeno na dva glavna sklopa. Prvi del obravnava primerjavo linearne giba vrha robota z gibom robota po sklepih, tj. različnih interpolacijskih metod. Drugi del obravnava primerjavo gibov z različnimi aktivnimi sklepi robota za izvedbo robotovega giba.

Vpliv posameznih parametrov trajektorije, posledično točnosti in natančnosti robota, je iskan na podlagi opazovanja spremembe variabilnosti meritev dimenzij in ne s sledenjem lege vrha robota. Merilni rezultati eksperimentov vrednotenja vpliva parametrov trajektorije so analizirani s proceduro 1 analize MSA. Nadalje je statistična neodvisnost posameznih vplivnih parametrov preverjana z metodo analize variance ANOVA. Razprava o ugotovitvah eksperimentalnih rezultatov zaključuje obravnavo parametrov trajektorije gibanja robota na variabilnost meritev dimenzij.

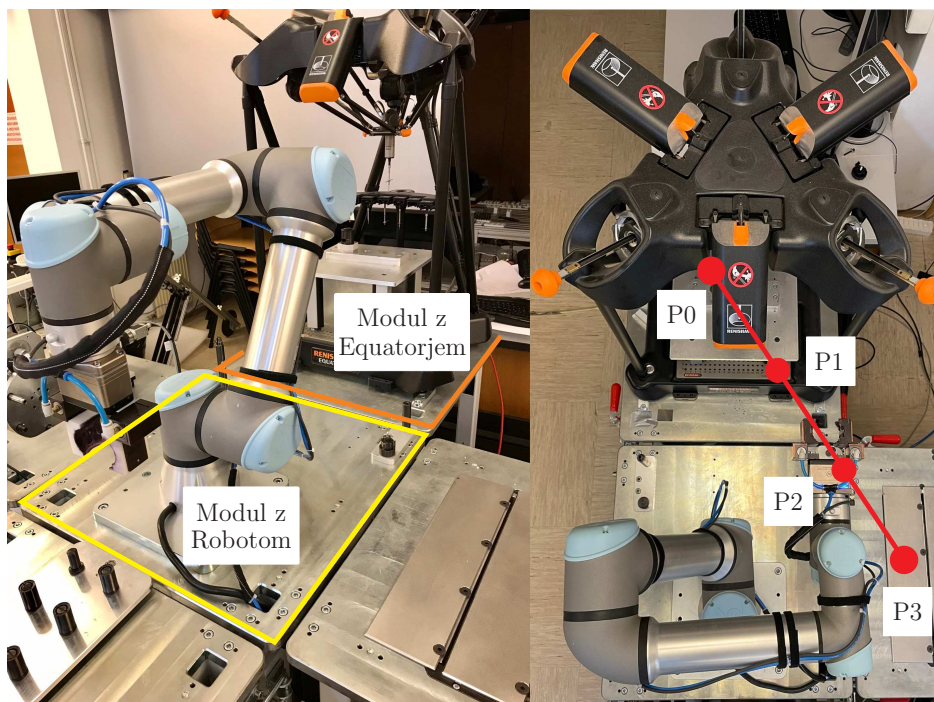
4.1 Navidezna daljica

V obeh sklopih smo poleg iskanja vplivov načina giba in števila aktivnih sklepov, iskali tudi vpliv hitrosti robotskega giba, dolžine giba in zasuka v sklepih na raztros

meritev. V ta namen smo definirali navidezno daljico, vzporedno z XY ravnino baznega koordinatnega sistema (KS) robota. Začetek daljice se nahaja v točki P0 nad ležiščem znotraj delovnega prostora PME. Konec daljice je definiran v točki P3, ki je za 40 cm oddaljena od točke P0. Navidezno daljico smo razdelili na tri enako dolge odseke in posledično med obema krajiščema definirali točki P1 in P2. Tlorisna ponazoritev navidezne daljice z vsemi štirimi točkami P0, P1, P2 in P3 je prikazana na Sliki 4.1.

Navidezna daljica in točke so definirane tako, da je robot sposoben izvesti linearne gibe ali gibe po sklepih, ločeno, iz točk P1, P2 in P3 do točke P0, ne da bi pri tem trčil v konstrukcijo PME ali prečkal točke, ki bi povzročile singularnost robotske roke.

Točke P0, P1, P2 in P3 v merilnih scenarijih, predstavljenih v podpoglavjih 4.2 in 4.3, služijo kot začetna in končna lega vrha robota.



Slika 4.1: Adaptivna robotska celica z robotom UR5e in primerjalnim merilnikom Equator (levo). Tlorisna ponazoritev navidezne daljice s točkami P0, P1, P2 in P3 (desno).

4.2 Linearen gib in gib po sklepih

V prvem delu preučevanja vplivov posameznih parametrov trajektorije gibanja robota na merilno negotovost smo primerjali, ali različni gibi vrha robota (linearni gib vrha robota ali gib po sklepih) vplivajo različno na raztros dimenzijskih meritev.

Scenarij z najmanj robotske manipulacije je v primeru, ko je za začetno lego vrha robota izbrana točka P0. Točka P0 se nahaja neposredno nad ležiščem znotraj delovnega območja PME. V tem primeru je robot držal objekt v prijemu, ga neposredno vstavil v ležišče in zapustil delovno območje PME, kar je sprožilo dimenzijske meritve PME. Po opravljenih kontaktnih dimenzijskih meritvah se je robot približal objektu v ležišču, ga prijel in odstranil iz ležišča neposredno do začetne/končne točke P0, kjer se zaključí izvedba enega cikla meritev.

Celoten cikel manipulacije z robotom skupaj z dimenzijskimi meritvami se ponovi 26-krat. Prva meritev je definirana kot umerjanje PME (re-mastering), nato sledi 25 zaporednih ponovitev manipulacije z robotom in dimenzijskih meritev.

Ostali scenariji so si zelo podobni, razlikujejo se po dolžini gibanja robota oziroma začetnem/končnem položaju. V vseh primerih robot predhodno drži objekt v prijemu v izbrani začetni legi (P1, P2 ali P3), nato se premakne v točko P0. Sledi enak potek cikla kot v primeru začetnega položaja v točki P0 (vstavljanje objekta, dimenzijske meritve in odstranjevanje objekta). Na koncu robot ponovno zaključí cikel v izbranem začetnem položaju.

Takšen niz meritev se ponovi ločeno za linearne gibe in gibe robota po sklepih. Hitrost gibov robota med položaji P0 in P1 oziroma P2 ter P3 smo spreminjali. Pri linearnem gibu smo meritve opravili pri treh različnih hitrostih vrha robota, tj. 0,3 m/s, 1,5 m/s in 2,5 m/s. V primeru izvedbe gibov po sklepih so bile hitrosti sklepov 0,5 rad/s, 1,5 rad/s in 3,0 rad/s.

4.3 Število aktivnih sklepov

Drugi del se je posvečal variabilnosti dimenzijskih meritev zaradi različnega števila aktivnih sklepov robota potrebnih za izvedbo robotskega giba. V ta namen smo oblikovali štiri nove scenarije robotske manipulacije – kombinacija sklepov, od enega aktivnega sklepa do štirih aktivnih sklepov za izvedbo potrebnega giba (Tabela 4.1). V prvem

scenariju je aktiven samo peti sklep robota. Drugi in tretji sklep robota sta aktivna v drugem scenariju. V tretjem scenariju so aktivni drugi, tretji in četrty sklep robota, v zadnjem scenariju pa so aktivni drugi, tretji, četrty in peti sklep robota. Poimenovanje sklepov je običajno za to vrsto robota. Imena scenarijev sestavljajo kratice aktivnih sklepov v posameznem scenariju.

Prikaz sklepov in osi robota UR5e je prikazan na Sliki 2.2. Poimenovanja robotskih sklepov so od spodaj navzgor (zaradi boljše in lažje predstave ter navezave na originalno poimenovanje so navedeni z angleškimi izrazi/poimenovanji): **B**ase, **S**houlder, **E**lbow, **W**rist **1**, **W**rist **2** and **W**rist **3**.

Tabela 4.1: Scenariji kombinacije sklepov za preučevanje odvisnosti merilne negotovosti od števila aktivnih sklepov. Aktiven sklep je označen s kljukico, medtem ko $\Delta\varphi$ predstavlja korak v zasuku sklepa. Poimenovanje sklepov robota UR5: B - Base, S - Shoulder, E - Elbow, W1 - Wrist 1, W2 - Wrist 2 and W3 - Wrist 3.

Kombinacija sklepov	B	S	E	W1	W2	W3	$\Delta\varphi$
W2					✓		30°
SE		✓	✓				20°
SEW1		✓	✓	✓			20°
SEW1W2		✓	✓	✓	✓		20°

V tem delu smo tudi uporabili kombinacije različnih hitrosti, pri čemer smo opazovali variabilnost dimenzijskih meritev objekta. Scenarije meritev smo ponovili pri dveh hitrostih gibanja sklepov, tj. 0,5 rad/s in 3,0 rad/s. Zavedati se je potrebno, da linearnega giba vrha robota ne moremo izvesti z aktiviranjem zgolj nekaterih sklepov.

Dodatno smo opazovali, ali velikost rotacije sklepa vpliva na variabilnost meritev. V ta namen smo pri vsaki izmed hitrosti izvedli meritve za tri različne zasuke v sklepih poleg ničelnega zasuka. Za scenarij W2 so bili zasuki v sklepih $\varphi = (0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ)$, v preostalih primerih pa so bili zasuki v aktivnih sklepih $\varphi = (0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ)$.

4.4 Eksperimenti

Vsak scenarij v prvem (linearen gib in gib po sklepih) in drugem delu (število aktivnih sklepov) je bil za ustrezno statistično oceno ponovljen trikrat. Prvi del meritev

vključuje vpliv trajektorije robota za dva načina gibanja (=2) pri treh različnih hitrostih (=3) in treh razdaljah (P1, P2 in P3) (=3). Skupaj z meritvami v točki P0 je rezultat $2 \cdot 3 \cdot 3 + 1 = 19$ različnih trajektorij robota/scenarijev meritev. Če upoštevamo podatke za šest geometrijskih dimenzij dveh objektov (=6), tri ponovitve merilnih nizov (=3) in 25 meritev znotraj enega seta meritev, imamo v prvem delu $19 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 25 = 8550$ meritev dimenzij. V drugem delu smo dodali meritve štirih scenarijev manipulacije (=4) pri dveh hitrostih (=2) in treh velikostih rotacij sklepov (=3), tj. $4 \cdot 2 \cdot 3 = 24$ novih scenarijev meritev in posledično $24 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 25 = 10800$ meritev (vrednosti 6, 3 in 25 imajo enako razlago kot zgoraj). Študija vpliva parametrov trajektorije gibanja vrha robota na negotovost meritev skupaj obsega $8500 + 10800 = 19350$ dimenzijskih meritev.

Meritve posameznih ponovitev smo nadalje analizirali s proceduro 1 MSA analize. Največ pozornosti smo posvetili šestkratniku standardnega odklona 6σ , ki opisuje variabilnost ter posledično negotovost meritev. V Poglavju 3 smo pokazali normalno porazdelitev merilnih podatkov, kar nam dovoljuje nadaljnjo statistično obravnavo z metodo analize variance (ANOVA) za statistično opredeljevanje vpliva posameznih parametrov trajektorije vrha robota na 6σ vrednosti.

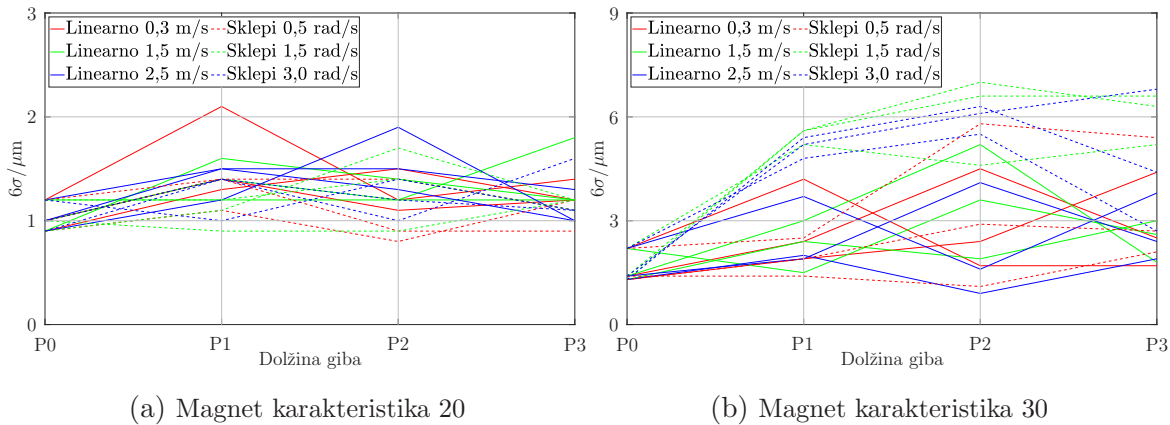
4.4.1 Linearen gib in gib po sklepih

Izmerjene in preračunane podatke, ki prikazujejo vrednosti 6σ v odvisnosti od načina robotskega giba (linearno ali po sklepih), hitrosti giba in dolžine giba, so prikazane na Slikah 4.2 in 4.3.

Merilni podatki analizirani s proceduro 1 analize MSA za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet so ločeno prikazani na Slikah 4.2a in 4.2b. Slike 4.3a, 4.3b, 4.3c in 4.3d ločeno predstavljajo analizirane podatke za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR. Vsaka točka na Slikah 4.2 in 4.3 izhaja iz nabora 25 ponovitev meritev za posamezen scenarij.

Točke so povezane s črtami, pri čemer polne črte predstavljajo meritve pri linearnih gibih vrha robota, prekinjene črte pa meritve pri izvedbi gibov robota po sklepih. Polne rdeče črte predstavljajo linearne gibe s hitrostjo 0,3 m/s, polne zelene črte linearne gibe s hitrostjo 1,5 m/s, polne modre črte pa linearne gibe s hitrostjo 2,5 m/s. Prekinjene rdeče črte predstavljajo gibe robota pri hitrosti v sklepih 0,5 rad/s, prekinjene zelene črte pri hitrosti v sklepih 1,5 rad/s, prekinjene modre črte pa gibe pri hitrosti v sklepih

3,0 rad/s. Začetne/končne lege gibanja P0, P1, P2 in P3 za določen niz podatkov so prikazani na horizontalno osi, vrednosti 6σ pa na vertikalni osi. Označbe P0, P1, P2 in P3 si lahko razlagamo tudi kot razdalje, ki jih opravi vrh robota pri manipulaciji objekta.

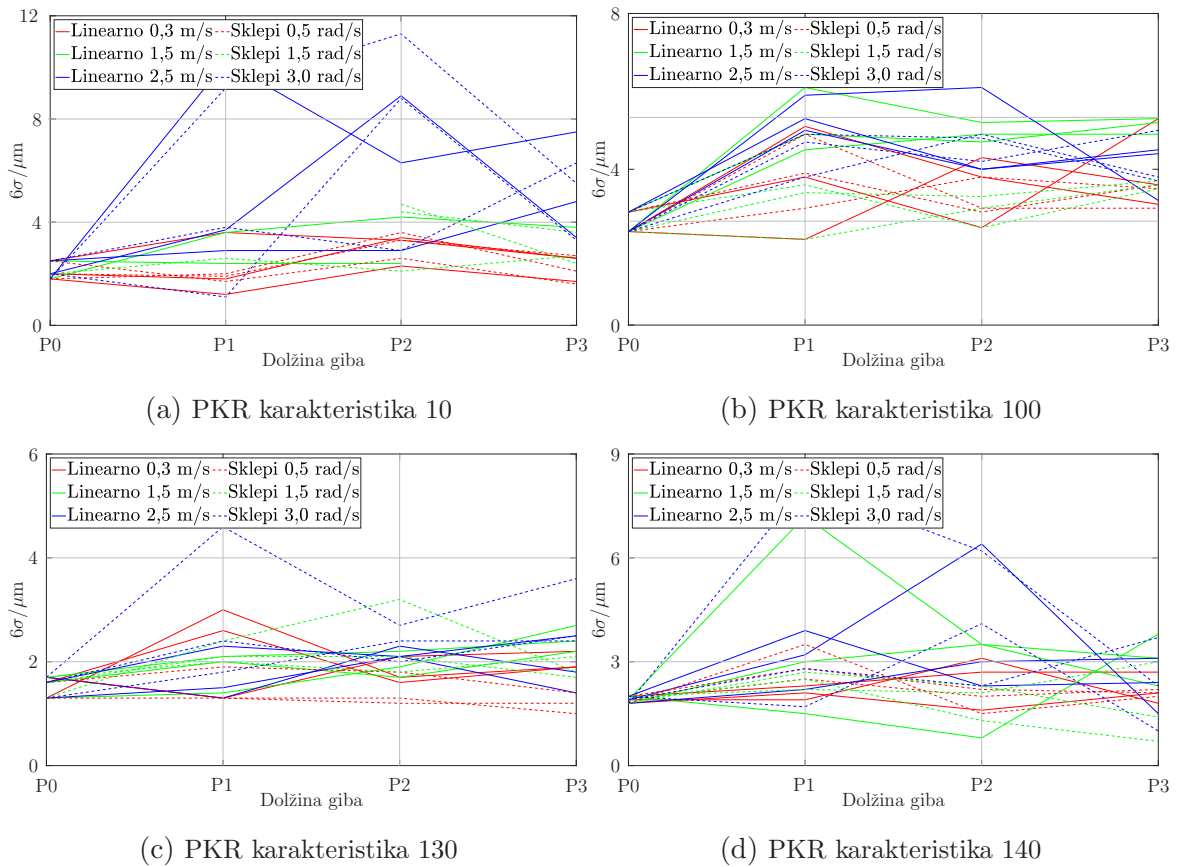


Slika 4.2: Variabilnost dimenzijskih meritev (6σ) v odvisnosti od načina izvedbe giba robota (linearno ali po sklepih), hitrosti in dolžine giba za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet.

4.4.2 Število aktivnih sklepov

V nadaljevanju so na Slikah 4.4 in 4.5 prikazani rezultati preučevanja vpliva števila aktivnih sklepov robota za izvedbo robotskega giba na variabilnost dimenzijskih meritev. Izračunani podatki geometrijskih karakteristik 20 in 30 objekta Magnet so ločeno prikazani na Slikah 4.4a in 4.4b, medtem ko so meritve drugega dela, za vse štiri geometrijske karakteristike objekta PKR, ločeno prikazane na Slikah 4.5a, 4.5b, 4.5c in 4.5d.

Rdeča barva predstavlja scenarij z enim aktivnim sklepom (W2 - glej Tabelo 4.1), zelena barva predstavlja scenarij z dvema aktivnima sklepoma (SE), modra barva predstavlja scenarij s tremi aktivnimi sklepi (SEW1), črna barva pa scenarij s štirimi aktivnimi sklepi (SEW1W2). Na Slikah 4.4 in 4.5 polne črte prikazujejo meritve pri izvajanju gibov robota pri hitrosti sklepov 0,5 rad/s, prekinjene črte pa gibanje robota pri hitrosti sklepov 3,0 rad/s. Zasuk v aktivnih sklepih robota ($\varphi = (0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ)$ v primeru scenarija W2 in $\varphi = (0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ)$ v preostalih primerih) je prikazan na horizontalni osi.



Slika 4.3: Variabilnost dimenzijskih meritev (6σ) v odvisnosti od načina izvedbe giba robota (linearno ali po sklepih), hitrosti in dolžine giba za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR.

4.4.3 Analiza variance – ANOVA

Slike 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 vsebujejo veliko podatkov predstavljenih s številnimi točkami, ki se v večini primerov prekrivajo. Za preverjanje, ali so posamezni seti meritev, ki predstavljajo en sklop parametrov (hitrost, razdalja itd.), statistično neodvisne skupine od drugih vrednosti parametrov, smo uporabili metodo ANOVA. V Tabelah 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 so povzeti rezultati (F - in p -vrednosti) metode ANOVA. F -vrednosti in ustrezne p -vrednosti variabilnosti dimenzijskih meritev za načine giba robota (linearno ali skupno gibanje), hitrost giba, dolžino giba in njihove medsebojne interakcije v prvem delu preučevanja vpliva parametrov trajektorije robota na negotovost meritev so zbrane v Tabelah 4.2 in 4.3.

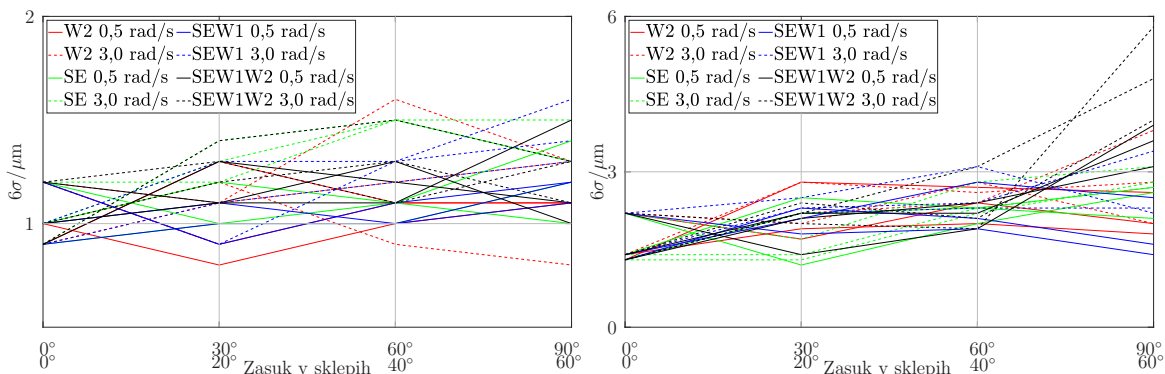
Statistične F -vrednosti in p -vrednosti drugega dela meritev, kjer nas je zanimala statistična odvisnost variabilnosti meritev zaradi števila aktivnih sklepov (kombinacija

sklepov), hitrosti rotacije sklepov in velikosti zasuka v sklepkih, so zbrane v Tabelah 4.4 in 4.5.

V obeh primerih, prvi in drugi del meritev, sta statistična parametra F in p izračunana za karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet ter karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR. Kot običajno, se statistično neodvisnost med dvema setoma podatkov lahko upošteva v primeru, ko je p -vrednost manjša od $p_{\min} = 0,05$.

Metoda ANOVA primerja ničelno hipotezo H_0 , pri kateri so povprečja skupin podatkov enaka, z alternativno hipotezo H_1 , pri kateri velja, da se vsaj eno povprečje skupine podatkov razlikuje od drugih. Ničelna hipoteza se zavrne v primeru p -vrednosti manjše od $p_{\min} = 0,05$, kar pomeni, da se vsaj ena srednja vrednost za skupino meritev razlikuje od ostalih. V praksi različni testni parametri vodijo do statistično razločljivih izhodnih skupin.

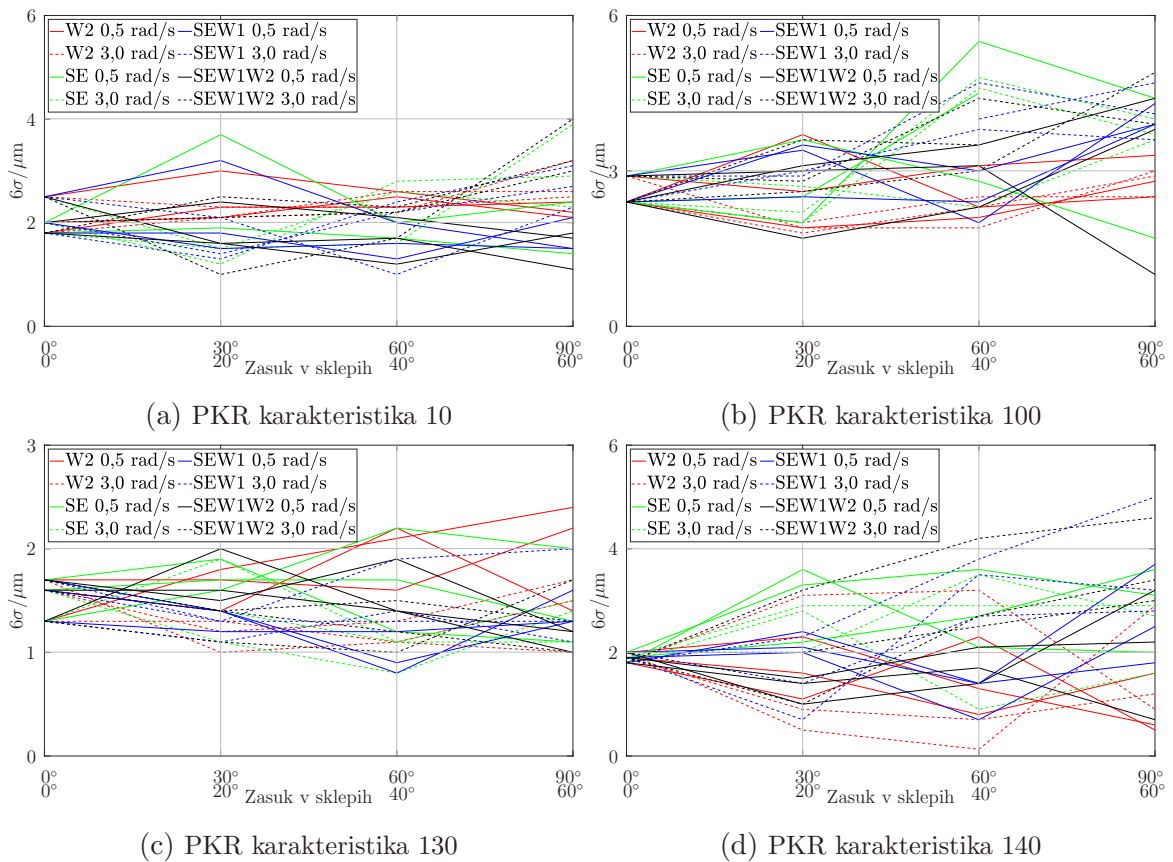
Za statistično analizo vplivnih parametrov trajektorije gibanja vrha robota smo izvedli tako enosmerno (ang. one-way) ANOVO kot tudi dvosmerno (ang. two-way) ANOVO. Enosmerna ANOVA je omogočila podrobno primerjavo povprečnih vrednosti pri spremembi vrednosti zgolj enega izmed vplivnih parametrov trajektorije giba, npr. različni načini giba, medtem ko je dvosmerna ANOVA omogočila celovitejšo analizo, ki je zajemala vpliv več faktorjev hkrati ter morebitne interakcije med njimi.



(a) Magnet karakteristika 20

(b) Magnet karakteristika 30

Slika 4.4: Variabilnost dimenzijskih meritev (6σ) v odvisnosti od števila aktivnih sklepov, hitrosti in zasuka v posameznih aktivnih sklepkih za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet. Scenarij W2 predstavlja gibanje robota z enim aktivnim robotskim sklepom, scenarij SE z dvema aktivnima sklepoma, scenarij SEW1 s tremi aktivnimi sklepi in scenarij SEW1W2 predstavlja gibanje s štirimi aktivnimi sklepi. V primeru scenarija W2 znaša korak zasuka v sklepkih 20° , za preostale scenarije 30° .



Slika 4.5: Variabilnost dimenzijskih meritev (6σ) v odvisnosti od števila aktivnih sklepov, hitrosti in zasuka v posameznih aktivnih sklepkih za geometrijske karakteristike 10, 100, 130 in 140 objekta PKR. Scenarij W2 predstavlja gibanje robota z enim aktivnim robotskim sklepom, scenarij SE z dvema aktivnima sklepoma, scenarij SEW1 s tremi aktivnimi sklepi in scenarij SEW1W2 predstavlja gibanje s štirimi aktivnimi sklepi. V primeru scenarija W2 znaša korak zasuka v sklepkih 20° , za preostale scenarije 30° .

Rezultati enosmerne ANOVE so predstavljeni v zgornjih treh vrsticah v Tabelah 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5, kjer metoda preverja zgolj vpliv posameznega parametra. Torej, prva vrstica v Tabelah 4.2 in 4.3 predstavlja izračune statističnih parametrov F in p pri izvedbi različnega načina robotskega giba. Podobno so predstavljeni rezultati ločene obravnave hitrosti in dolžine izvedenega robotskega giba v drugi ter tretji vrstici. V Tabelah 4.4 in 4.5 pripadajo ločeno prva vrstica obravnavi različnih kombinacij sklepov, druga vrstica obravnavi različnih hitrosti ter tretja vrstica obravnavi veličini zasukov v sklepkih robota. Za statistično odvisnost vplivnih parametrov trajektorije velja, ko je parameter p manjši od 0,05. V slednjem primeru imamo posledično različno število statistično neodvisnih skupin meritev.

Tabela 4.2: Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt Magnet pri virih variabilnosti: način robotskega giba (linearno ali po sklepih), hitrost giba in dolžina giba. Opazovane so tudi njihove medsebojne interakcije (označene z \times). Ustrezni F - in p - vrednosti, ki označujeta statistično pomembnost virov za določeno geometrijsko dimenzijo objektov, sta zapisani krepko.

Vir	F -vrednost (p -vrednost)	
	20	30
Gib	5.97 (0.018)	28.38 (0.000)
Hitrost	0.13 (0.876)	5.51 (0.007)
Dolžina	6.11 (0.001)	14.72 (0.000)
Gib \times Hitrost	0.30 (0.746)	7.08 (0.002)
Gib \times Dolžina	1.07 (0.370)	3.36 (0.025)
Hitrost \times Dolžina	1.11 (0.367)	0.83 (0.553)

Tabela 4.3: Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt PKR pri virih variabilnosti: način robotskega giba (linearno ali po sklepih), hitrost giba in dolžina giba. Opazovane so tudi njihove medsebojne interakcije (označene z \times). Ustrezni F - in p - vrednosti, ki označujeta statistično pomembnost virov za določeno geometrijsko dimenzijo objektov, sta zapisani krepko.

Vir	F -vrednost (p -vrednost)			
	10	100	130	140
Gib	0.03 (0.866)	13.86 (0.000)	0.17 (0.679)	0.32 (0.577)
Hitrost	15.53 (0.000)	6.38 (0.003)	4.97 (0.010)	2.69 (0.077)
Dolžina	5.71 (0.002)	23.58 (0.000)	4.49 (0.007)	3.59 (0.019)
Gib \times Hitrost	0.07 (0.934)	6.29 (0.003)	6.76 (0.002)	1.64 (0.203)
Gib \times Dolžina	0.43 (0.734)	1.65 (0.190)	0.48 (0.695)	0.27 (0.847)
Hitrost \times Dolžina	1.57 (0.175)	1.58 (0.170)	0.83 (0.555)	1.07 (0.391)

Tabela 4.4: Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt Magnet pri virih variabilnosti: Kombinacija sklepov, hitrost gibanja robota in zasuk sklepov za izvedbo giba. Opazovane so tudi njihove medsebojne interakcije (označene z \times). Ustrezni F - in p - vrednosti, ki označujeta statistično pomembnost virov za določeno geometrijsko dimenzijo objektov, sta zapisani krepko.

Vir	F -vrednost (p -vrednost)	
	20	30
Kombinacija	2.41 (0.074)	4.79 (0.004)
Hitrost	16.94 (0.000)	9.08 (0.004)
Zasuk	8.24 (0.000)	32.35 (0.000)
Kombinacija \times Hitrost	1.11 (0.350)	0.92 (0.435)
Kombinacija \times Zasuk	0.91 (0.520)	6.43 (0.000)
Hitrost \times Zasuk	2.45 (0.071)	3.89 (0.012)

Tabela 4.5: Rezultati analize variance (F - in p -vrednosti) za objekt PKR pri virih variabilnosti: Kombinacija sklepov, hitrost gibanja robota in zasuk sklepov za izvedbo giba. Opazovane so tudi njihove medsebojne interakcije (označene z \times). Ustrezni F - in p - vrednosti, ki označujeta statistično pomembnost virov za določeno geometrijsko dimenzijo objektov, sta zapisani krepko.

Vir	F -vrednost (p -vrednost)			
	10	100	130	140
Kombinacija	2.34 (0.081)	5.17 (0.003)	1.61 (0.195)	6.49 (0.001)
Hitrost	4.42 (0.039)	1.45 (0.232)	9.67 (0.003)	4.40 (0.039)
Zasuk	3.30 (0.025)	9.90 (0.000)	0.98 (0.410)	2.67 (0.054)
Kombinacija \times Hitrost	1.53 (0.214)	2.00 (0.122)	4.49 (0.006)	3.05 (0.034)
Kombinacija \times Zasuk	0.52 (0.855)	1.76 (0.091)	1.18 (0.320)	1.97 (0.055)
Hitrost \times Zasuk	12.22 (0.000)	1.24 (0.301)	1.67 (0.180)	2.18 (0.098)

Spodnje tri vrstice v Tabelah 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 pripadajo predstavitvi rezultatov medsebojne interakcije dvosmerne ANOVE. Obravnava medsebojnih interakcij je ključna, saj razkriva potencialne kompleksne povezave med parametri trajektorije gibanja vrha robota. Medsebojna interakcija med dvema neodvisnima parametroma nastane, ko učinek enega parametra na odvisno spremenljivko (variabilnost meritev dimenzij) ni enak pri vseh vrednostih drugega parametra. To pomeni, da se učinek enega parametra spreminja glede na raven drugega parametra. Tudi v primeru obravnave medsebojne interakcije velja, da imamo več statistično neodvisnih merilnih setov, ko velja $p < 0,05$.

V četrthi vrstici v Tabelah 4.2 in 4.3 so prikazani rezultati pri preverjanju medsebojne interakcije načina izvedbe giba in hitrosti na variabilnost meritev dimenzij. Rezultati preverjanja interakcije med načinom giba in dolžino izvedenega giba so prikazani v peti vrstici, v zadnji vrstici pa so prikazani rezultati preverjanja medsebojne interakcije med hitrostjo in dolžino izvedenega giba na variabilnost meritev dimenzij.

Četrta vrstica v Tabelah 4.4 in 4.5 navaja rezultate preverjanja medsebojne interakcije za parametra kombinacije sklepov in hitrosti, v peti vrstici so predstavljeni rezultati preverjanja interakcije med kombinacijo sklepov in zasukov v sklepih, medtem zadnja vrstica predstavlja preverjanje medsebojne interakcije hitrosti v sklepih in zasukov pri izvedenem gibu na variabilnosti meritev dimenzij.

4.5 Razprava

V tem razdelku sta zajeta dva eksperimentalna sklopa ocenjevanja učinkov posameznih parametrov robotove trajektorije na meritve dimenzij. Kot prva je izpostavljena primerjava vplivov linearnega giba in giba po sklepih ob sočasni obravnavi hitrosti in dolžine giba na dimenzijske meritve. Druga bistvena vsebina je vpliv števila aktivnih sklepov za izvedbo robotskega giba ter vpliv hitrosti vrtenja sklepov in velikosti rotacije sklepov.

Poudariti je potrebno, da glavni cilj naše raziskave ni bil vrednotiti lastnosti robota z vidika točnosti in natančnosti. Naš glavni cilj je bil raziskati, ali različne trajektorije robota povzročajo različno variabilnost dimenzijskih meritev. Vendar pa se moramo zavedati, da je bila različna variabilnost dimenzijskih meritev posredno odvisna tudi od točnosti in natančnosti robota. Vsako manjše odstopanje v poziciji ali orientaciji

vstavljenega objekta za merjenje v ležišču PME ima za posledico meritve z dotiki merilne konice na različnih točkah merjenja in s tem odčitavanje različnih vrednosti (objekt se med iteracijami premakne, merilni program PME pa je ves čas identičen).

Nadalje, s pomočjo planiranja trajektorij s polinomi se lahko doseže zvezne gladke trajektorije [54], toda naša osredotočenost je bila zgolj na primerjavi osnovnih gibov, torej linearnega giba vrha in gibov po sklepih robota.

Hitro in preprosto opazovanje Slik 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 nam razkrije, da imajo različne trajektorije robota različne vplive na variabilnost dimenzijskih meritev. Po pričakovanih razlike v variabilnosti nabora podatkov med posameznimi scenariji niso tako opazne kot v prejšnji študiji kompleksnosti manipulacije (Poglavje 3), kjer smo iskali različne prispevke, ki izvirajo iz prijemanja, preprijemanja in preostale robotske manipulacije.

Splošno opazovanje grafov na Slikah 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 razkriva, da vrednosti variabilnosti dimenzijskih meritev, pridobljene v tem delu raziskav, sovpadajo z vrednostmi v scenariju 7 iz raziskave kompleksnosti manipulacije. Nadalje, scenarij 7 iz raziskave kompleksnosti manipulacije ustreza scenariju v prvem delu trenutnih meritev z začetnim položajem trajektorije v točki P0 oziroma pri $\varphi = 0^\circ$ v drugem delu.

4.5.1 Primerjava načinov giba robota

V prvem delu trenutnih meritev je bila glavna naloga preučiti morebitni vpliv načina robotskega giba (linearni gib ali gib po sklepih) na variabilnost meritev. Z drugimi besedami, vprašali smo se, ali algoritmi krmilnika robota skupaj s pripadajočimi gibi vplivajo na točnost in natančnost gibanja robota, ki premika merilni objekt. Na podlagi grafov na Slikah 4.2 in 4.3, ki prikazujeta primerjavo variabilnosti dimenzijskih meritev v primeru linearnih gibov oziroma gibov po sklepu, je jasno, da način robotskega giba vpliva na variabilnost merilnih podatkov. To bi lahko natančneje izrazili tako, da se linearni gibi vrha robota odražajo v večji variabilnosti za vse predstavljene razdalje gibanja robota. Celotna skupina polnih črt, ki predstavljajo linearne gibe vrha robota, je na grafih pomaknjena nekoliko višje v primerjavi s skupino prekinjenih črt, ki predstavljajo gibe po sklepih. Ta trditev velja za isti merilni objekt in isto geometrijsko karakteristiko, npr. karakteristika 20 objekta Magnet (Slika 4.2a).

Meritve za geometrijsko dimenzijo 30 (višina) objekta Magnet (Slika 4.2b) odstopajo od opažanj o večji variabilnosti v primeru linearnih gibov vrha robota. Grafi

prikazujejo, da imajo gibi izvedeni po sklepih v tem primeru večjo variabilnost meritev od linearnih gibov vrha robota.

Da bi prepoznali prekrivanje dveh ali več skupin podatkov (tj. linearnih gibov ali gibov po sklepih) ali potrdili obstoj teh primerov kot neodvisnih skupin podatkov, smo uporabili metodo ANOVA. F -vrednosti in p -vrednosti statistične primerjave ANOVA v Tabelah 4.2 in 4.3 navajajo statistične parametre med skupinami meritev linearnih gibov vrha robota in gibov po sklepih robota.

Za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet ter 100 objekta PKR so ustrezne p -vrednosti za način izvedbe robotskega giba nižje od $p_{\min} = 0,05$. Ničelna hipoteza za te značilnosti je zavrnjena, kar ima za posledico dva neodvisna sklopa podatkov (linearno gibanje in gibanje po sklepih). Uporaba linearnega giba ali giba po sklepih torej vpliva na rezultate meritev dimenzij, saj različna giba povzročata različno variabilnost meritev dimenzij.

Praktična razlika v načinih izvedenih gibov je v tem, da pri gibih po sklepih ni potrebne aktivacije vseh sklepov robota. Poleg tega je velikost rotacij sklepov v primeru gibanja po sklepih manjša. Prav tako je vrtenje sklepov prisotno le v eni smeri pri enem gibanju. V primeru linearnega gibanja vrha robota so lahko rotacije aktivnih sklepov izvedene v obeh smereh, da bi sledili linearni poti vrha robota (orodja). Posledično lahko sklepamo, da obsežnejše rotacije sklepov in rotacije v obeh smereh povzročajo nekoliko večje napake v položaju in orientaciji vrha robota, kar je vzrok za opaženo nekoliko višjo vrednost variabilnosti meritev.

Z medsebojno primerjavo Slik 4.2 in 4.3 lahko trdimo o vplivu hitrosti izvedbe robotskega giba na variabilnost meritev. Višja ko je hitrost gibanja, večja je variabilnost dimenzijskih meritev. Na posameznih grafih je vpliv hitrosti na variabilnost razumljiv na podlagi primerjave rdečih, zelenih in modrih črt, neodvisno od linearnega giba (polne črte) oziroma giba po sklepih (prekinjene črte). Rdeče črte predstavljajo izvedene gibe pri najnižji hitrosti (0,3 m/s oziroma 0,5 rad/s), zelene črte predstavljajo gibe robota pri srednjih hitrostih (1,5 m/s oziroma 1,5 rad/s), medtem ko modre črte predstavljajo izvedene gibe robota pri najvišjih hitrostih (2,5 m/s oziroma 3,0 rad/s). Razvidno je, da so v splošnem rdeče črte postavljene nižje od zelenih in modrih črt za vse štiri dolžine robotskih gibov pri obeh načinih izvedbe robotskega giba pri meritvah objekta Magnet. Pri geometrijskih dimenzijah objekta PKR prav tako velja, da so modre črte postavljene višje od rdečih in zelenih črt za oba načina giba. Z drugimi besedami,

najnižje hitrosti robotskih gibov se odražajo z manjšo variabilnostjo meritev, medtem ko se najvišje hitrosti odražajo z največjo variabilnostjo dimenzijskih meritev. Razlike v vrednostih za različne hitrosti so sicer majhne, vendar zaznavne.

Statistična primerjava z metodo ANOVA vpliva hitrosti na variabilnost meritev dimenzij v prvem delu (Tabeli 4.2 in 4.3) zavrne ničelno hipotezo H_0 in potrди alternativno hipotezo H_1 za geometrijsko dimenzijo 30 objekta Magnet ter dimenzije 10, 100 in 130 objekta PKR. Posledično lahko obravnavamo, da imamo za vsako navedeno geometrijsko karakteristiko najmanj dve statistično neodvisni merilni skupini s p -vrednostmi manjšimi od $p_{\min} = 0,05$. Dodatno je p -vrednost karakteristike 140 objekta PKR približno enaka mejni vrednosti in bi lahko tudi za to dimenzijo obravnavali merilne sete pri različnih hitrostih kot statistično različne sklope meritev.

Opaziti je, da je alternativna hipoteza H_1 za vpliv hitrosti na dimenzijske meritve potrjena za štiri od šestih obravnavanih geometrijskih dimenzij in pogojno potrjena za eno dodatno dimenzijo. Zato lahko hitrost izvedbe robotskega giba štejemo kot vplivni parameter trajektorije gibanja vrha robota na variabilnost meritev oziroma na merilno negotovost dimenzij izdelkov.

Ob upoštevanju Slik 4.2 in 4.3 ne moremo trditi, da dolžina izvedenega robotovega giba (začetne/končne lege P0, P1, P2 in P3) vpliva na variabilnost izmerjenih podatkov PME. Vrednost 6σ je najnižja v primeru najkrajše razdalje (P0), kar je povsem logično. Vrednosti variabilnosti se s povečevanjem razdalje (pomikanje iz leve proti desni od P0 proti P3) rahlo povečujejo oziroma ostajajo približno enake, trend naraščanja ni izrazit.

V nasprotju z vizualnimi opažanji vpliva dolžine giba na variabilnost meritev dimenzij na Slikah 4.2 in 4.3 rezultati izračunov ANOVA v Tabelah 4.2 in 4.3 zavrnejo ničelno hipotezo pri obravnavi dolžine kot vplivni parameter. To pomeni, da so srednje vrednosti merilnih podatkov različne za različne dolžine gibov. Posledično lahko tudi dolžino robotskega giba obravnavamo kot vplivni parameter trajektorije gibanje vrha robota na merilno negotovost meritev dimenzij.

Podatki v prvih treh vrsticah v Tabelah 4.2 in 4.3 kažejo, da sprememba vrednosti enega vplivnega parametra, na primer dolžina robotskega giba, povzroči nastanek vsaj dveh statistično različnih in neodvisnih merilnih skupin z različnimi srednjimi vrednostmi in na podlagi tega lahko ugotovimo statistično odvisnost/neodvisnost podatkovnih skupin. Skupne interakcije vplivnih parametrov so predstavljene v spodnjih treh vrsticah v Tabelah 4.2 in 4.3.

Za objekt Magnet (Tabela 4.2) je moč trditi, da nimamo medsebojnih interakcij posameznih parametrov na variabilnost dimenzij izdelkov. Pri geometrijski karakteristiki 20 (premer) so vse p - vrednosti bistveno višje od mejne vrednosti. Za karakteristiko 30 (višina) pa sta p - vrednosti v primeru medsebojne interakcije med načinom giba in hitrostjo giba ter načinom giba ter dolžino izvedenega giba manjše od mejne vrednosti $p_{\min} = 0,05$, vendar je bila že predhodno ugotovljena statistična odvisnost od vseh treh posameznih vplivnih parametrov.

Prav tako lahko trdimo za objekt PKR (Tabela 4.3), da medsebojnih vplivov na variabilnost meritev dimenzij ni, saj so praktično za vse kombinacije p - vrednosti znatno višje od mejne vrednosti. Statistično odvisnost navajajo izračuni zgolj za geometrijski karakteristiki 100 (višina do venca) in 130 (premer utora). Pri višini do venca je bila že predhodno ugotovljena odvisnost od vseh treh vplivnih parametrov, za premer utora pa je bila ugotovljena medsebojna interakcija med načinom izvedenega giba in hitrostjo (hitrost je predhodno potrjena kot statistično neodvisni vplivni parameter).

4.5.2 Število aktivnih sklepov

Rezultati drugega dela raziskave so prikazani na Slikah 4.4 in 4.5, ločeno za objekta Magnet in PKR. Nadalje so zbrani podatki ANOVA metode v Tabelah 4.4 in 4.5. V drugem delu smo se osredotočili na preučevanje vpliva števila aktivnih sklepov (kombinacije sklepov) potrebnih za izvedbo robotskega giba na variabilnost končnih dimenzijskih meritev.

Sliki 4.4 in 4.5 prikazujeta analizirane meritve, pri katerih smo iskali vpliv števila aktivnih sklepov potrebnih za izvedbo gibov na spremenljivost meritev PME. Prva ugotovitev obravnave posameznih črt na omenjenih slikah je, da število aktivnih sklepov vpliva na vrednosti 6σ . Kombinacija sklepov z aktivnim enim samim sklepom (W2) splošno povzroči manjšo spremenljivost merilnih podatkov. Rdeče črte, ki predstavljajo kombinacijo sklepov W2, so na Slikah 4.4a, 4.5b in 4.5d postavljene nižje od črt drugih barv. Na Sliki 4.4b so vse črte (kombinacije sklepov) zelo zgoščene za velikosti zasukov $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ (kombinacija sklepov W2) in $\varphi = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ (kombinacije sklepov SE, SEW1, SEW1W2). V primeru zasukov v sklepih $\varphi = 90^\circ$ (za kombinacijo sklepov W2) in $\varphi = 60^\circ$, (preostale kombinacije sklepov) lahko ponovno trdimo, da imajo meritve pri gibanju robota z zgolj enim aktivnim sklepom manjšo variabilnost meritev kot pri preostalih scenarijih.

V primeru geometrijske karakteristike 130 objekta PKR (Slika 4.5c) ni mogoče

trditi, katera kombinacija sklepov vodi do najnižjih vrednosti 6σ . Skupine meritev so medsebojno zelo podobne za vse scenarije gibanja robota.

Nadalje, Slike 4.4a, 4.4b, 4.5b in 4.5d kažejo, da kombinacije sklepov s tremi (SEW1 - modre črte) in štirimi aktivnimi sklepi (SEW1W2 - črne črte) povzročata večjo variabilnost merilnih podatkov kot preostali dve kombinaciji sklepov. Pri Sliki 4.5c smo že omenili, da ne moremo razločiti, katera kombinacija sklepov povzroča najmanjšo oziroma največjo variabilnost merilnih podatkov.

Rezultati izračunov ANOVA v Tabelah 4.4 in 4.5 prikazujejo, da je ničelna hipoteza zavrnjena za sklope meritev geometrijskih karakteristik 30 objekta Magnet ter 100 in 140 objekta PKR za kombinacije sklepov z različnimi števili aktivnih sklepov za izvedbo robotskega giba. V naštetih primerih imamo vsaj dve statistično neodvisni merilni skupini. Vrednosti parametra- p za dimenzijo 20 objekta Magnet in 10 objekta PKR sta nekoliko višji od mejnih vrednosti $p_{\min} = 0,05$. Posledično lahko meritve za omenjeni dimenziji (20 in 10) štejemo kot različne sete meritev. Le v primeru karakteristike 130 objekta PKR ničelna hipoteza ni bila zavrnjena. Sklepamo lahko, da število aktivnih sklepov vpliva na variabilnost dimenzijskih meritev PME v robotski celici namenjeni statistični procesni kontroli izdelkov.

V splošnem, opazovanje Slik 4.4 in 4.5 s prostim očesom potrjuje naše predvidevanje, da večje število aktivnih sklepov povzroča večjo variabilnost merilnih podatkov. Pri kombinaciji sklepov W2 so vrednosti 6σ najnižje, pri kombinacijah sklepov SEW1 in SEW1W2 pa so vrednosti 6σ najvišje. Večja variabilnost merilnih podatkov indicira napako v poziciji in orientaciji vstavljenega (izmerjenega) objekta v ležišču PME, kar je posledica manjše točnosti in natančnosti vrha robota.

Podobno kot za meritve v prvem delu analize parametrov trajektorije gibanja vrha robota lahko pritrdimo, da ima hitrost izvedbe gibanja robota vpliv na raztros meritev tudi v drugem delu. Na Slikah 4.4 in 4.5 so prekinjene črte, ki naznačujejo gibanje robota z najvišjo hitrostjo (3,0 rad/s), večinoma nad polnimi črtami, ki ponazarjajo gibanje robota z nižjo hitrostjo (0,5 rad/s). Le pri vrednosti $\varphi = 30^\circ$ (W2) in $\varphi = 20^\circ$ (SE, SEW1 in SEW1W2) na Slikah 4.5a in 4.5c so polne črte višje od prekinjenih. V vseh preostalih primerih so prekinjene črte nad polnimi, kar kaže na večjo variabilnost meritev pri višjih hitrostih v sklepih robota.

ANOVA primerjava med skupinami meritev, ki se razlikujejo v hitrosti izvedenega robotskega giba, v drugem delu analize vplivnih parametrov trajektorije gibanja zavrne

ničelno hipotezo za pet geometrijskih karakteristik (20 in 30 objekta Magnet ter 10, 130 in 140 objekta PKR). Torej za vsako izmed naštetih karakteristik obstajata vsaj dve različni skupini meritev za posamezno hitrost, kar rezultira v statistično različne skupine meritev. Rezultati ANOVA primerjave za drugi del so zapisani v Tabelah 4.4 in 4.5. Podobno kot v prvem delu meritev lahko tudi v drugem delu štejemo hitrost gibanja robota za vplivni parameter pri variabilnosti dimenzijskih meritev s PME ob manipulaciji objektov z robotom.

Velikost rotacije sklepov v posameznih scenarijih robotske manipulacije v drugem delu meritev lahko razumemo kot določene dolžine robotskih gibov. V prvem delu meritev smo prikazali statistično odvisnost variabilnosti meritev od dolžine robotskega giba (Sliki 4.2 in 4.3). Pri upoštevanju Slik 4.4 in 4.5 lahko opazimo rahlo odvisnost variabilnosti meritev od velikosti rotacije sklepa v primeru karakteristik 20 in 30 objekta Magnet, ločeno na Slikah 4.4a in 4.4b, ter za karakteristike 100 in 140 objekta PKR, ločeno na Slikah 4.5b in 4.5d. Opaziti je rahlo odvisnost med vrednostmi 6σ posameznih merilnih skupin, od ničelnega zasuka do maksimalnega zasuka v sklepih, z rahlo naraščajočim trendom črt.

Statistična primerjava merilnih setov v odvisnosti od velikosti zasukov v sklepih robota v Tabeli 4.4 za objekt Magnet in Tabeli 4.5 za objekt PKR, je zelo podobna statistični primerjavi meritev z različnimi dolžinami gibov robota v prvem delu meritev (Tabeli 4.2 in 4.3). V primeru različnih rotacij v posameznih sklepih je ničelna hipoteza H_0 zavrnjena za štiri geometrijske karakteristike, 20 in 30 objekta Magnet (Tabela 4.4) ter 10 in 100 objekta PKR (Tabela 4.5). Dodatno je pogojno zavrnjena ničelna hipoteza tudi za karakteristiko 140 objekta PKR, saj je ustrezna p -vrednost praktično enaka mejni vrednosti (0,054). Zavrnitev ničelne hipoteze definira vsaj dva ločena in neodvisna merilna seta za omenjene geometrijske karakteristike za različne zasuke v sklepih robota.

Do sedaj je bilo statistično dokazano vpliv kombinacije sklepov, hitrosti gibanja sklepov in velikost zasukov v sklepih na variabilnost dimenzij izdelkov. S podobnim razmišljanjem kot pri obravnavi medsebojnih interakcij v prvem delu obravnave parametrov trajektorije (Poglavje 4.5.2) lahko trdimo, da skupne interakcije nimajo statistične pomembnosti. Izračunane p -vrednosti so v petih kombinacijah izmed osemnajstih možnih manjše od mejne vrednosti (v okrepljenem tisku), vendar so bile že predhodno ugotovljeni glavni učinki (statistične odvisnosti) posameznih vplivnih parametrov.

4.5.3 Splošna razprava

Upošteva je Slik 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 skupaj v kombinaciji s Tabelami 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5 lahko povzamemo, da imajo različne trajektorije (gibi) robota oziroma vrha robota večji vpliv na meritve dolžin oziroma višin (geometrijske karakteristike 30 objekta Magnet in 10, 100 in 140 objekta PKR) v primerjavi z meritvami premerov (geometrijski dimenziji 20 objekta Magnet in 130 objekta PKR).

Nižja odvisnost meritev v primeru merjenja premerov je razvidna na podlagi ANOVA izračunov v Tabelah 4.2, 4.3, 4.4 in 4.5. Posamezne F -vrednosti za dimenzije premerov so v tabelah v primerjavi s preostalimi dimenzijami praviloma precej nižje, tudi merilni podatki posameznih serij meritev so medsebojno težje razločljivi. Na primer, za geometrijsko karakteristiko 130 objekta PKR smo zavrnili ničelno hipotezo v treh od šestih primerov vplivnih parametrov (hitrost in dolžina v prvem delu ter hitrost v drugem delu). Za karakteristiko 100 (višina) istega objekta je bila ničelna hipoteza zavrnjena petkrat (način giba, hitrost in dolžina prvem delu ter scenarij in zasuk v drugem delu). Na izrazitejši vpliv manipulacije z robotom na meritve dolžin/višin smo nakazali že v Poglavlju 3.

Čeprav so Papananias idr. [18] pokazali neposredno povezavo med merilno negotovostjo in amplitudo spreminjanja temperature okolice, lahko trdimo, da sta bili temperatura okolice ter obeh objektov, skupaj v postopku kalibracije PME (mastering) in meritev, stabilni. Nobena izmed ponovitev meritev ni prožila zahteve po ponovni kalibraciji (re-master) zaradi prevelike spremembe v temperaturi okolice. Za študijo smo, identično kot za študijo v Poglavlju 3, nastavili dovoljeni razpon temperature okolice $T_a = T_m \pm 1^\circ \text{C}$, kjer T_m predstavlja temperaturo okolice v času kalibracije. Vsako večje odstopanje bi se odražalo v proženi zahtevi za ponovno kalibracijo.

Ponovno je potrebno poudariti, da v študiji nismo merili položaja vrha robota in na podlagi tega izračunali karakteristiki točnosti in natančnosti v skladu z robotskim standardom ISO 9283 [27]. Vpliv različnih trajektorij na točnost in natančnost robota smo pridobili posredno, na podlagi variabilnosti meritev dimenzij PME, ki temelji na principu primerjalnih meritev. Napake položaja in orientacije vrha robota so povzročile različno postavitev objekta v ležišče in različne interakcijske sile objekt-ležišče.

Vpliv parametrov trajektorije, način giba, hitrost, dolžina giba in število aktivnih sklepov robota, na variabilnost meritev dimenzij s PME ni presenetljiv. Avtorji v raziskavah točnosti in natančnosti robotov so poudarjali učinke hitrosti [29–33], dolžino

robotskega giba [30, 33, 34] in nenazadnje tudi kinematičnega modela robota [37–40]. Posledično mora trajektorija gibanja robota pri manipulaciji robota za najbolj optimalen nadzor kakovosti vključevati čim manj aktivnih sklepov, rotacije v posameznih sklepih pa morajo biti minimalne. Vsaka dodatna rotacija sklepa namreč vnaša določeno negotovost, povezovanje več zaporednih sklepov povzroči večjo negotovost v položaju in orientaciji vrha robota.

Zavedati se je potrebno, da s časom in neprestanim delovanjem pride do obrabe sklepov, to pa povzroči postopno povečevanje napak točnosti in natančnosti. Z identifikacijo kinematičnih parametrov robota v primernem časovnem intervalu in vključitvijo v model obrabe sklepov, bi lahko dosegli, da se zaradi staranja robota napaki točnosti in natančnosti ne bi bistveno spreminjali.

Pokazali in prepoznali smo, da napake v točnosti in natančnosti pozicije vrha robota, ki so neločljivo povezane z vplivnimi parametri trajektorije gibanja vrha robota, neposredno vplivajo na variabilnost meritev dimenzij objektov, ki sledijo manipulaciji z robotom.

5 Prijemanje z robotom

TO poglavje naslavlja raziskavo preciznega prijemanja z robotskim prijemalom. Naslavlja še zadnji manjkajoči del raziskave manipulacije z robotom, saj skupaj s prenašanjem (Poglavje 4) tvori celoten cikel manipulacije. Osredotočenost je usmerjena v zaznavanje spremembe orientacije objekta v ležišču PME pri različnih parametrih prijemanja. Obravnavana parametra sta sila prijemanja ter izpusta in zaporedje operacij manipulacije oziroma kompleksnost prijema.

Merilni sistem z dvema laserskima merilnikoma za brezkontaktno zaznavanje spremembe lege objekta v ležišču PME je predstavljen v prvem delu tega poglavja. Nadaljevanje poglavja je namenjeno obravnavi parametrov preciznega prijemanja z robotom, to sta sila prijemanja ter kompleksnost prijema, in njihovega vpliva na spremembo lege vstavljenega objekta.

Zaznavanje spremembe v legi objekta je razdeljeno na dva sklopa. V prvem sklopu meritev je bila osredotočenost zaznavanja spremembe zgolj kot posledica manipulacije z robotom. Dimenzijske meritve s PME so bile dodane manipulaciji z robotom v drugem sklopu meritev za iskanje morebitne interakcije spremembe lege zaradi merjenja s PME samim. Iskana je povezava med statističnim indeksom C_g analize MSA in spremembo v legi objekta. Sledi predstavitev verifikacije merilnega sistema zaznavanja spremembe v orientaciji objekta. Nadalje so prikazni zasuki okoli osi-x, -y in -z pri različnih obravnavanih silah prijemanja in izpusta ter pri dveh zaporedjih manipulacije z robotom (dotik in izpenjanje). Poglavje se zaključuje z interpretacijo in razlago eksperimentalnih rezultatov.

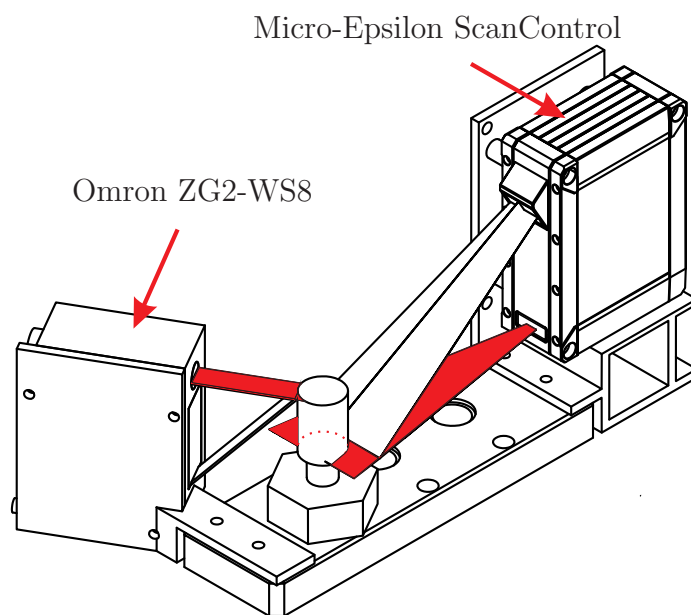
5.1 Merilni sistem

Na tržišču obstaja obilica namenskih rešitev za merjenje zasukov. Najdemo lahko kontaktne rešitve v obliki rotacijskih potenciometrov ali brezkontaktnih rešitev v obliki optičnih kodirnikov, v Hallovih senzorjih ali laserskih senzorjih.

V našem primeru je najbolj primerna brezkontaktna izvedba ter izvedba z laserskimi senzorji. Njihovo delovanje v splošnem temelji na več različnih principih, od triangulacijske metode [55], merjenja časa preleta [56–58], faznega zamika do interferometrije [59].

Najbolj optimalna rešitev bi bila uporaba 3D laserskega skenerja, vendar nam prostorske omejitve znotraj delovnega območja PME ne omogočajo njegove uporabe. Zato smo sestavili merilni sistem z uporabo dveh linijskih triangulacijskih laserskih senzorjev (LLS), Omron ZG2-WS8 in Micro-Epsilon ScanControl 3000-50/BL (Slika 5.1).

Optimalna postavitev obeh senzorjev bi bila, da bi bila senzorja obrnjena eden proti drugemu. Vendar ponovno zaradi prostorske omejitve mehanske konstrukcije PME ter tudi gibanja tipala PME ta postavitev senzorjev ni bila mogoča. Senzorja s središči pasov laserskega žarka tvorita kot 120° , vzporedni ravnini z žarkom pa sta na medsebojni višini 30 mm (Slika 5.2).



Slika 5.1: Postavitev linijskih laserskih senzorjev Omron in Micro-Epsilon znotraj delovnega območja PME.

Oddaljenost posameznega senzorja, tako Omron kot Micro-Epsilon, od roba objekta ustreza srednji razdalji merilnega območja (SMO) za posamezen merilnik. Torej je LLS Omron od objekta oddaljen za 50 mm, LLS Micro-Epsilon pa 125 mm. S postavitvijo roba objekta v središče merilnega območja najbolje izkoristimo oba merilnika, posebej z mislijo, da ima LLS Omron merilno območje (50 ± 3) mm. Merilnik Micro-Epsilon ima merilno območje (125 ± 20) mm.

V središču merilnega območja (oddaljenost 50 mm) ima LLS Omron laserski snop širok 8 mm, kar s 631 točkami na profil pomeni ločljivost profila (v širino) $13 \mu\text{m}$, ločljivost oddaljenosti zaznanega objekta od senzorja znaša $1 \mu\text{m}$. Merilnik LLS Micro-Epsilon ima v središču merilnega območja (oddaljenost 125 mm) 50 mm širok snop, kar z 2048 točkami na profil pomeni ločljivost $24,4 \mu\text{m}$, ločljivost meritev oddaljenosti pa znaša $3 \mu\text{m}$.

LLS merilnika vračata podatke v obliki linijskega profila. Iz poznanega premera objekta in na podlagi krožnega loka iz profila meritev lahko aproksimiramo krožnico.

Iz matematičnega vidika bi bilo pravilneje točke iz profila aproksimirati z elipso, saj je v splošnem presek valja in ravnine elipsa. V primeru pravega kota (90°) med ravnino in valjem elipsa limitira v krožnico. Predpostavljamo, da bodo zasuki (razen okoli vzdolžne osi objekta) minimalni in v tem primeru sta obe polosi elipse praktično enaki in lahko privzamemo aproksimacijo s krožnico.

Iz dveh krožnic na različnih višinah posledično lahko definiramo valj, katerega os poteka skozi središči krožnic. Na ta način lahko določimo dva zasuka od treh, tretjega (okoli vzdolžne osi) zaradi osne-simetričnosti objekta ne moremo določiti. Z namenom določitve zadnjega, tretjega zasuka smo na objekt namestili marker.

Marker je bil predstavljen z ozkim in približno 1 mm debelim nanosom materiala na obodu objekta vzdolžno z osjo objekta. Zaradi postopka merjenja PME s tipalom je bil marker nameščen zgolj na spodnjem območju objekta in ne vzdolž celotne višine. V zajetem profilu merilnika Micro-Epsilon je marker opazen kot območje, ki je za debelino nanosa bolj oddaljen od središča aproksimirane krožnice (Slika 5.3).

5.1.1 Zaznavanje zasukov

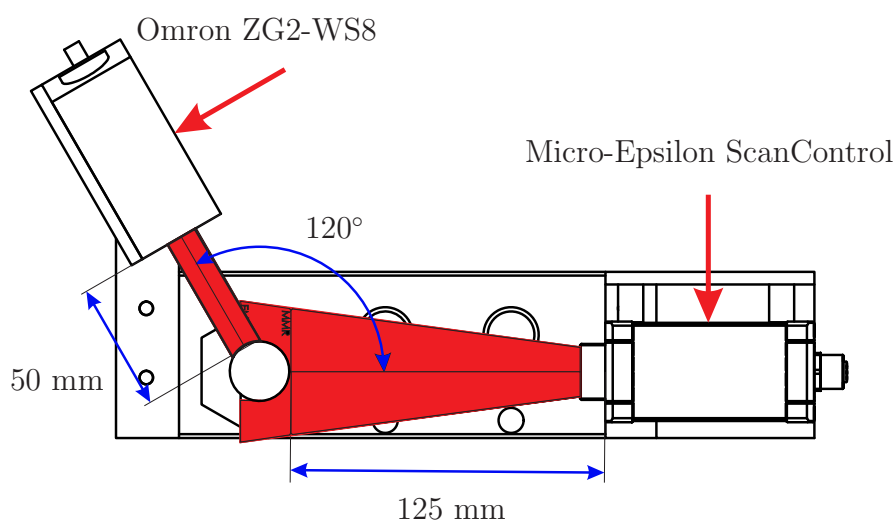
LLS merilnika zapisujeta zajete vrednosti v obliki (x,y) koordinat profila. Na podlagi krožnih lokov iz danih profilov lahko pri poznanem premeru objekta aproksimiramo

krožnici po metodi najmanjših kvadratov. Ker sta oba profila in posledično obe aproksimirani krožnici definirani glede na lokalni KS merilnikov, definiranje valja iz krožnic in osi med središčema ni smiselno.

V prvem koraku moramo profila obeh merilnikov zapisati/preslikati v skupni KS. Za globalni KS smo prevzeli KS merilnika Micro-Epsilon, zato smo merilne podatke sensorja Omron preslikali v globalni KS po nominalnih podatkih medsebojne postavitve sensorjev (Slika 5.2). Dejansko medsebojno razdaljo in zasuk med merilnikoma se pridobi z medsebojno kalibracijo.

Kalibracija

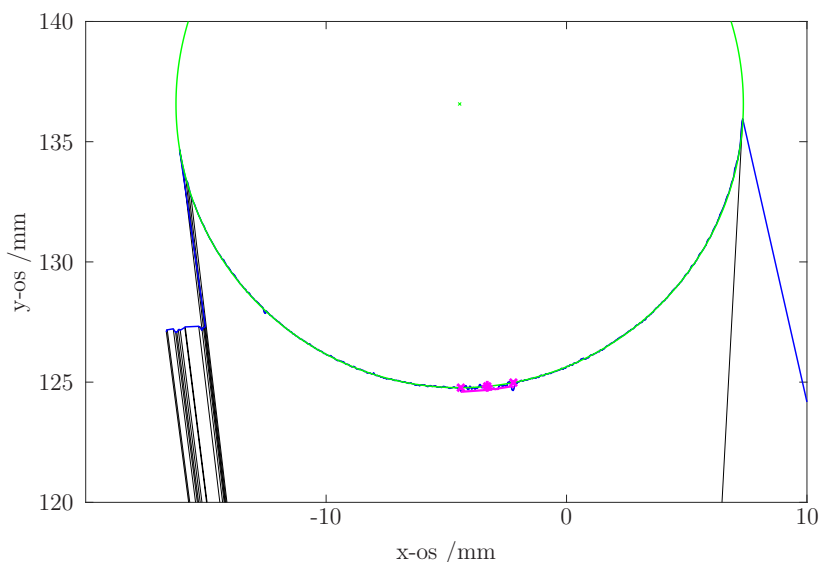
Kot se izkaže, laserska sensorja nista bila medsebojno postavljena povsem idealno, zato je prišlo do rahlega odstopanja med aproksimiranima krožnicama glede na posamezne profile iz merilnikov preslikanih v globalni KS. Z medsebojno kalibracijo merilnikov želimo doseči, da se aproksimirani krožnici posameznih profilov popolnoma ujemata/prekrivata. S popolnim ujemanjem smo nastavili začetna zasuka okoli osi x in y (glede na globalni KS) vstavljenega objekta v ležišču na nič. V sklopu kalibracije na zasuk okoli osi z globalnega KS (vzdolžne osi valja) ne vplivamo.



Slika 5.2: Tlorisna ponazoritev postavitve linijskih laserskih sensorjev Omron in Micro-Epsilon.

Računanje krožnic in določanje markerja

Pred izračunom središč krožnice smo ustrezno odstranili vse neveljavne podatke. V primeru zajema vrednosti iz merilnika Micro-Epsilon so neveljavni podatki razdalje enaki nič, v primeru uporabe merilnika Omron pa so bili neveljavni podatki zapisani kot -999999999. Poleg že zajetih neveljavnih vrednosti podatkov smo odstranili tudi tiste vzorce z nesmiselnimi vrednostmi, denimo, v kolikor je bila razdalja v profilu d večja od vsote razdalje sredine merilnega območja SMO in polmera objekta r ($d > \text{SMO} + r$). To bi pomenilo detekcijo objekta od zadaj, kar je nesmiselno.



Slika 5.3: Aproximacija krožnice in detekcija markerja iz točk zajetih z LLS Micro-Epsilon. Črna barva predstavlja surove podatke, modra barva predstavlja filtrirane podatke, zelena barva ponazarja aproksimirano krožnico, območje markerja je označeno z barvo magenta.

V naslednjem koraku smo lahko za podatke iz profilov obeh merilnikov izračunali aproksimirani krožnici z optimizacijsko funkcijo.

Aproximacija krožnice na profil LLS temelji na minimizaciji funkcije napake $E(x_c, y_c, r)$ z uporabo metode najmanjših kvadratov. Funkcija napake je definirana z enačbo (5.1).

$$E(x_c, y_c, r) = \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - r \right| \quad (5.1)$$

Parametra x_c in y_c sta izračunani koordinati središča aproksimirane krožnice,

veličini x_i in y_i sta x in y koordinati i-te točke na profilu, parameter r pa predstavlja radij objekta.

Primarna naloga meritev z LLS niso bile dimenzijske meritve objekta, temveč določanje zasukov objekta, zato smo za parameter r privzeli nominalno vrednost premera objekta Magnet (oziroma je bil radij magneta predhodno znan). Dodatno smo privzeli soosnost objekta.

V primeru podatkov merilnika Omron smo upoštevali kalibracijske podatke in krožnico izrazili v KS merilnika Micro-Epsilon. Aproksimirana krožnica na podlagi profila iz merilnika Micro-Epsilon zaradi zaznanega markerja ni bila pravilna. Zaznan marker je povzročil, da je krožnica nekoliko izmaknjena iz pravilnega položaja, saj smo aproksimirali krožnico po metodi najmanjših kvadratov. Razdalja med krožnico in dejanskimi podatki je bila minimizirana, torej smo morali iz profila odstraniti podatke, ki so predstavljali marker in ponovno aproksimirati krožnico. S podatki pri odstranjenem markerju smo nato dobili krožnico, ki se je najbolj prilegala podatkom profila iz merilnika.

Slika 5.3 prikazuje na istem grafu surove podatke LLS Micro-Epsilon označene s črno barvo in filtrirane podatke z odstranjenimi neveljavnimi podatki (modra barva). Aproksimirana krožnica in njeno središče sta prikazani z zeleno barvo, medtem ko je območje z markerjem označeno z barvo magenta. Krajišči markerja sta označeni z označbo “×”, medtem ko je središče markerja označeno z “*”.

Z merilnikom Omron markerja nismo zaznavali, zato zadnja dva koraka nista bila potrebna. Krožnico, ki se je najbolj prilegala profilu LLS merilnika, smo dobili že v prvi iteraciji.

Zasuki α , β in γ

Daljica, ki povezuje obe središči krožnic, ki temeljita na profilih objekta, predstavlja glavno os $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ osno-simetričnega objekta (Slika 5.4a).

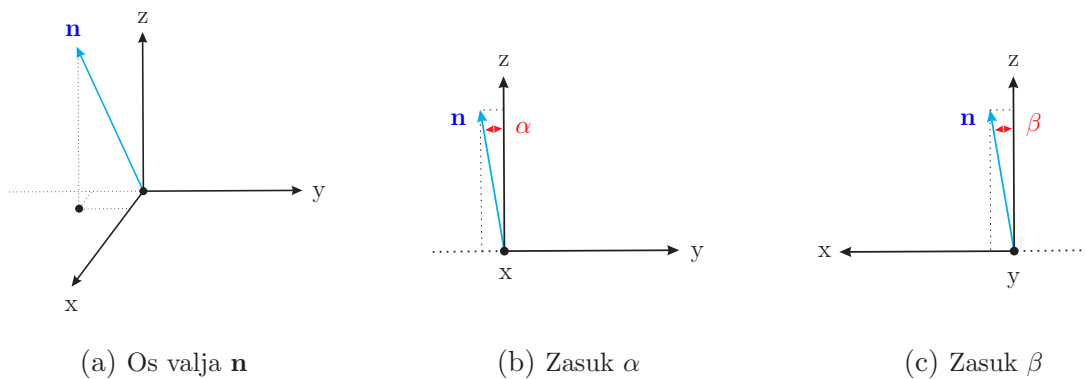
Vektor \mathbf{n} , ki predstavlja os objekta/valja, je normiran. Kot α (5.2) predstavlja zasuk okoli osi-x in ga je mogoče izraziti iz projekcije vektorja \mathbf{n} na ravnino-YZ (Slika 5.4b). Iz projekcije na ravnino-XZ je mogoče izraziti kot β (5.3), ki predstavlja zasuk okoli osi-y (Slika 5.4c).

$$\alpha = \arctan \frac{dy}{dz} \quad (5.2)$$

$$\beta = \arctan \frac{dx}{dz} \quad (5.3)$$

Kot γ , ki predstavlja zasuk objekta okoli vzdolžne/glavne osi, izračunan je iz zaznane markerja na obodu objekta. Iz središčne točke markerja in središča aproksimirane krožnice na podlagi profila merilnika Micro-Epsilon definiramo daljico \mathbf{m} . Kot daljice \mathbf{m} glede na os-x objekta predstavlja zasuk okoli osi-z objekta, torej zasuk γ (Slika 5.5).

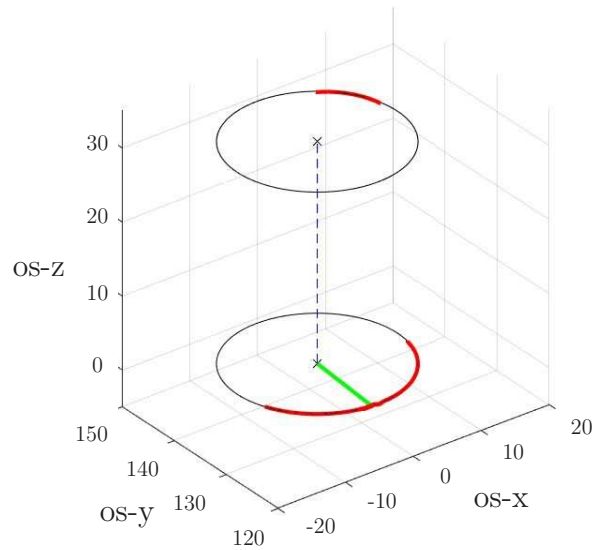
Obravnavali in izračunali smo vse tri kote oziroma zasuke, toda največjo težo smo naslovili na zasuke γ . Namreč, zasuka α in β je PME sposoben zaznati in kompenzirati s poravnavo v merilnem programu, medtem ko zasuka γ okoli vzdolžne osi osnosimetričnega kosa ni sposoben zaznati in korigirati. Nenazadnje, zasuk objekta okoli vzdolžne osi povzroči, da PME ne odčita identičnih točk na objektu med procesom merjenja in procesom umerjanja (re-mastering). Torej, za merjenje zgornje ravnine magneta, so točke merjenja na Sliki 2.9 izmaknjene za dani zasuk. Posledično se izračuna ravnina z drugačnimi podatki in naraste variabilnost dimenzijskih meritev.



Slika 5.4: Grafična ponazoritev osi valja in izračun zasukov α in β iz projekcij na YZ in XZ ravnini.

5.2 Vpliv prijemanja z robotom

Vrednotenje vpliva manipulacije z robotom na zasuk objekta vstavljenega v ležišče PME smo v grobem razdelili na dve vprašanji, na vpliv sile prijemanja ter vpliv kom-



Slika 5.5: Aproximacija valja z dvema krožnicama na podlagi meritev laserskih skenerjev Omron in Micro-Epsilon (rdeča profila) združeno v koordinatnem sistemu merilnika Micro-Epsilon. Zelena označba naznačuje povezavo markerja z osjo valja – daljica m .

pleksnosti prijema. Za ta dva vzroka menimo, da imata vpliv na spremembo orientacije objekta v ležišču.

Sila prijema definira stabilnost objekta v prijemalu. Z zadostno veliko silo objekt ne bo zdrsel iz prstov prijemala v primeru odstranjevanja objekta iz ležišča oziroma vstavljanju objekta. Hkrati pa prevelika uporabljena sila povzroča mehansko deformacijo objekta. Zato je smiselno najti najbolj optimalno silo, ki zagotavlja stabilnost prijema in ne deformira objekta.

Kompleksnost prijema si je mogoče razlagati kot skupek operacije prijemanja objekta s prijemalom in manipulacije (prenašanje). Ob premikanju objekta lahko nastanejo interakcijske sile med objektom in zunanjimi elementi (npr. ležišče), ki povzročijo spremembo lege objekta v prstih prijemala.

Študije prijemanja z robotom smo opravili s sodelujočim robotom UR5e. Za preučevanje vpliva samega robota na spremembe orientacije vstavljenega objekta v ležišču PME sta definirani dve zaporedji operacij manipulacije oziroma dve nalogi manipulacije, ki se razlikujeta v kompleksnosti manipulacije. Prvo zaporedje operacij predstavlja nizko kompleksnost manipulacije, saj prijemalo z objektom v ležišču opravi le kratek prijem (dotik). Drugo zaporedje predstavlja manipulacijo višje kompleksno-

sti, saj robot objekt prime in z vertikalnim premikom za približno 5 cm objekt odstrani iz ležišča (izpne–izpenjanje) ter ga vstavi nazaj v ležišče in izpusti. Zaporedji operacij, dotik in izpenjanje, ločeno sovpadata s scenarijema 2 in 7 iz Poglavlja 3.

Pri prijemanju objekta neposredni stik vzpostavi prijemalo, ključna parametra prijemala sta sila in hitrost odpiranja ter zapiranja prstov. Za prijemanje objekta je uporabljeno sodelujoče prijemalo Weiss Robotics CRG 30-050. Najvišja sila prijemanja prijemala znaša 30 N, priporočena minimalna sila prijemanja pa znaša 50 % najvišje sile prijemanja, torej 15 N. Najvišja hitrost premikanja prstov prijemala znaša 180 mm/s in minimalna hitrost 10 mm/s.

Prijemalu lahko določimo ali silo prijemanja ali hitrost gibanja prstov, torej sila prijemanja pogojuje ustrezno hitrost gibanja prstov in obratno, določena hitrost premikanja prstov se preslika v ustrezno silo prijemanja. Tako je mogoče namesto dveh ločenih parametrov prijemala, sile in hitrosti prijemanja, uporabiti zgolj en parameter – silo prijemanja.

Do sedaj v Poglavljih 3 in 4 informacija o spremembi lege objekta ni bila znana in tudi ni bilo znano ali že merjenje s PME povzroča spremembo v legi objekta.

Za študijo vpliva prijemanja z robotom na zasuk objekta je bil objekt predhodno vstavljen v ležišče PME tako, da je bil marker usmerjen proti LLS Micro-Epsilon. Optični merilni sistem je zajel začetne vrednosti. Nato se je robot s prijemalom približal vstavljenemu objektu in izvedel izbrano zaporedje operacij prijemanja (dotik ali izpenjanje) in se odmaknil iz delovnega območja PME, kar je prožilo ponoven zajem optičnega merilnega sistema, meritev s PME se ni izvedlo. Celoten cikel manipulacije z robotom in zajemanja podatkov z optičnim sistemom se je ponovil 25-krat.

V naslednji fazi je bilo za izbranim zaporedjem operacij prijemanja v ciklu manipulacije dodano še kontaktno merjenje dimenzij s PME.

Pri dotiku objekta z robotskim prijemalom so bile definirane tri različne sile prijemanja, 50 % maksimalne sile (15 N), 80 % maksimalne sile (24 N) ter 100 % maksimalne sile prijemanja (30 N). Zaradi nezadovoljivega prijema pri 50 % maksimalne sile v primeru izpenjanja (objekt je zdrsel iz prijema) so bile uporabljene zgolj sile z 80 % in 100 % maksimalne sile.

Za vsako kombinacijo zaporedja operacij prijemanja in sile prijemanja so bile opravljene po tri ponovitve.

5.3 Eksperimenti

Pomembna je ustrezna merilna ločljivost optičnega sistema, gre za sposobnost zaznavanja najmanjše spremembe v orientaciji merilnega objekta, spremembe v poziciji namreč lahko zazna in kompenzira PME. To poglavje najprej predstavlja rezultate verifikacije optičnega merilnega sistema za detekcijo zasukov. V drugem delu so predstavljeni eksperimentalni rezultati sprememb v zasukih α , β in γ kot posledica manipulacije z robotom. Za dimenzijske meritve s PME smo izvedli MSA analizo.

5.3.1 Verifikacija optičnega merilnega sistema zaznavanja zasukov

Tabeli 5.1 in 5.2 prikazujeta podatke pridobljene v postopku verifikacije optičnega sistema. Osredotočili smo se na ključne parametre aproksimiranih krožnic in osi valja. Zanimal nas je predvsem raztros izračunov središč krožnic in markerja ter posledično vsi trije koti zasukov sestavljenega valja. Verifikacija je bila opravljena pri štirih različnih pogojih/orientacijah objekta Magnet. Meritev 1 je služila kot referenčna meritev, pri kateri so izračunani kalibracijski parametri. V Meritvi 2 je bil objekt zavrten okoli njegove osi za približno dve stopinji. V primeru Meritev 3 je bil objekt zavrten za približno 6 stopinj okoli osi Magneta. Za četrto serijo meritev smo objekt poskušali nekoliko zavrteti okoli njegove osi-x. V vsakem izmed štirih setov meritev v fazi verifikacije je po 50 zaporednih meritev z optičnim sistemom.

Tabela 5.1: Izračun standardne deviacije σ središč aproksimiranih krožnic merilnikov Micro-Epsilon (ME) in Omron (OM), srednje lege zaznanega markerja (M) ter zasukov α , β in γ v postopku verifikacije optičnega merilnega sistema.

Meritvev	ME		OM		M		α	β	γ
	x / μ m	y / μ m	x / μ m	y / μ m	x / μ m	y / μ m	/°	/°	/°
1	0,35	0,60	1,56	1,97	6,22	0,60	0,0037	0,0031	0,031
2	0,58	1,07	3,61	3,76	6,81	1,08	0,0071	0,0071	0,034
3	0,41	0,85	1,24	2,08	3,80	1,22	0,0043	0,0025	0,019
4	0,58	0,76	1,88	2,64	7,19	1,60	0,0054	0,0040	0,037

5.3.2 Merjenje zasukov pri manipulaciji z robotom

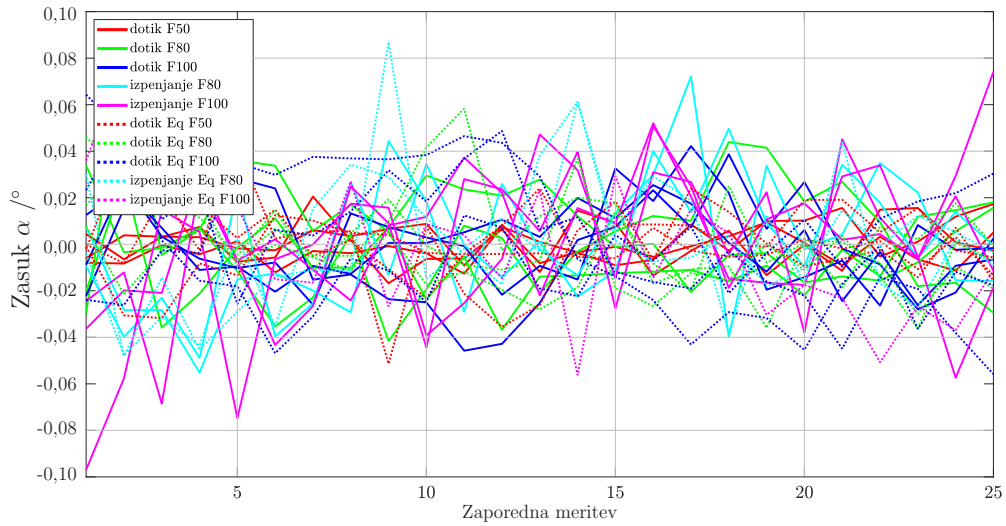
Točke povezane s črtami na Slikah 5.6, 5.7 in 5.8 prikazujejo zasuke α , β in γ za obe zaporedji operacij prijemanja z robotom (dotik in izpenjanje pri silah 50 %, 80 % in 100 % nazivne sile prijemala). Označbe in barve krivulj so na vseh zgoraj omenjenih grafih identične. Polne črte ponazarjajo meritve, ko so merjeni samo zasuki z optičnim sistemom, meritve zasukov okoli posameznih osi objekta pri dodanih še dimenzijskih meritvah s PME pa so predstavljene s prekinjenimi črtami. Nadalje, rdeče krivulje ponazarjajo zasuke pri dotikanju objekta s 50 % nazivne sile prijemala, zelene krivulje ponazarjajo sile prijemala pri dotikanju z 80 % nazivne sile ter modre krivulje pri dotikanju objekta s 100 % nazivne sile prijemala. Operacija manipulacije izpenjanja z 80 % nazivne sile prijemala je prikazana s krivuljami svetlo modre barve, izpenjanje s 100 % sile prijemanja prijemala pa je označeno z barvo magenta.

Zasuki α in β na Slikah 5.6 in 5.7 so predstavljeni tako, da je njihova srednja vrednost postavljena v izhodišče (vrednost 0), same vrednosti na grafih pa predstavljajo odstopanje od srednje vrednosti.

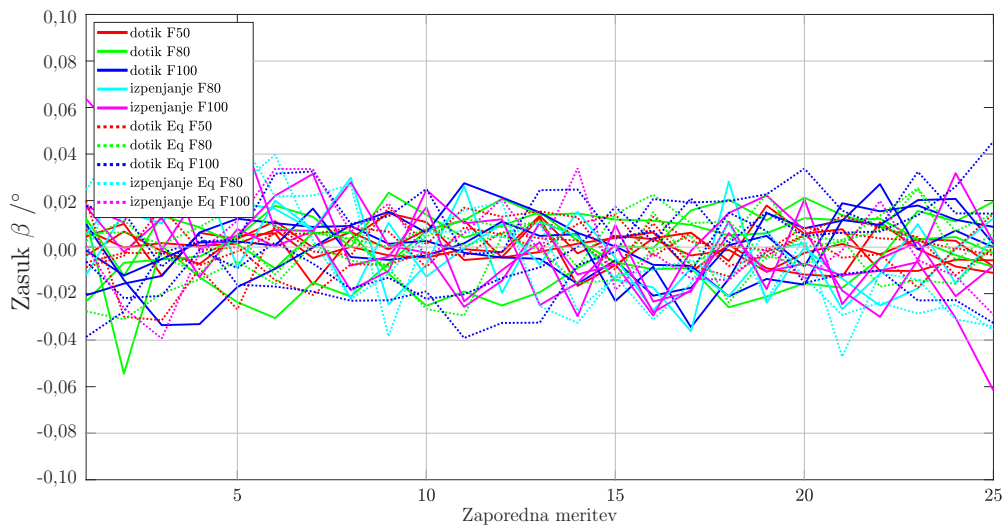
Sliki 5.6 in 5.7 vsebujeta podatke za deset različnih zaporedij operacij prijemanja, zato je analiza podatkov na enem grafu zelo otežena. Zato Sliki 5.9 in 5.10 ločeno prikazujeta analizirane zasuke α v primeru dotika in izpenjanja za vse obravnavane sile na istem grafu. Podobno so na Slikah 5.11 in 5.12 ločeno prikazani zasuki β v primeru dotika in izpenjanja za vse obravnavane sile na istem grafu. Grafi za posamezno zaporedje operacij prijemanja in posamezno silo so podrobneje prikazani v Dodatku A. Na navpični osi je predstavljena vrednost razlike zasuka od povprečne vrednosti, medtem

Tabela 5.2: Izračun srednjih vrednosti zasukov α , β in γ v postopku verifikacije optičnega merilnega sistema.

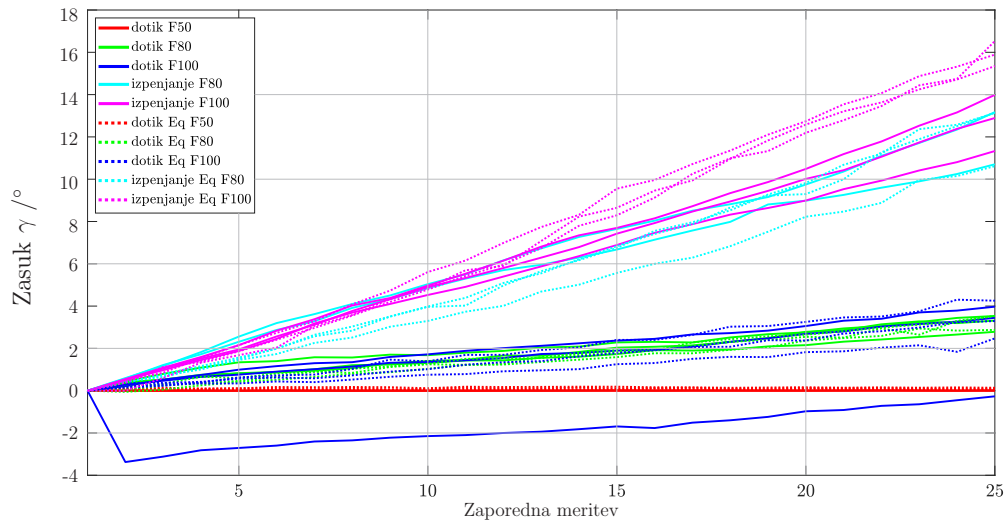
Meritev	α /°	β /°	γ /°
1	-0,0074	0,0058	-4,6771
2	-0,0700	-0,0658	-2,6913
3	-0,0129	-0,1380	-11,1458
4	0,7376	-0,1304	-11,3531



Slika 5.6: Zasuki α okoli osi-x objekta za dotik ter izpenjanje z robotom in pri vseh treh silah prijemanja s prijemalom (50 %, 80 % in 100 % nazivne sile).



Slika 5.7: Zasuki β okoli osi-y objekta za dotik ter izpenjanje z robotom in pri vseh treh silah prijemanja s prijemalom (50 %, 80 % in 100 % nazivne sile).



Slika 5.8: Zasuki γ okoli osi-z objekta za dotik ter izpenjanje z robotom in pri vseh treh silah prijemanja s prijemalom (50 %, 80 % in 100 % nazivne sile).

ko je na horizontalni osi predstavljena zaporedna številka meritve z optičnim sistemom. Z namenom primerjave vseh grafov, ki prikazujejo zasuke α in β , so skale na navpični osi vseh omenjenih grafov enake. Polne črte prikazujejo meritve zgolj pri izvedenih optičnih meritvah zasukov, prekinjene črte pa prikazujejo optične meritve zasukov pri še sočasnih dimenzijskih meritvah s PME.

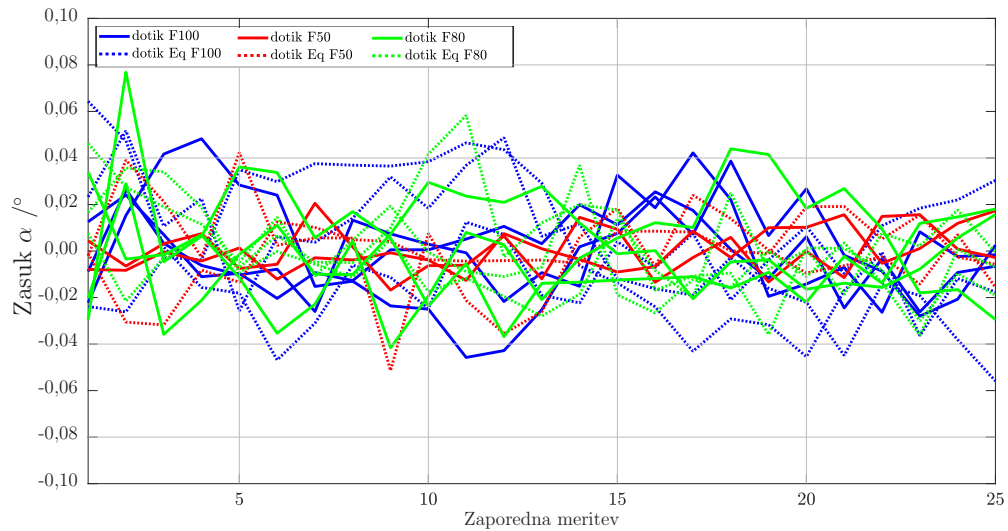
Srednje vrednosti in standardni odklon za sete po 25 meritev za posamezno zaporedje operacij prijemanja z robotom za zasuka α in β so zbrane v Tabeli 5.3. V scenarijih dotik in izpenjanje smo poleg manipulacije z robotom izvedli zgolj optične meritve in izračune zasukov, pri scenarijih “+PME” smo poleg optičnih meritev zasukov izvedli še dimenzijske meritve s PME.

Tabela 5.4 prikazuje povprečne spremembe zasuka $\Delta\gamma$ med zaporednimi ponovitvami manipulacije z robotom in merjenja zasukov. $\Delta\gamma_a$ predstavlja linearno aproksimacijo spremembe zasuka γ pri najboljšem ujemanju z metodo najmanjših kvadratov.

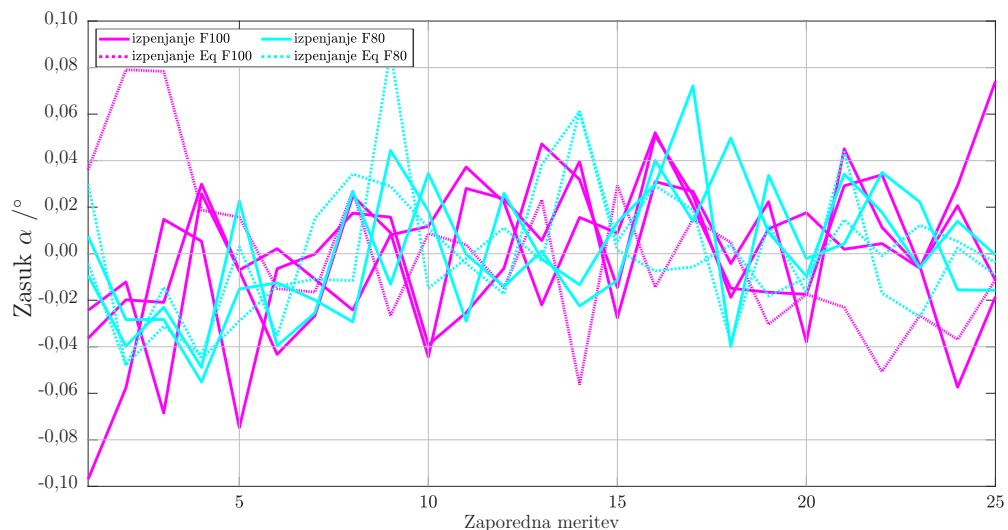
Pri predstavljenih zasukih γ velja, da so začetni zasuki (prva meritev v seriji) za posamezno ponovitev ter posamezno zaporedje operacij prijemanja z robotom ter detekcijo zasukov in dimenzijskih meritev postavljeni v izhodišče, naslednji zasuki pa predstavljajo odstopanje in integracijo vrednosti glede na izhodiščni zasuk.

Tabeli 5.5 in 5.6 prikazujeta faktor sposobnosti C_g kot rezultat MSA analize di-

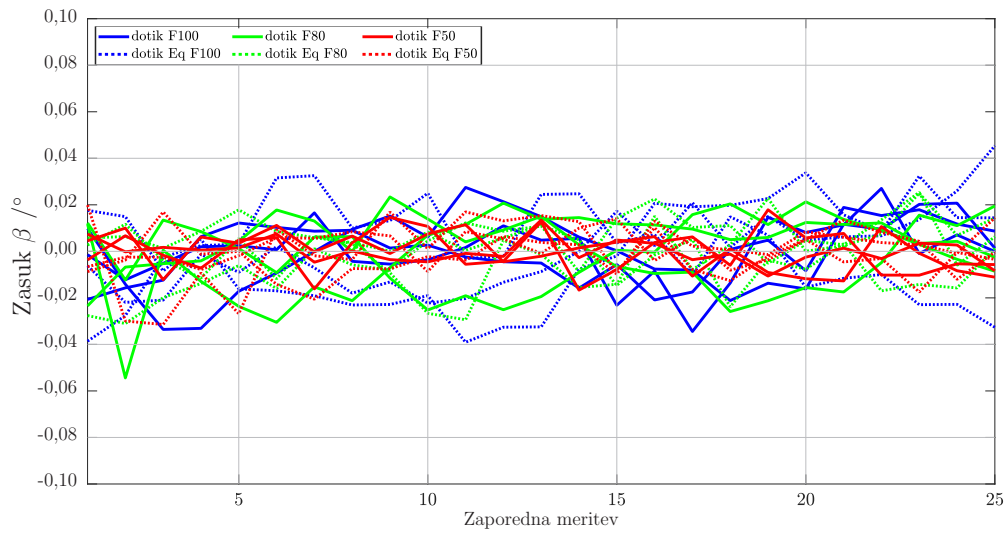
menzijskih meritev za obe operaciji (dotik in izpenjanje) pri 50 %, 80 % in 100 % nazivne sile prijemala za obe obravnavani geometrijski karakteristiki objekta Magnet (20 – premer in 30 – višina). Navedene vrednosti so povprečne vrednosti treh ponovitev posameznih scenarijev. Scenariji izpenjanja pri sili 50 % nazivne sile prijemala nimajo podatkov, saj sila ni zagotavljala zadostnega prijema objekta.



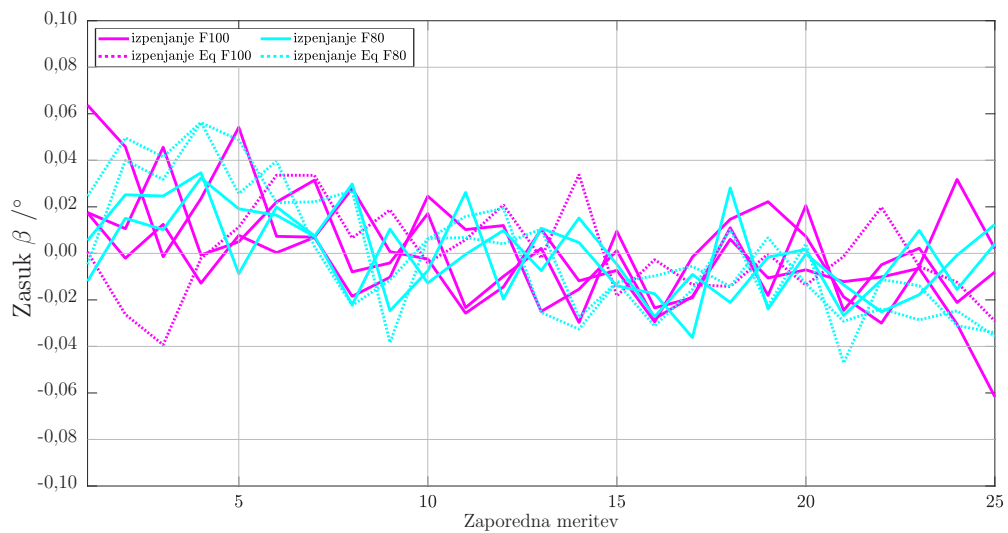
Slika 5.9: Zasuki α okoli osi-x objekta za dotik s prijemalom pri silah prijemanja 50 %, 80 % in 100 % nazivne sile.



Slika 5.10: Zasuki α okoli osi-x objekta pri izpenjanju objekta pri silah prijemanja 80 % in 100 % nazivne sile.



Slika 5.11: Zasuki β okoli osi-y za dotik s prijemalom pri silah prijemanja 50 %, 80 % in 100 % nazivne sile.



Slika 5.12: Zasuki β okoli osi-y pri izpenjanju pri silah prijemanja 80 % in 100 % nazivne sile.

Tabela 5.3: Srednje vrednosti in raztros zasukov α in β za scenarija manipulacije dotik in izpenjanje pri vseh treh silah prijemanja s prijemalom.

Scenarij	Sila %	α		β	
		$\bar{\alpha}/^\circ$	$\sigma_\alpha/^\circ$	$\bar{\beta}/^\circ$	$\sigma_\beta/^\circ$
Dotik	50	0,065	0,006	-0,018	0,006
	80	0,059	0,022	-0,004	0,015
	100	0,046	0,020	-0,005	0,014
Dotik + PME	50	0,076	0,015	-0,046	0,010
	80	0,098	0,014	-0,126	0,010
	100	0,109	0,028	-0,097	0,019
Izpenjanje	80	0,097	0,028	-0,028	0,018
	100	0,095	0,024	-0,025	0,016
Izpenjanje + PME	80	0,055	0,029	-0,088	0,028
	100	0,077	0,034	-0,126	0,019

5.4 Razprava

V Poglavjih 3 in 4 je prikazano in dokazano, da manipulacija z robotom v primeru proizvodnih meritev s kontaktnim merilnikom PME vnaša dodatno negotovost. V splošni analizi vpliva manipulacije z robotom v Poglavju 3 sta izpostavljena prijemanje z robotskim prijemalom in kompleksnejši gibi robota kot glavna krivca za povečanje merilne negotovosti pri meritvah dimenzij osno-simetričnih objektov. Vplivi parametrov trajektorije gibanja vrha robota, ki predstavljajo kompleksnost gibov, so analizirani in prikazani v Poglavju 4. Sedanje peto poglavje je posvečeno vplivu prijemanja z robotom na negotovost dimenzijskih meritev. Zaznavanje zasukov osno-simetričnih objektov v osnovi ni trivialno, zato je bil zasnovan optični sistem za zaznavanje zasukov s pomočjo markerja na objektu.

V prvem koraku je bilo potrebno opraviti verifikacijo sistema optičnega zaznavanja zasukov na podlagi uporabe dveh LLS, nato pa izvesti dotike in izpenjanje z robotom in ob tem opazovati spremembo v zasukih objekta, nameščenega v ležišče znotraj PME. Vsakršen zasuk objekta se odraža v zajemu drugih točk na samem objektu.

Tabela 5.4: Povprečne spremembe zasukov $\Delta\gamma$ med zaporednimi meritvami in linearna aproksimacija spremembe zasukov $\Delta\gamma_a$.

Scenarij	Sila %	$\Delta\gamma$ /°	$\Delta\gamma_a$ /°
Dotik	50	0,000	0,000
	80	0,134	0,118
	100	0,155	0,093
Dotik + PME	50	0,004	0,001
	80	0,104	0,135
	100	0,140	0,136
Izpenjanje	80	0,498	0,477
	100	0,398	0,523
Izpenjanje + PME	80	0,512	0,389
	100	0,676	0,688

Tabela 5.5: Izračuni MSA analize dimenzijskih meritev pri operacijah prijemanja za karakteristiko 20 objekta Magnet.

Sila /%	Dotik		Izpenjanje	
	C_g	6σ / μm	C_g	6σ / μm
50	20,66	1,0	/	/
80	17,99	1,1	18,30	1,1
100	17,46	1,2	19,14	1,1

Tabela 5.6: Izračuni MSA analize dimenzijskih meritev pri operacijah prijemanja za karakteristiko 30 objekta Magnet.

Sila /%	Dotik		Izpenjanje	
	C_g	6σ / μm	C_g	6σ / μm
50	47,21	1,3	/	/
80	45,97	1,3	11,17	6,0
100	35,53	1,7	9,25	6,5

Na podlagi zadovoljive sposobnosti zaznavanja zasukov α , β in γ v postopku verifikacije sta bila izvedena dva različna scenarija manipulacije z robotom pri treh različnih silah prijemanja. Celoten nabor kombinacij scenarijev je ponovljen dvakrat, prvič je izvedena zgolj detekcija spremembe zasukov objekta kot posledica manipulacije z robotom, v drugi ponovitvi so poleg detektiranja zasukov dodane še meritve dimenzij s PME.

Pri opazovanju vseh izmerjenih/izračunanih zasukih α , β in γ je bila pozornost usmerjena v prepoznavanje trenda, bodisi pri operaciji dotika s prijemalom bodisi pri operaciji izpenjanja. Ob obtoječi možnosti brezkontaktnega in kontaktnega merjenja s PME je bila dodatna želja preveriti, ali ima merjenje s PME morda dodaten vpliv na spremembo v orientaciji objekta, torej ali so v primeru merjenja s PME zasuki objekta večji.

5.4.1 Verifikacija optičnega merilnega sistema

Rezultati verifikacije optičnega merilnega sistema za zaznavanje zasukov objekta v ležišču PME so predstavljeni v Tabelah 5.1 in 5.2. Ključnega pomena je možnost detekcije orientacije oziroma spremembe v orientaciji objekta med posameznimi meritvami. Verifikacija je vsebovala analizo naleganja krožnic na podatke izmerjenih profilov (krožnih lokov) LLS Omron in Micro-Epsilon.

Podatki v Tabeli 5.1 prikazujejo standardni odklon oziroma raztros središč aproksimiranih krožnic na podlagi krožnih profilov LLS merilnikov, središča zaznanega markerja na objektu in nazadnje raztros izračunanih zasukov α , β in γ .

Če primerjamo preračunane podatke središč za merilnik Micro-Epsilon (drugi in tretji stolpec) s podatki za merilnik Omron (četrti in peti stolpec), lahko opazimo, da ima merilnik Micro-Epsilon vsaj trikrat manjši raztros za obe koordinati. Na podlagi te potrditve je povsem smiselno zaznavanje markerja na objektu z merilnikom Micro-Epsilon.

Nadalje lahko opazimo, da ima detekcija markerja, vsaj v koordinati x, znatno večji raztros kot določanje obeh središč. Posledično se to preslika v večji raztros določanja zasuka γ (zadnji stolpec v Tabeli 5.1). V kolikor pogledamo absolutne vrednosti raztrosa zasukov γ za vse štiri postopke meritev verifikacije, je najslabša vrednost $0,037^\circ$, torej v teoriji lahko zaznamo zasuke okoli osi-z objekta v rangju nekaj stotink kotne stopinje.

Meritev 1 v postopku verifikacije je služila kot referenčna meritev. Objekt je bil v ležišče postavljen z markerjem čim bližje merilniku Micro-Epsilon, torej da bi bil začetni zasuk γ enak 0. V sklopu referenčnih meritev se je opravila tudi medsebojna kalibracija merilnikov. V sklopu Meritev 2 je bil objekt namerno minimalno zavrtjen v pozitivni smeri okoli osi-z. V primerjavi srednjih vrednosti meritev v Tabeli 5.2 je prepoznan zasuk za približno 2° . Nadalje je bil objekt v sklopu Meritev 3 zavrtjen za približno 5° od referenčne orientacije v nasprotni smeri. Preračun zajetih vrednosti pokaže zasuk za več kot 6° . V zadnjem, četrtem setu Meritev je na objekt prijemale delovalo z zunanjo silo z minimalnim odklonom iz ničelnega kota α . V Tabeli 5.2 je v zadnjih dveh vrsticah mogoče opaziti razliko praktično samo v vrednosti kota α .

V primerjavi vrednosti vseh treh kotov α , β in γ v vseh štirih setih meritev verifikacije (Tabela 5.2) je mogoče opaziti spremembe v zasukih α in β v primerjavi z zasuki γ bistveno manjše, praktično ne presežejo vrednosti ene kotne stopinje. Ta ugotovitev potrjuje zadostno togo vpetje objekta v ležišču. V kolikor bi bilo vpetje objekta v ležišču bolj ohlapno, bi bile spremembe v zasukih α in β bistveno višje, hkrati pa bi bila višja tudi pripadajoča raztrosa. Posledično bi imele zaradi slabega vpetja objekta same meritve dimenzij s PME bistveno višjo merilno negotovost.

5.4.2 Vpliv prijemanja in izpenjanja

Opazovanje Slik 5.6, 5.7 in 5.8, ki ločeno prikazujejo zasuke objekta okoli osi-x, -y in -z, potrjuje ugotovitve pridobljene v postopku verifikacije optičnega merilnega sistema za zaznavanje zasukov. Spremembe v zasukih α (Slika 5.6) in β (Slika 5.7) med zapo-

rednimi meritvami so bistveno manjše od zasukov γ (Slika 5.8) za obe operaciji dotika in izpenjanja z robotom.

Tudi s temi zajetimi vrednostmi je mogoče potrditi, da je bilo vpetje objekta v ležišču s stališča spremembe orientacije okoli osi-x in-y primerno. Zaradi osnesimetričnosti objekta, tako zunanosti objekta kot tudi notranjosti, se objekt ob manipulaciji z robotom zavrti okrog vertikalne osi.

Vpliv robotskega prijemanja objekta smo preučevali z dvema scenarijema, kratkim prijemom/dotikom objekta s prijemalom in izpenjanjem objekta iz ležišča. Oba scenarija sta uporabljena že v Poglavju 3, vendar gre tokrat za dodatno osredotočanje na nezaželen zasuk. V prvi obravnavi je bila osredotočenost zgolj na raztros meritev pri različni kompleksnosti robotske manipulacije.

V naslednjih podpoglavjih bodo ločeno obravnavani vplivi kompleksnosti manipulacije z robotom na zasuke okoli osi -x, -y in -z vstavljenega objekta.

5.4.2.1 Zasuki okoli osi-x

Slika 5.6 prikazuje zbrane meritve zasukov objekta Magnet okoli osi-x – zasuk α . Ločeno Sliki 5.9 in 5.10 prikazujeta meritve zasukov za scenarija dotika in izpenjanja. Prvo opažanje je, da je pri dotiku in izpenjanju, zasuk α ostal znotraj meja $\pm 0,1^\circ$.

Nadalje, iz opazovanja Slik 5.6, 5.9 in 5.10 je razvidno, da manipulacija dotika s silo prijemanja 50 % nominalne sile (rdeče črte) povzroči najmanjše spremembe zasuka α med zaporednimi meritvami. Največje spremembe v kotu α je mogoče opaziti v primeru operacije izpenjanja pri maksimalni sili prijemanja (črte barve magenta). Tudi splošen pogled na slike sugerira, da izračunani in prikazani podatki za operacijo izpenjanja zavzamejo večje območje na grafih kot podatki za operacijo zgolj dotika. Vertikalne osi z razponi zasukov α so na vseh grafih identične. Torej operacija izpenjanja povzroča večje spremembe v zasukih α .

Opažanja iz prejšnjega odstavka lahko dodatno potrdimo z vpogledom v Tabelo 5.3. Četrty stolpec z leve prikazuje standardni odklon σ_α zasuka α za tri ponovitve posameznih scenarijev manipulacije z robotom. S primerjavo vrednosti σ_α , je mogoče opaziti, v primeru izpenjanja vse vrednosti višje od vrednosti izračunanih za operacijo dotika.

V sklepnih ugotovitvi je mogoče potrditi različne vplive dotika in izpenjanja na zasuk α vstavljenega objekta v ležišču PME. Kompleksnejša manipulacija povzroči nekoliko

višje spremembe v zasukih med posameznimi iteracijami, toda spremembe so skoraj nezaznavne (raztrosi se razlikujejo za manj kot $0,005^\circ$). Poudariti je potrebno, da iz podatkov ni bilo mogoče razbrati izrazitega trenda naraščanja oziroma padanja vrednosti.

5.4.2.2 Zasuki okoli osi-y

Slika 5.7 prikazuje zbrane meritve zasukov objekta Magnet okoli osi-y – zasuk β , ločeno za obe operaciji manipulacije dotik in izpenjanje pa prikazujeta Sliki 5.11 in 5.12. Podobno kot za zasuke α opazimo, da so prav tako vsi grafi znotraj meja $\pm 0,1^\circ$. Dodatno, razen dveh podatkov, so ostale vrednosti celo znotraj $\pm 0,05^\circ$.

Iz opazovanja Slik 5.7, 5.11 in 5.12, da so spremembe v zasukih β med posameznimi iteracijami najmanjše pri operaciji manipulacije dotik pri 50 % nominalne sile prijemanja (rdeče črte). Največje spremembe so opazne pri operaciji izpenjanja z maksimalno silo (magenta črte). Enako lahko iz opazovanja črt na slikah prepoznam manjše spremembe v zasukih β v primeru operacije dotika in večje pri operaciji izpenjanja. Tu so vertikalne skale prav tako identične.

Ugotovitve lahko potrdimo z opazovanjem srednjih vrednosti in raztrosov zasukov α in β v Tabeli 5.3. Tokrat se osredotočimo na zadnji stolpec, ki prikazuje standardni odklon σ_β zasuka β za tri ponovitve posameznih scenarijev manipulacije z robotom. Prav tu je mogoče opaziti vrednosti σ_β nižje za operacijo dotika in višje za operacijo izpenjanja.

Pri operaciji izpenjanja (svetlo modre in magenta črte na Slikah 5.11 in 5.12) je mogoče opaziti rahel trend spreminjanja zasuka β . Opazna je tendenca padanja zasuka od prve do zadnje iteracije meritev. Ta trend bi lahko bili posledica vpliva vzmetne kroglice nameščene v trnu ležišča. Pritiskanje vzmetne kroglice proti notranjemu premeru ni povsem konstantno pri večkratnem izpenjanju objekta, kar se odraža v opaženem trendu zasukov β pri operaciji izpenjanja. Podobnih opažanj v primeru operacije dotikanja ni bilo mogoče zaznati.

5.4.2.3 Zasuki okoli osi-z

Spremembe zasukov objekta Magnet okoli osi-z – zasuk γ so prikazane na Sliki 5.8. S pregledom na predstavljene črte prepoznamo, da imajo zasuki γ bistveno drugačen

potek med operacijami dotika in izpenjanja z robotom v primerjavi z zasuki α in β . Opazna je tendenca naraščanja zasuka γ z naraščanjem zaporedne številke meritev.

Zelo opazna je razlika v velikosti zasukov na vertikalni osi za obe operaciji manipulacije. Operacija izpenjanja (svetlo modre in magenta krivulje) povzroči bistveno višje zasuke kot operacija dotikanja (rdeče, zelene in temno modre krivulje). Dotikanje objekta s 50 % nominalne sile (rdeče krivulje) povzroči minimalne oziroma zanemarljive zasuke, medtem ko operacija izpenjanja povzroči, da se objekt v ležišču zavrti tudi do 16° .

Številčni podatki v Tabeli 5.4 prikazujejo povprečno spremembo v zasuku γ med zaporednimi meritvami za operaciji dotika ter izpenjanja in vse tri različne sile prijemanja s prijemalom. Če zanemarimo scenarij dotikanja s 50 % nominalne sile, je povprečna sprememba v zasuku med dvema zaporednima dotikoma s prijemalom nekoliko večja od desetine kotne stopinje. V primeru izpenjanja pa je povprečna sprememba v zasuku γ približno polovica kotne stopinje, torej petkrat več.

$\Delta\gamma$ v tretjem stolpcu predstavlja povprečno spremembo v zasuku γ med posameznimi zaporednimi številkami meritev. Vrednosti navedene v zadnjem stolpcu $\Delta\gamma_a$ so rezultat linearne aproksimacije z najboljšim prilaganjem (metoda najmanjših kvadratov) na dejanske rezultate. S primerjavo vrednosti $\Delta\gamma$ in $\Delta\gamma_a$ lahko ugotovimo, da je trend spremembe linearno sorazmeren s številom zaporednih meritev, saj vrednosti za posamezne scenarije bistveno ne odstopajo od (zapisanih) izmerjenih vrednosti γ .

Premo sorazmerno spremembo v zasuku γ lahko razumemo kot prisotnost sistematične napake v vsaki novi fazi prijemanja. Ta napaka pa je bolj izrazita pri operaciji izpenjanja kot pri operaciji dotika, je pa v obeh primerih opazna.

5.4.3 Vpliv sile prijemanja

Različna scenarija dotika in izpenjanja z robotom sta predstavljal podlago za raziskavo vpliva prijemanja. Vpliv prijemala smo skušali raziskati z obravnavo različnih sil prijemanja (50 %, 80 % in 100 % nominalne sile) objekta, prav tako pri obeh scenarijih dotika in izpenjanja.

Vprašanje je bilo, ali se vpliv različnih apliciranih sil pri prijemanju objekta različno odraža na spremembah v orientaciji objekta vstavljenega v ležišče PME.

Ugotovitve vpliva sile prijemanja ločeno na zasuke okoli osi -x, -y in -z so predsta-

vljene v naslednjih podpoglavjih.

5.4.3.1 Zasuki okoli osi-x

Vpliv sile prijemanja objekta na zasuk α obravnavamo z medsebojno primerjavo scenarijev dotika pri različnih silah (rdeče, zelene in temno modre črte) ter scenarijev izpenjanja pri različnih silah (svetlo modre in magenta črte).

Najprej obravnavamo operacijo dotikanja objekta s prijemalom. Na Sliki 5.9 je razvidno, da imajo meritve z najnižjo aplicirano silo (rdeče krivulje) bistveno manjše spremembe med posameznimi iteracijami v primerjavi z meritvami pri preostalih dveh apliciranih silah (zelene in temno modre krivulje).

Opažanja iz grafov lahko potrdimo z vrednostmi standardnih odklonov σ_α v Tabeli 5.3, namreč vrednosti so najmanjše pri aplicirani sili 50 % nominalne sile, pri preostalih dveh silah pa je vrednost σ_α nekoliko višja.

Podobno je mogoče opaziti pri operaciji izpenjanja, vendar razlike niso tako očitne.

5.4.3.2 Zasuki okoli osi-y

Z obravnavo Slike 5.7 in Tabele 5.3 lahko podobno kot v prejšnjem podpoglavju za zasuke okoli osi-x zaključimo, da višja aplicirana sila s prijemalom povzroči nekoliko večje odstopanje v zasukih β . Opazno je, da je raztros σ_β v Tabeli 5.3 v primeru dotikanja najmanjši pri najnižji aplicirani sili s prijemalom, najvišji pa pri najvišji aplicirani sili.

Pri operaciji izpenjanja je sodeč po izračunih v zadnjem stolpcu Tabele 5.3 razumeti, da manjše sile prijemanja povzročijo večji raztros meritev zasukov β . Se pa moramo zavedati, da je v primeru izpenjanja opazen linearen trend upadanja zasuka β , zato raztros σ_β nima povsem istega pomena kot v primeru dotikanja.

5.4.3.3 Zasuki okoli osi-z

Obravnava različnih sil pri prijemanju objekta s prijemalom, bodisi pri operaciji dotika bodisi pri operaciji izpenjanja v Tabeli 5.4 kaže, da večja aplicirana sila s prijemalom rezultira v večji nezaželen zasuk okoli glavne osi objekta. Vrednosti $\Delta\gamma$ oziroma $\Delta\gamma_a$ navedene v desnih dveh stolpcih tabele z višanjem sile prijema naraščajo.

Toda glede na spremembe v zasuku γ med posameznimi iteracijami zaporednih meritev je sprememba v zasukih zaradi različne aplicirane sile manj izrazita.

5.4.4 Vpliv PME

Podrobnejša obravnava Slik 5.6, 5.7 in 5.8 skupaj s Tabelama 5.3 in 5.4 sporoča zanimivo ugotovitev. Iz navedenih vrednosti je možno opaziti, da ima merjenje s PME opazen vpliv na zasuke α , β in γ . Sklepali bi lahko, da dotikanje PME s tipalom dodatno vpliva na negotovost merjenja posameznih zasukov.

Razliko na Slikah 5.6, 5.7 in 5.8 v primerih brez in z uporabo PME je moč opaziti s primerjavo polnih črt (brez meritev PME) in prekinjenih črt (merjenje s PME). Za zasuka α in β je na grafu težko razbrati, ali ima merjenje s PME določen vpliv. Tudi z vpogledom v raztros meritev (standardni odklon) v Tabeli 5.3 za scenarij Dotik in Dotik+PME ni očitne razlike. Manjša razlika med vrednostmi je opazna za operacijo izpenjanja.

S primerjavo vrednosti $\Delta\gamma_a$ v zadnjem stolpcu Tabele 5.4 je moč razbrati vpliv dotikanja tipala PME na zasuk γ . V zadnjem stolpcu imajo vrednosti $\Delta\gamma_a$ višje vrednosti v primeru optičnega merjenja zasukov in je bila poleg dotika ali izpenjanja z robotom prisotna tudi dimenzijska meritev s PME.

5.4.5 Vpliv prijemanja na dimenzijske meritve

Pred samo izvedbo eksperimentov smo predpostavili, da kompleksnejša manipulacija z robotom ter višje sile prijemanja s prijemalom vodijo k večjim nezaželenim spremembam v orientaciji objekta vstavljenega v ležišče. Kot je že poudarjeno, ima dotikanje in izpenjanje z robotom bistveno večji vpliv na zasuk okoli vzdolžne osi objekta (zasuk γ) v primerjavi s preostalima dvema zasukoma α in β .

Praktično minimalni zasuki α in β so posledica oblike ležišča. Namreč, kot je predstavljeno v Poglavlju 2.1, fiksiranje objekta temelji na dimenzijskem ujemanju trna ležišča in notranjega premera objekta, za dodatno in optimalnejše fiksiranje pa je dana vzmetna kroglica.

Ponovno je potrebno poudariti, da je v postopku poravnave merilnega programa PME sposoben zaznati in korigiti zasuka α in β in temu primerno prilagoditi točke merjenja (pozicija in smer). V kolikor PME ne bi bil sposoben izvesti teh korekcij, bi

namesto merjenja krožnice nastalo merjenje elipse, pri merjenju ravnin pa bi merilna konica zgrešila rob objekta.

Pri zasukih β je bil pri operaciji izpenjanja izpostavljen opazen trend spreminjanja zasukov z naraščanjem števila ponovitev. To bi lahko razumeli tudi kot posledico ležišča. Notranji premer objekta namreč nima specificiranih geometrijskih toleranc, posledično lahko pride do večjih odstopanj. Zaradi manjših sprememb, predvsem v okroglosti in koncentričnosti notranjega premera, fiksiranje objekta pri izpenjanju ni več identično, vzmetna kroglica lahko pritiska z nekoliko drugačno silo. Torej, zaradi napak točnosti in natančnosti robota ter mehanskih in drugih napak prijemala se bo objekt v procesu prijema zavrtel okoli svoje vzdolžne osi (zasuk γ), to se bo odražalo tudi na večji variabilnosti v zasuku β . Spremembe sicer niso velike, so pa opazne.

V primeru operacije samo dotika pride do bistveno manjše spremembe v interakciji objekt-ležišče, zato zasuki γ niso tako veliki kot pri izpenjanju. Posledično se sila vzmetne kroglice ne spreminja tako veliko. Manjša sprememba v variaciji sile pa rezultira v manjši variaciji spremembe zasukov β .

Merjenje s PME temelji na primerjalnem načinu, zato je pomembno, da so spremembe tako v poziciji kot orientaciji vstavljenega objekta minimalne. Do sedaj je bila v vseh poglavjih sprememba v orientaciji izpostavljena kot glavni povzročitelj v naraščanju negotovosti merjenja dimenzij objektov. Sprememba v orientaciji je kombinacija napak točnosti in natančnosti robota, napak prijemala, kot posledica medsebojnih sil interakcije objekt-ležišče itd. Tokrat smo poleg preprostega dotikanja in izpenjanja objekta z robotom izvedli merjenje zasukov in dimenzijske meritve s PME. Zanimalo nas je predvsem, ali je bila predpostavka, da sprememba v orientaciji objekta vpliva na negotovost meritev dimenzij, ustrezna.

Tabeli 5.5 in 5.6 prikazujeta zbrane podatke MSA analize za geometrijski karakteristiki 20 in 30 objekta Magnet pri operacijah dotika in izpenjanja pri silah 50 %, 80 % in 100 % nominalne sile prijemala. Sila prijemanja 50 % nominalne sile pri operaciji izpenjanja ni zagotavljala zadostne sile za stabilno izpenjanje, posledično izračuni MSA za to kombinacijo dotika z robotom niso bili mogoči.

Nadalje se osredotočimo na analizirane podatke za karakteristiko 20 (Tabela 5.5). Opaziti je rahel vpad indeksa sposobnosti C_g z višanjem sile prijemanja v scenariju manipulacije dotik. Padanje C_g posledično pomeni večanje standardnega odklona σ oziroma negotovosti meritev. Pri operaciji izpenjanja sta obe vrednosti C_g in 6σ praktično

enaki, torej sprememba sile ni povzročila bistvene spremembe v procesu merjenja dimenzij. Tudi v primerjavi vrednosti statističnih parametrov MSA analize za oba scenarija dotika ter izpenjanja z robotom so zelo podobne vrednosti. Majhne spremembe v statističnih parametrih MSA analize merjenja premera pri različnih kompleksnosti manipulacije z robotom so prepoznane že v Poglavju 3. Tukaj prihaja spoznanje, da zasuk objekta γ okoli vzdolžne osi nima velikega vpliva na MSA parametre premera.

Z obravnavo MSA analize za karakteristiko 30, to je višina objekta, v Tabeli 5.6 je moč opaziti, da sprememba v orientaciji objekta zagotovo vpliva na negotovost merjenja dolžinskih dimenzij. Parametra C_g in 6σ se močno razlikujeta za operaciji dotika in izpenjanja. Na Sliki 5.8 je mogoče jasno razločiti, da operacija izpenjanja povzroča bistveno večje spremembe v orientaciji objekta kot operacija dotika. Nadalje, opazen je tudi vpliv velikosti aplicirane sile. V obeh primerih scenarijev manipulacije je v Tabeli 5.6 opazno naraščanje parametra 6σ z višanjem sile prijemanja objekta. Tako kot je v Poglavju 3 prikazan zanemarljiv vpliv kompleksnosti manipulacije na merjenje premerov, so tokrat potrjene ugotovitve, da dotik in izpenjanje vplivata na nezaželene zasuke objekta in posledično negotovost meritev.

Prikazano je, da različne kompleksnosti prijemanja različno vplivata na zasuke objekta, moramo pa se zavedati vpliva ležišča. Uporaba trenutnega ležišča je sicer več kot sprejemljiva, saj so vse vrednosti faktorja zmogljivosti C_g bistveno višji od mejne vrednosti 1,33 (najnižja vrednost znaša 9,25), vendar bi bila zelo dobrodošla zasnova boljšega ležišča, ki ne bi dovoljevalo tolikšnih stopenj prostosti vstavljenega objekta.

6 Zaključek

INDUSTRIJSKI robot v osnovi zagotavlja točne in natančne gibe, torej lahko nadomesti operaterja za manipulacijo in vstavljanje merilnih objektov v merilno napravo. Z vpeljavo robota v merilni sistem se odpravi ali zmanjša vpliv operaterja-človeka, poveča zanesljivost in zmanjša negotovost meritev. Toda na račun staranja robota, mehanskih obrab sklepov, kinematičnih in preostalih mehanskih napak, konstantni in ponavljajoči se gibi robota pridobijo na odklonu od želene lege vrha robota.

V sklopu doktorske disertacije sta robot ter manipulacija z robotom obravnavana kot vplivni element na negotovost meritev dimenzij. Zastavljena so tri glavna vprašanja: (i) ali manipulacija z robotom vpliva na merjenje dimenzij s kontaktnim primerjalnim merilnikom ter katere so ključne operacije manipulacije, (ii) kakšen in kolikšen vpliv imajo parametri gibanja robota ter (iii) kakšen je vpliv preciznega prijemanja na negotovost meritev dimenzij.

Vplivi manipulacije z robotom na negotovost meritev so preiskovani z uporabo adaptivne robotske celice ter na predpostavki o nekoleriranih vplivnih veličinah. Robot UR5e je uporabljen za manipulacijo objekta, dimenzijske meritve pa so izvedene s primerjalnim merilnikom Renishaw Equator.

Osnovna raziskava vpliva manipulacije z robotom na negotovost dimenzijskih meritev v Poglavlju 3 je pokazala bolj izražen vpliv v primeru merjenja geometrijskih karakteristik dolžin v primerjavi z merjenjem premerov. To je prepoznano s statistično analizo dimenzijskih meritev z analizo merilnega sistema MSA procedure 1. Z višanjem kompleksnosti robotske manipulacije, dodajanje daljših gibov, večjimi spremembami v orientaciji, večkratnim prijemanjem raztros meritev narašča.

Obravnavana sta dva načina delovanja PME pri treh metodah merjenja (TTM, SM in SM+). Za vse tri metode merjenja PME je v primeru merjenja karakteristik dolžine opazen trend naraščanja raztrosa z večanjem kompleksnosti robotske manipulacije, pri

merjenju premerov pa je vrednost približno enaka za vseh devet scenarijev manipulacije. Neodvisnost meritev glede na način merjenja kaže na neposreden vpliv manipulacije z robotom na končno merilno negotovost merjenja PME.

Parametri gibanja robota kot vplivni element na merilno negotovost dimenzijskih meritev so izpostavljeni v Poglavju 4. Različni gibi robota se odražajo z različnih vrednostih točnosti in natančnosti robota. Različni gibi robota, različne dolžine, različne hitrosti in z različnim številom aktivnih sklepov se odražajo na različni merilni negotovosti meritev dimenzij. Linearni gibi robota se odražajo v višji negotovosti merjenja v primerjavi z gibi izvedenimi po posameznih sklepih robota. Nadalje, višje hitrosti in daljši gibi robota povzročajo višjo variabilnost meritev dimenzij s PME tako pri linearnih gibih kot pri gibih po sklepih robota. Prav tako so gibi robota, ki so vsebovali višje število aktivnih sklepov za izvedbo giba, povzročili nekoliko višjo variabilnost meritev dimenzij.

Vpliv parametrov gibanja vrha robota na variabilnost meritev ni povsem presenetljiv. Višja variabilnost meritev dimenzij posredno pomeni večjo napako točnosti in natančnosti robota. Namreč, vsaka rotacija v posameznem sklepu vnaša določeno negotovost v končni legi vrha robota. Zaporedno povezovanje več segmentov z aktivnimi sklepi nadalje povzroča vedno večjo negotovost lege vrha robota. Spremenjena točnost in natančnost robota se nato odražata v različnih variabilnostih meritev dimenzij. Vsebina Poglavja 4 z naslovom Parametri trajektorije gibanja vrha robota predstavlja drugi izvirni prispevek disertacije.

Vpliv prijemanja objekta je raziskano v Poglavju 5. Osno-simetrični objekti pri manipulaciji z robotom pridobijo neželjeno spremembo v orientaciji kljub uporabi prijemanja po obliki, kar je najpomembnejša ugotovitev. Meritve spremembe orientacije objekta so izvedene za dotikanje in izpenjanje pri treh treh različnih silah prijemanja objekta s prijemalom. Poleg merjenja spremembe v orientaciji vstavljenega objekta z optičnim merilnim sistemom je bil iskan tudi vpliv na variabilnosti meritev dimenzij kot posledica le-teh sprememb.

Dotikanje in izpenjanje z robotom se odraža v večji spremembi predvsem zasuka γ . Spremembe v orientaciji objekta pri različnih apliciranih silah so mnogo manjše kot pri različnih dotikanju in izpenjanju. Analiza meritev dimenzij z MSA analizo je potrdila, da je indeks sposobnosti C_g nižji za primer izpenjanja z robotom. Prav tako je opazen bolj izrazit vpliv prijemanja z robotom v primeru dolžinskih meritev

v primerjavi z merjenjem premera. Operacija (večkratnega) prijemanja z robotom je bila že v Poglavju 3 identificirana kot vplivni element k variabilnosti dimenzijskih meritev. Z ločeno poglobljeno obravnavo je prikazano, da se prijemanje z robotom odraža predvsem v spremembi orientacije objekta in vnaša višjo merilno negotovost meritev dimenzij. Vsebina Poglavja 5 z naslovom Prijemanje z robotom predstavlja tretji izvirni prispevek disertacije.

Z vsemi eksperimenti in analizami merilnih rezultatov je pokazano, da robot s svojimi lastnostmi in kot del merilnega sistema vpliva na proces merjenja. Z danimi ugotovitvami lahko optimiziramo manipulacijo z robotom z namenom zmanjšanja vpliva manipulacije z robotom na negotovost meritev dimenzij.

Uporabljen pojem variabilnosti v disertaciji je predstavljen v kontekstu spremenljivosti in ne ponovljivosti (ang. reproducibility) in ga ne smemo enačiti s pojmom merilne negotovosti, lahko pa doprinese k merilni negotovosti.

Med izvajanjem raziskav vpliva zaradi gibanja in prijemanja z robotom smo imeli težave z robotskim prijemalom, saj je zaradi vsakodnevene uporabe prišlo do mehanske izrabe. Neustrezno delovanje prijemala ni vplivalo na proces merjenja in meritve, saj smo delo nadaljevali z drugim (identičnim) prijemalom. Pri testiranju vpliva prijemala na nezaželen zasuk objekta v ležišču eksperimentov ni bilo mogoče ovrednotiti zgolj in samo vpliv prijemala. Vedno je bil poleg vpliva prijemala prisoten vsaj deloma vpliv robota samega, saj se je z nameščenim prijemalom moral odmakniti iz delovnega območja PME, da bi se lahko izvedle dimenzijske meritve s PME in optično zaznavanje zasukov.

Pri tradicionalnih (ročnih) meritvah mora operater vstaviti objekt v ležišče (merilni podstavek) ter ju skupaj pozicionirati pod merilnikom (v večini primerov merilno uro) in izvesti meritve. Torej operater hkrati vpliva na vpetje objekta ter manipulacijo pod/v merilniku. Vsakršno odstopanje od predvidene lege se odraža v povečanju variabilnosti meritev dimenzij. Robot izvaja veliko bolj ponovljive gibe v primerjavi z operaterjem. Z uporabo robotov so prisotne tudi bistveno manjše variacije v aplicirani sili za prijem, vstavljanju in odvzemanju objekta. Zaradi manjka meritev z ročnim vstavljanjem objekta v PME je praktično nemogoče ovrednotiti in primerjati avtomatizirane in ročne meritve (v smislu merjenja dimenzij s PME). V kolikor pa se osredotočimo na ročne meritve z merilno uro, ki se uporablja v sprotnih meritvah, pa je moč opaziti manjšo ločljivost v primerjavi s PME, tudi napake v orientacijah je težko

korigirati.

Zelo aktualno področje za nadaljnjo raziskovanje so zagotovo ležišča in tesnost naleganja objektov v odjemni paleti za dostavo objektov ter predvsem na mestu za pre-prijem objektov. Smiselno bi bilo raziskati optimalne pogoje tesnega naleganja objekta v ležišču nameščenem v PME trenutnega principa vpetja. Pri tesnejšem naleganju bi morali uporabiti drugo prijemalo, ki bi bilo sposobno aplicirati višje sile prijemanja. Pri uporabi trenutnega prijemala so bile potrebne sile za odlaganje in izpenjanje kar 80 % maksimalne sile prijemala. Druga možnost bi bila zasnova aktivnega ležišča z ustreznimi prsti, ki bi zagotavljalo boljšo togost in stabilnost vpetja.

Poleg zamenjave prijemala, bi bilo smiselno analizirati prijeme s prsti prijemala iz različnih materialov, denimo aluminij, jeklo in preostale plastike. Poleg samih materialov prstov, ki bi zagotavljale drugačne mehanske lastnosti, bi lahko na same prste dodali tudi različne premaze oziroma obloge, ki bi preprečevale zdrs objekta iz prijema. Hkrati pa bi lahko tudi preprečevale deformaciji objekta pri apliciranih prevelikih silah.

Komunikacije med robotom UR5e, centralnim krmilnikom ARC in PME je v našem primeru temeljila na ProfiNet protokolu in ni predstavljalo časovne kritičnosti. Vključitev celice za namen vodenja proizvodnje pa je sporočanje neustreznosti dimenzij objektov časovno kritično opravilo. Predvsem bi bilo potrebno preučiti različne tehnologije in protokole za analizo hitrosti prenosa podatkov, časovne zakasnitve, varnosti podatkov in predvsem zanesljivost.

V tem zadnjem odstavku se je potrebno dotakniti še podajnosti uporabljenega robota. Ker je robot UR5e sodelujoči robot, je že po osnovi nekoliko bolj podajen od preostalih industrijskih robotov. Ta podajnost robota je izražena pri neposrednem stiku z okolico. Možna raziskava v prihodnosti bi lahko preiskala lege ležišča v PME znotraj robotovega delovnega prostora na podajnost in merilno negotovost.

Izvirni prispevki doktorske disertacije

- **Ovrednotenje vpliva kompleksnosti manipulacije z robotom na dimenzijska merjenja v merilni robotski celici.**

V devetih definiranih scenarijih manipulacije z robotom je robot uporabljen kot manipulator za prenašanje in vstavljanje objektov v kontaktni primerjalni merilnik Equator (PME). Merilni set vsebuje tri ponovitve meritev posameznega scenarija manipulacije z robotom. Vpliv manipulacije z robotom je obravnavan na podlagi MSA statistične analize. Poleg manipulacije z robotom je obravnavano tudi način merjenja ter vzorčenje PME. Variabilnost meritev pri višanju kompleksnosti manipulacije z robotom narašča, medtem ko se različni načini merjenja PME ne razlikujejo.

Objavljeno v reviji Applied Sciences: Zore Aleš, Čerin Robert, Munih Marko. Impact of a Robot Manipulation on the Dimensional Measurements in an SPC-Based Robot Cell, Appl. Sci. 2021, 11(14), 6397.

- **Identifikacija vplivov hitrosti, razdalje in načina giba robota na dimenzijske meritve pri vstavljanju objektov v merilno napravo.**

Posredno, preko spremenljivosti meritev dimenzij, je zaznana napaka točnosti in natančnosti gibanja vrha robota. Večja spremenljivost se odraža na spremenljivosti lege vstavljenega objekta v ležišču PME. Vsak izmed parametrov (način giba, hitrost giba, razdalja giba in število aktivnih sklepov) ima vsaj minimalen vpliv na točnost in natančnost vrha robota, posledično na negotovost meritev dimenzij.

Poslano v recenzijo v revijo IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.

- **Opredelitev učinka robotskega prijemanja na negotovost dimenzijskih meritev kot posledica neželenega odstopanja orientacije osnosimetričnega merjenja.**

V delovni prostor PME je dodan optični merilni sistem z dvema laserskima merilnikoma za zaznavanje spremembe v orientaciji vstavljenega objekta. Obravnavani so parametri preciznega prijemanja z robotom, to sta sila prijemanja ter kompleksnost prijema. Poleg dimenzijskih meritev s PME so opazovane spremembe v vseh treh kotih orientacije objekta pri operacijah dotika in izpenjanja ter treh različnih silah prijemanja s prijemalom. Obravnava prikaže, da se prijemanje objekta z robotom odraža v spremembi orientacije objekta. Zasuki okoli osi-z so veliko bolj izraziti v primerjavi z zasuki okoli preostalih dveh osi ter tudi pri operaciji izpenjanja.

Literatura

- [1] D. C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*. John Wiley and sons inc., 4. izd., 2001.
- [2] M. J. Chandra, *Statistical quality control*. CRC Press, 2001.
- [3] “Quality Management in the Bosch Group Technical Statistics, Booklet 10 - Capability of Measurement and test processes,” Stuttgart, Germany, Maj 2010.
- [4] V. E. Kane, “Process capability indices,” *Journal of Quality Technology*, vol. 18, št. 1, str. 41–52, 1986.
- [5] S. B. Amara, J. Dhahri, S. Samet in N. B. Fredj, “Method for improving the measurement system selection depending on part and process precisions,” *Measurement*, vol. 98, str. 103 – 111, 2017.
- [6] C.-W. Wu, W. Pearn in S. Kotz, “An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance,” *International Journal of Production Economics*, vol. 117, št. 2, str. 338 – 359, 2009.
- [7] W. Pearn in M.-Y. Liao, “Measuring process capability based on cpk with gauge measurement errors,” *Microelectronics Reliability*, vol. 45, št. 3, str. 739 – 751, 2005.
- [8] W. L. Pearn in M.-Y. Liao, “Estimating and testing process precision with presence of gauge measurement errors,” *Quality & Quantity*, vol. 41, str. 757–777, 2007.
- [9] K. D. Majeske in R. W. Andrews, “Evaluating measurement systems and manufacturing processes using three quality measures,” *Quality Engineering*, vol. 15, št. 2, str. 243–251, 2002.
- [10] B. M. Hsu, M. H. Shu in W. L. Pearn, “Measuring process capability based on cpmk with gauge measurement errors,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 23, št. 5, str. 597–614, 2007.

-
- [11] R. K. Burdick, C. M. Borrer in D. C. Montgomery, "A review of methods for measurement systems capability analysis," *Journal of Quality Technology*, vol. 35, št. 4, str. 342–354, 2003.
- [12] G. Knowles, GordonVickers in J. Anthony, "Implementing evaluation of the measurement process in an automotive manufacturer: a case study," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 19, št. 5, str. 397–410, 2003.
- [13] M. M. Song Fu, Osmo Kauppila, "Measurement system escape and overkill rate analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 57, št. 9, 2011.
- [14] N. D. Morchower, "Two-location gauge evaluation," *Quality Progress*, vol. 32, št. 4, str. 79–86, 1999.
- [15] A. Al-Refaie in N. Bata, "Evaluating measurement and process capabilities by gr&r with four quality measures," *Measurement*, vol. 43, št. 6, str. 842–851, 2010.
- [16] A. Weckenmann, M. Knauer in H. Kunzmann, "The influence of measurement strategy on the uncertainty of cmm-measurements," *CIRP Annals*, vol. 47, št. 1, str. 451–454, 1998.
- [17] M. Krawczyk, A. Gaska in J. Sladek, "Determination of the uncertainty of the measurements performed by coordinate measuring machines," *tm - Technisches Messen*, vol. 82, št. 6, str. 329–338, 2015.
- [18] M. Papananias, S. Fletcher, A. P. Longstaff in A. B. Forbes, "Uncertainty evaluation associated with versatile automated gauging influenced by process variations through design of experiments approach," *Precision Engineering*, vol. 49, str. 440 – 455, 2017.
- [19] A. B. Forbes, M. Papananias, A. P. Longstaff, S. Fletcher, A. Mengot in K. Jonas, "Developments in automated flexible gauging and the uncertainty associated with comparative coordinate measurement," v *euspen's 16th International Conference & Exhibition, 30 May - 3 June, Nottingham, UK*, str. 111–112, european society for precision engineering and nanotechnology, 2016.
- [20] A. B. Forbes, A. Mengot in K. Jonas, "Uncertainty associated with coordinate measurement in comparator mode," *Laser Metrology and Machine Performance*, str. 146–155, 2015.
- [21] A. Altinisik in E. Bolova, "A comparison of off-line laser scanning measurement capability with coordinate measuring machines," *Measurement*, vol. 168, 2021.

- [22] E. Kiraci, A. Palit, M. Donnelly, A. Attridge in M. A. Williams, "Comparison of in-line and off-line measurement systems using a calibrated industry representative artefact for automotive dimensional inspection," *Measurement*, vol. 163, 2020.
- [23] E. Kiraci, P. Franciosa, G. A. Turley, A. Olifent, A. Attridge in M. A. Williams, "Moving towards in-line metrology: evaluation of laser radar system for in-line dimensional inspection for automotive assembly systems," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, str. 69–78, 2017.
- [24] G. Rosati, G. Boschetti, A. Biondi in A. Rossi, "On-line dimensional measurement of small components on the eyeglasses assembly line," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, št. 3, str. 320 – 328, 2009.
- [25] S. Lemes, D. Strbac in M. Cabaravdic, "Using industrial robots to manipulate the measured object in cmm," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, št. 7, str. 281, 2013.
- [26] S. Lemeš, M. Čabaravdić in N. Zaimović-Uzunović, "Robotic manipulation in dimensional measurement," v *2013 XXIV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, str. 1–7, 2013.
- [27] "ISO 9283: Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods," standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 1998.
- [28] A. Angelidis in G. . Vosniakos, "Prediction and compensation of relative position error along industrial robot end-effector paths," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, št. 1, str. 63–73, 2014.
- [29] O. Felix Offodile in K. Ugwu, "Evaluating the effect of speed and payload on robot repeatability," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 8, št. 1, str. 27–33, 1991.
- [30] O. F. Offodile, K. O. Ugwu in L. Hayduk, "Analysis of the causal structures linking process variables to robot repeatability and accuracy," *Technometrics*, vol. 35, št. 4, str. 421–435, 1993.
- [31] J. Brink, B. Hinds in A. Haney, "Robotics repeatability and accuracy: Another approach," *Texas Journal of Science*, vol. 56, št. 2, str. 149–156, 2004.
- [32] A. Sirinterlikci, M. Tiryakioglu, A. Bird, A. Harris in K. Kweder, "Repeatability and accuracy of an industrial robot: Laboratory experience for a design of experiments course," *Technology Interface Journal*, vol. 9, 2009.

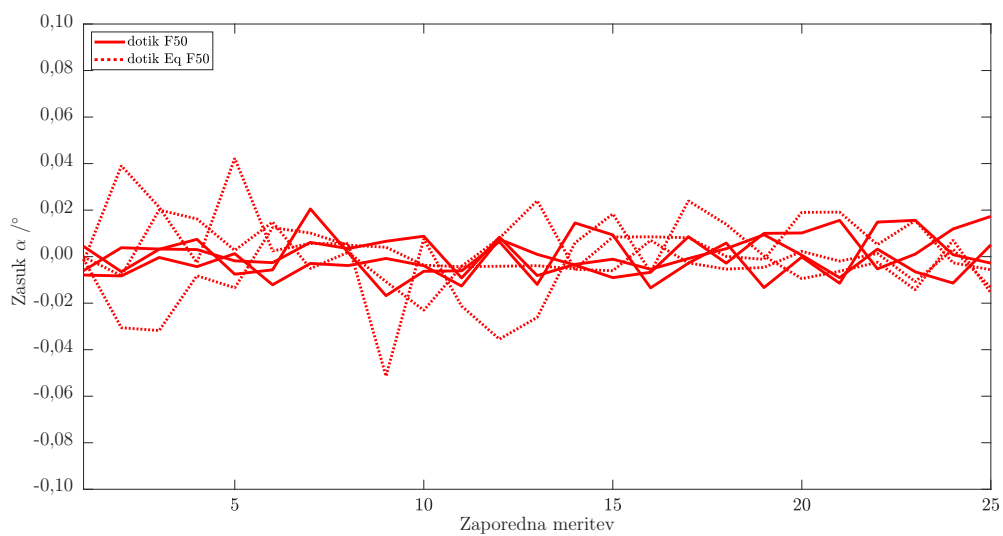
- [33] A. Mehrez, M. Hu in O. Offodile, “Multivariate economic analysis of robot performance repeatability and accuracy,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 15, št. 4, str. 215–225, 1996.
- [34] M. Vocetka, R. Huňady, M. Hagara, Z. Bobovský, T. Kot in V. Krys, “Influence of the approach direction on the repeatability of an industrial robot,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, št. 23, str. 1–24, 2020.
- [35] M. Slamani, A. Nubiola in I. Bonev, “Assessment of the positioning performance of an industrial robot,” *Industrial Robot*, vol. 39, št. 1, str. 57–68, 2012.
- [36] R. Riemer in Y. Edan, “Evaluation of influence of target location on robot repeatability,” *Robotica*, vol. 18, št. 4, str. 443–449, 2000.
- [37] F. Azadivar, “The effect of joint position errors of industrial robots on their performance in manufacturing operations,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, št. 2, str. 109–114, 1987.
- [38] P. Shiakolas, K. Conrad in T. Yih, “On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots,” *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 22, št. 4, str. 245–254, 2002.
- [39] L. McGarry, J. Butterfield in A. Murphy, “Assessment of iso standardisation to identify an industrial robot’s base frame,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 74, 2022.
- [40] E. Ferreras-Higuero, E. Leal-Muñoz, J. García de Jalón, E. Chacón in A. Vizán, “Robot-process precision modelling for the improvement of productivity in flexible manufacturing cells,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 65, str. 101966, 2020.
- [41] L. Wu in H. Ren, “Finding the kinematic base frame of a robot by hand-eye calibration using 3d position data,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14, št. 1, str. 314–324, 2017.
- [42] J. Denavit in R. S. Hartenberg, “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 22, str. 215–221, 06 2021.
- [43] Y. Jiang, X. Huang in S. Li, “An on-line compensation method of a metrology-integrated robot system for high-precision assembly,” *Industrial Robot*, vol. 43, št. 6, str. 647–656, 2016.
- [44] M. Bock, M. Perner, C. Krombholz in B. Beykirch, “Relation between repeatability and speed of robot-based systems for composite aircraft production through multilateration

- sensor system,” v *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2015*, vol. 9435, str. 729 – 736, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2015.
- [45] R. Kluz in T. Trzepieciński, “Analysis of the optimal orientation of robot gripper for an improved capability assembly process,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 74, str. 253–266, 2015.
- [46] A. Sivaji, “Measurements system analysis,” v *Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications*, DELTA '06, str. 393–396, IEEE Computer Society, 2006.
- [47] American Society for Quality Control, *Measurement System Analysis: reference Manual*. 4. izd., 2010.
- [48] “ISO 14253-2: Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification,” standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2011.
- [49] “ISO 15530-3: Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards,” standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2011.
- [50] “ISO 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,” standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2017.
- [51] T. W. Anderson in D. A. Darling, “Asymptotic theory of certain ”goodness of fit” criteria based on stochastic processes,” *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 23, št. 2, str. 193–212, 1952.
- [52] J. M. Chambers, *Graphical methods for data analysis*. Chapman and Hall/CRC, 2018.
- [53] A. Bastas, “Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe,” *Measurement*, vol. 156, str. 107604, 2020.
- [54] H. Wang, H. Wang, J. Huang, B. Zhao in L. Quan, “Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 139, str. 284–293, 2019.

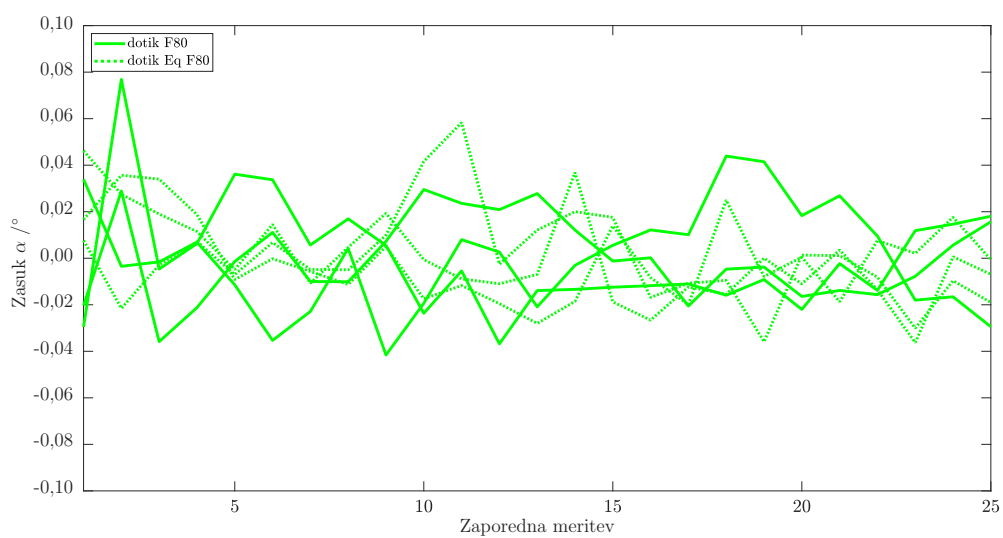
-
- [55] R. G. Dorsch, G. Häusler in J. M. Herrmann, “Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement,” *Applied optics*, vol. 33, št. 7, str. 1306–1314, 1994.
- [56] S. Pellegrini, G. S. Buller, J. M. Smith, A. M. Wallace in S. Cova, “Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting,” *Measurement Science and Technology*, vol. 11, št. 6, str. 712, 2000.
- [57] N. R. Doloca, K. Meiners-Hagen, M. Wedde, F. Pollinger in A. Abou-Zeid, “Absolute distance measurement system using a femtosecond laser as a modulator,” *Measurement Science and Technology*, vol. 21, št. 11, str. 115302, 2010.
- [58] A. Kilpelä, R. Pennala in J. Kostamovaara, “Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, št. 4, str. 2197–2202, 2001.
- [59] M. Norgia, G. Giuliani in S. Donati, “Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop,” *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, št. 5, str. 1894–1900, 2007.

Dodatek A

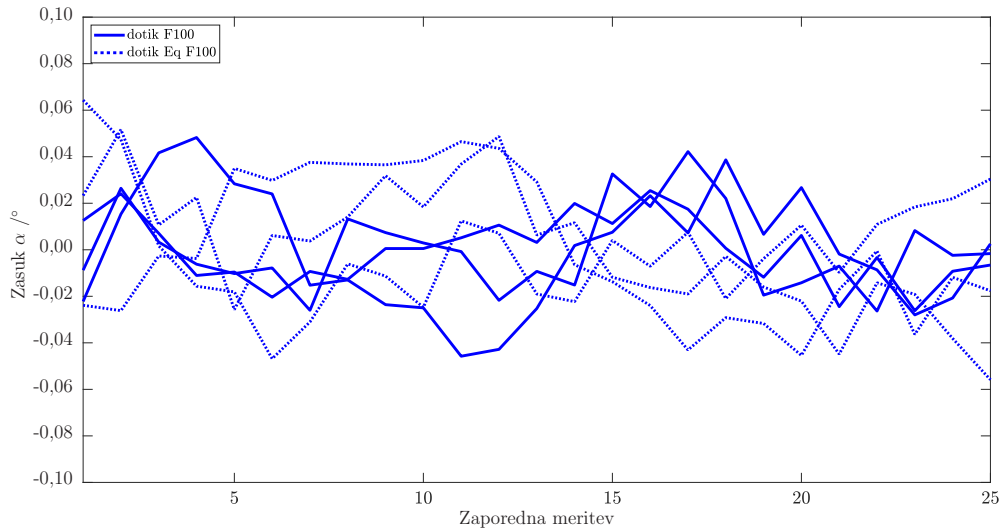
Dodatek poglavju *Prijemanje z robotom*



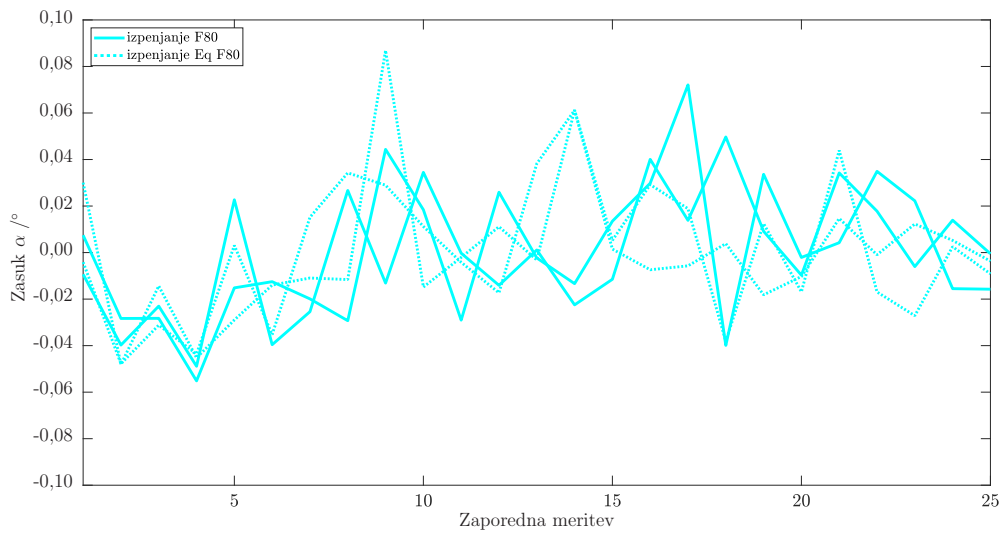
Slika A.1: Zasuki α okoli osi-x objekta pri dotiku in sili prijemanja 50 % nazivne sile.



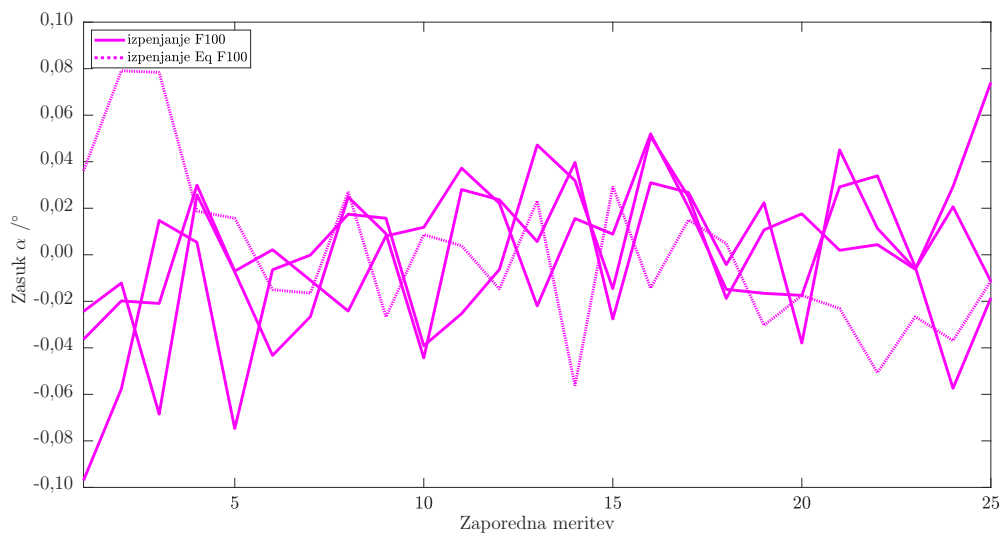
Slika A.2: Zasuki α okoli osi-x objekta pri dotiku in sili prijemanja 80 % nazivne sile.



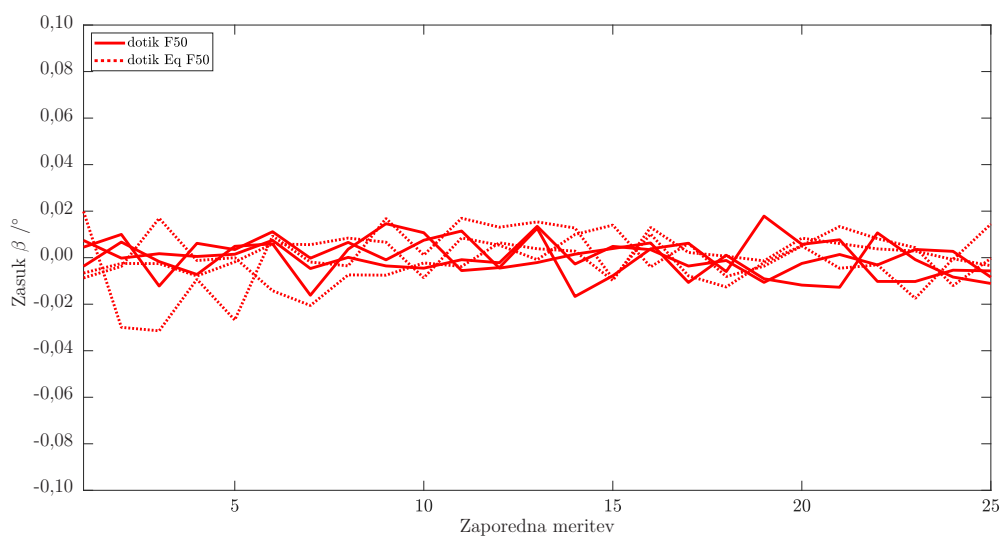
Slika A.3: Zasuki α okoli osi-x objekta pri dotiku in sili prijemanja 100 % nazivne sile.



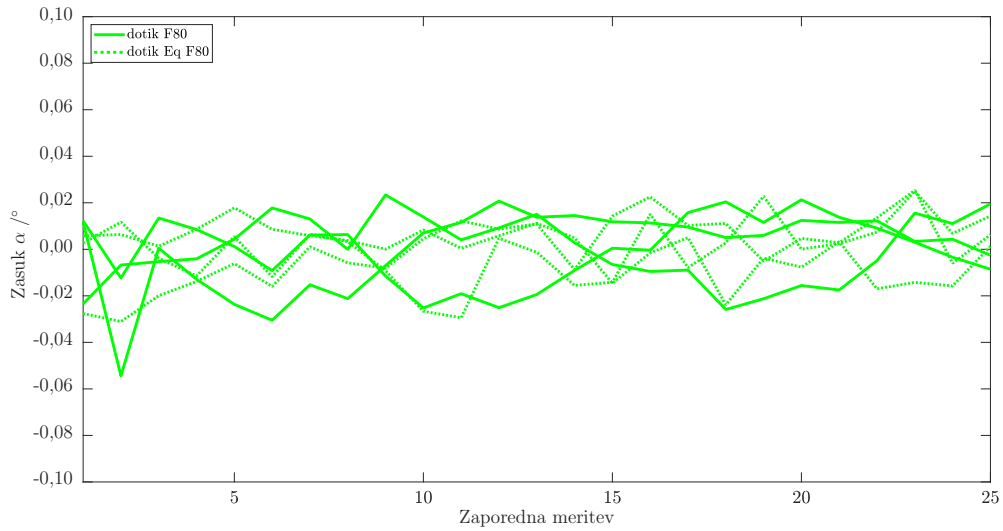
Slika A.4: Zasuki α okoli osi-x objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 80 % nazivne sile.



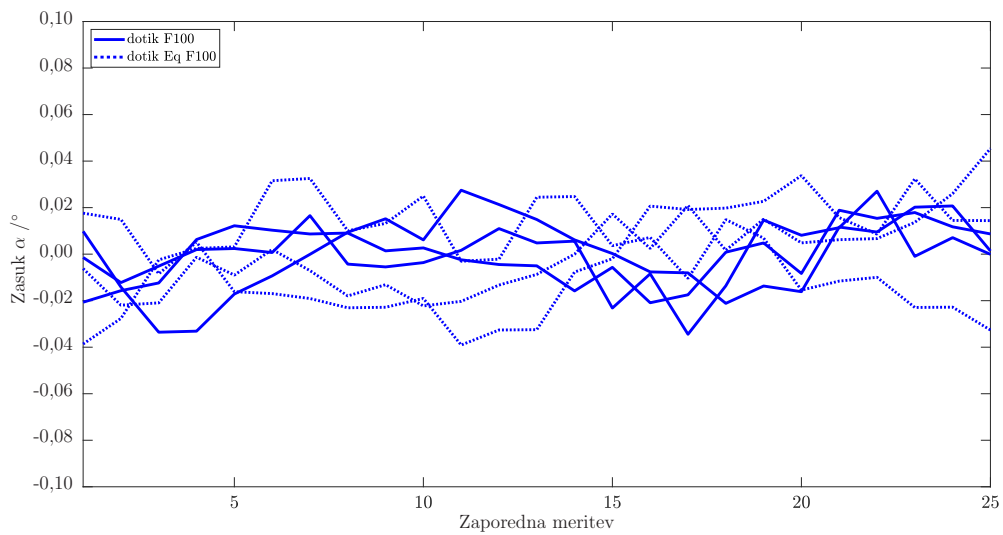
Slika A.5: Zasuki α okoli osi-x objekta pri izpenjanju in sili prijetanja 100 % nazivne sile.



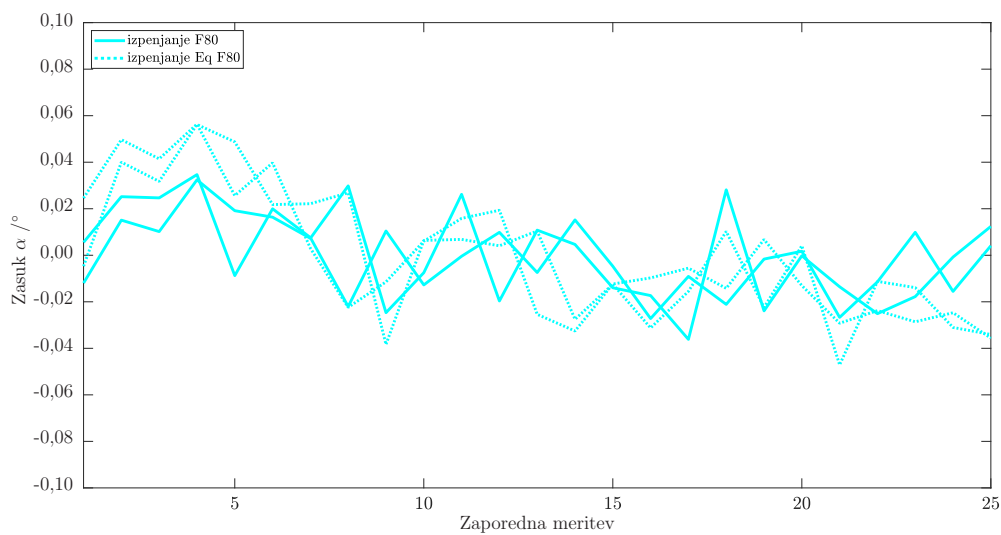
Slika A.6: Zasuki β okoli osi-y objekta pri dotiku in sili prijetanja 50 % nazivne sile.



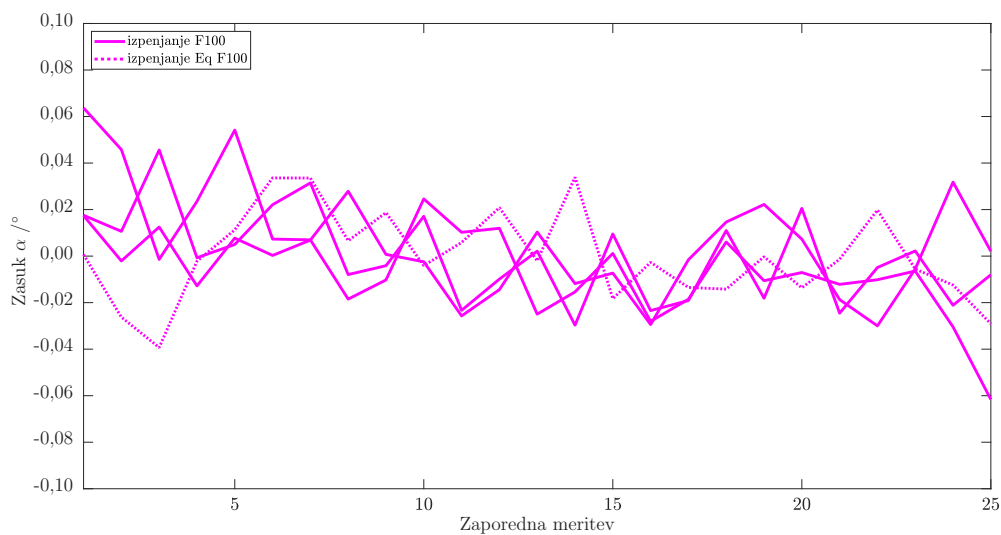
Slika A.7: Zasuki β okoli osi-y objekta pri dotiku in sili prijemanja 80 % nazivne sile.



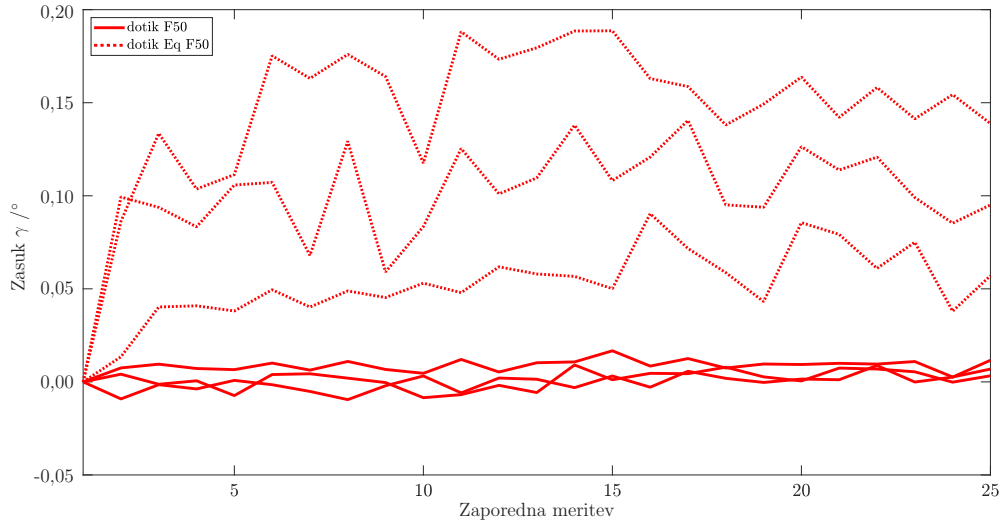
Slika A.8: Zasuki β okoli osi-y objekta pri dotiku in sili prijemanja 100 % nazivne sile.



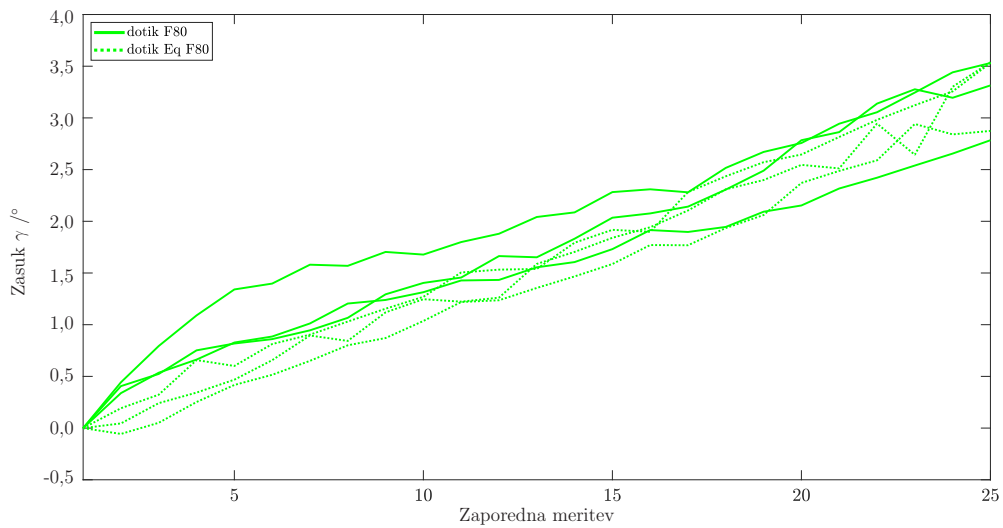
Slika A.9: Zasuki β okoli osi-y objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 80 % nazivne sile.



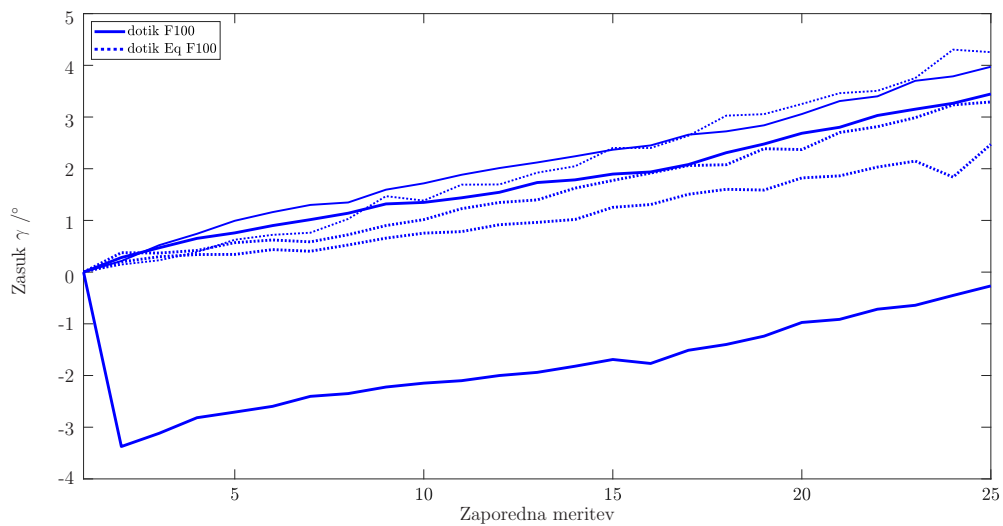
Slika A.10: Zasuki β okoli osi-y objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 100 % nazivne sile.



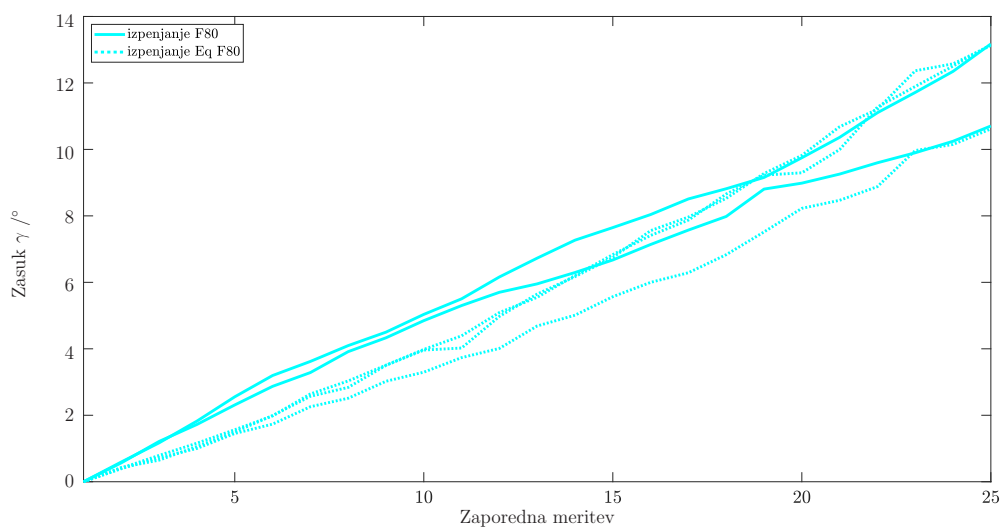
Slika A.11: Zasuki γ okoli osi-z objekta pri dotiku in sili prijemanja 50 % nazivne sile.



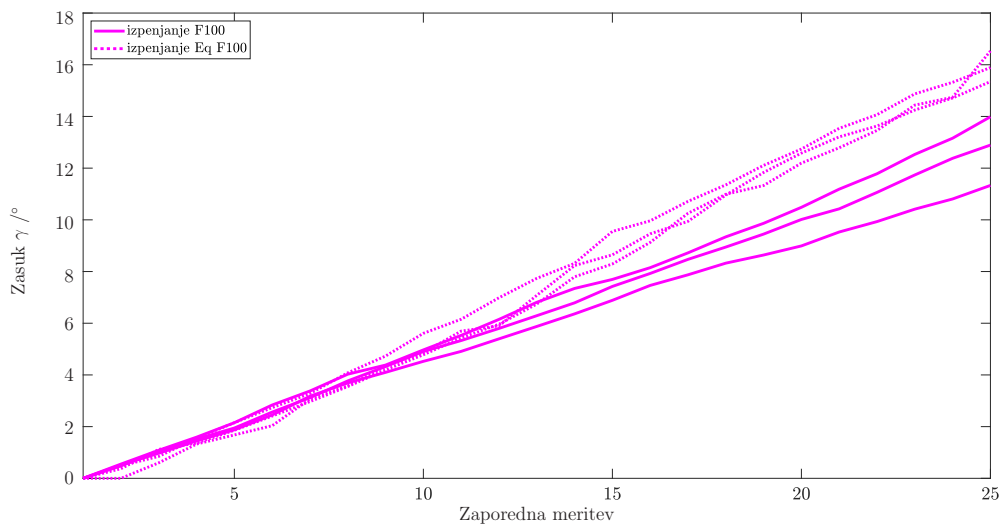
Slika A.12: Zasuki γ okoli osi-z objekta pri dotiku in sili prijemanja 80 % nazivne sile.



Slika A.13: Zasuki γ okoli osi-z objekta pri dotiku pri sili prijemanja 100 % nazivne sile.



Slika A.14: Zasuki γ okoli osi-z objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 80 % nazivne sile.



Slika A.15: Zasuki γ okoli osi-z objekta pri izpenjanju in sili prijemanja 100 % nazivne sile.

Dodatek B

Applied Sciences, 2021

Article

Impact of a Robot Manipulation on the Dimensional Measurements in an SPC-Based Robot Cell

Aleš Zore ^{1,*} , Robert Čerin ² and Marko Munih ¹ 

¹ Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Tržaška Cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenia; marko.munih@fe.uni-lj.si

² Kolektor Orodjarna d.o.o., Vojkova Ulica 10, 5280 Idrija, Slovenia; robert.cerin@kolektor.com

* Correspondence: ales.zore@fe.uni-lj.si

Abstract: In our study a robot was used to deliver objects for measurement into the Equator gauging system. To investigate the robot's manipulation influence on dimensional measurements, the robot's tasks were divided into basic functions. Based on these basic functions, nine different robot-manipulation scenarios were defined, i.e., from zero to full robot manipulation, for two measuring objects (named Magnet and PKR) and six measurement characteristics (rectangular and spherical). The robot's manipulation influence was determined on the basis of the statistical parameters C_p , R , and the 6σ obtained from a measurement system analysis (MSA) type-1 study. The results show that the degree of implemented manipulation of the robot affects the scattering of the measurement data. However, the effect is much more pronounced in the case of length measurements than with spherical geometries. Different measuring methods (touch-triggering or scanning measurement mode, number of sampling points) were used, which showed similar measurement data. This directly indicated the influence of the robot's manipulation on C_p , R and 6σ . Increasing the degree of the robot's manipulation decreases the C_p value and increases the R and 6σ values for the length measurements. There is no such pronounced course in the spherical geometries, where the values of C_p , R and 6σ remain approximately the same. The main influential factor for decreasing the C_p value with increasing robot manipulation was the angular misalignment of the object's orientation in the fixture.

Keywords: CMM; robot; manipulation; SPC; dimensional measurement; comparative measurements



Citation: Zore, A.; Čerin, R.; Munih, M. Impact of a Robot Manipulation on the Dimensional Measurements in an SPC-Based Robot Cell. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 6397. <https://doi.org/10.3390/app11146397>

Academic Editor: Carlo Canali

Received: 15 June 2021

Accepted: 9 July 2021

Published: 11 July 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Recently, there has been an increasing emphasis on product-quality and process control in the process industry. Due to the increasing daily demands for better product quality, the need for ever-improving measuring systems is also on the increase.

Several different approaches are used to ensure adequate quality and process control. The most commonly used method in manufacturing is Statistical Process Control (SPC) [1,2]. Amongst SPC techniques (histograms, control charts, scatter diagrams, etc.), there are methods for evaluating the manufacturing process's capability (including the capabilities of the measuring system).

Coordinate measuring machines (CMMs) have a leading role in manufacturing metrology because of their versatile and flexible use. However, in addition to these good qualities, they also possess some important disadvantages. They are costly, in many cases, time-consuming, and they require temperature-controlled rooms to achieve their optimum measurement capabilities. Many potential sources are able to influence CMMs' measurement uncertainties, most notably the environment of the measurements, the measurement procedure [3–16], the measuring equipment [3,9–11,14,15], and the operator [3,4].

The operator influences process measurements through conscious or unconscious actions. Using different measuring tools, the operator can apply forces of different sizes (e.g., measuring lengths or diameters when using calipers). When holding the object in clamps for measurements with a CMM, the operator can cause deformations of the

measured object or introduce uncertainty due to a positioning error. Unlike operators (in general, humans), industrial robots have much better repeatability and accuracy of their movements. Besides, they can operate continuously without stopping. In this regard, robots can be used in place of operators and increase the data's reliability, and, at the expense of continuous operation, the sample of measured objects can be increased. These days, robots also allow for a reasonable degree of flexibility.

Numerous studies have been conducted to speed up the measurements involving industrial robots, laser scanners, and optical CMMs [17–20]. Kirachi et al. [17,18] and Altinisik [19] compared CMMs with laser scanners attached to industrial robots in the automobile industry. In all cases, the measurement cycle time was significantly reduced compared to CMM measurements. Additionally, the density of measured points was increased. However, it should be noted that it was not possible to measure all the characteristics using the combination of a robot and a laser scanner, and the method is suitable for measuring relatively large subjects (e.g., car chassis) with a tolerance of 3 mm (± 1.5 mm).

Lemes et al. [20] used an industrial robot to manipulate a measured object inside the CMM's working area. The main goal of the research was to perform the re-positioning of a measured object with a 5-axis industrial robot and fully automate the measurement cycle. They concluded that it is possible to conduct measurements using a CMM-robot system. However, the measurement results are dictated by the measurement uncertainty of the least-accurate component of the system, an industrial robot in this case.

Measurement uncertainty that encompasses the operator's influence can be significantly reduced by changing the measurement methods appropriately. The operator's influence includes the determination of the measurement probes and stylus [12], the sampling method [6–8,13] for the measured features (distribution and number of points), and the positioning of the part and fitting algorithms [9–11]. As demonstrated in Reference [20], with some additional improvements, the uncertainty part due to the positioning error can be reduced. Nevertheless, Papananias et al. [21], Forbes et al. [14], and Forbes et al. [22] showed that using a CMM in comparator mode eliminates the kinematic part of the measurement uncertainty and reduces the part associated with environmental impacts. Systematic effects associated with the measurement system apply both to the measurements of the test artefact and the master artefact, and a substantial proportion of the systematic effect associated with the two sets of measurements cancel out.

In industry, there have already been demonstrations of an automated measurement system with a reduced influence of the operator. However, the current literature does not present automated solutions that would involve a combination of a robot and contact measurements where the robot would replace the operator to serve the measuring machine (including object grasping and manipulation, insertion, and removal).

This work investigates another previously unstudied, but today important, dimension to show how the measurement outcome varies during automation. More specifically, we are interested in the influence of the robot's manipulation (that occurs before a dimensional measurement) on the object's final dimensional measurements. More in detail, measurement data scattering. We identified some important and problematic robot manipulation actions that affected the scattering of dimensional measurement data. We divided actions into grasping, robot trajectory, object insertion, and measurements (Figure 1). Furthermore, object insertion can be divided into translation and rotation. Meanwhile, robot trajectory can be divided into linear and joint motions. Figure 1 also shows that multiple grasps, as well as several trajectory sections, appear in regular manipulation to measurement cycle. The measurement itself is ultimately the last phase, which means that all previous grasping or manipulation actions might influence 6D pose repeatability of the measured part. The geometry of the measured part is not ideal. Inherited are many dimensional tolerances that mirror better measurement system analysis (MSA) parameters [23,24] if repeatability in all previous steps is high. In the case of poor repeatability, we, indeed, measure different points with different tolerances on the object. Advanced use-case examples of robots are the core pillars of Industry 4.0 and quality assurance, with both gaining importance in a

product-adaptive or modularly composed environment. In this way, such a question is essential for state-of-the-art Industry 4.0.

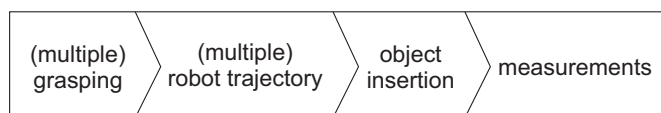


Figure 1. The primary division of robot grasping, manipulation, and measurements.

The primary role of quality assurance is elementary, i.e., always measure in the same way. This is not the case if the robot's handling of the object is not constant, something that would introduce more variability into the measurement procedure. For instance, the manipulator mechanics of an old robot, with many working hours or loose grasping, add more and more positional and rotational uncertainty to an otherwise "constant" robot's individual actions and set of movements. Finally, this leads to positional and orientational (i.e., relating to the pose) uncertainty of the measured object [25,26]. Pose uncertainty influences the measuring equipment's capability, as well as the repeatability and reproducibility, which are all well-defined for today's acknowledged quality-assurance producers (see Section 2).

The influence of robot manipulation on the capability of measuring systems is studied for nine different robot scenarios. The robot provides complex and straightforward object handling, while the Equator (parallel robot) contact measuring device is used for the measurement. The initial assumption that a higher degree of robot manipulation directly affects the capability factor C_p is verified and confirmed. It turns out that the sampling strategy and measurement method (scanning and touch-triggering mode) have a much smaller impact on the capability factor C_p than the robot grasping and the manipulation itself. Normal distribution of grasping, manipulation and measurement data is confirmed. Using appropriate sequences, the MSA statistical parameters can be improved.

The rest of the article is organized as follows. Different capability indices used in industry are presented in Section 2. Section 3 describes the measurement system and the equipment. Nine robot scenarios are introduced with measured objects and their measured characteristics. The results are presented in Section 4 and discussed in Section 5. Concluding remarks are given in Section 6.

2. Process Capability—Capability Indices

To quantify process capability, a statistical analysis of the process itself, considering the process mean μ and the standard deviation σ , has to be taken into account. Normally, μ and σ are unknown and approximated by \bar{x} and s , respectively. For a statistical evaluation, several capability indices are used in manufacturing, such as precision-to-tolerance (PTR) [27–34], number of distinct categories (NDC) [28,34], repeatability and reproducibility (R&R) [31,34,35], and discrimination ratio (DC) [34,35]. The indices can be roughly divided into two subgroups for:

1. comparing the tolerance of the part's specifications with the measurement system's variability σ_m , and
2. matching the process variability σ_p to the measurement system's variability.

The PTR is the most commonly used criterion concerning the first group because of its simplicity. It represents the percentage of tolerance consumed by the variability of the measurement. The general form is shown in (1), where k is a constant and corresponds to the limiting number of standard deviations. Normally, k equals 6.

$$PTR = \frac{k \sigma_m}{TOL}. \quad (1)$$

The NDC, the percentage of repeatability and reproducibility (%GR&R), and DC are the main criteria based on process and measurement variability. The NDC criterion is often reported as the signal-to-noise ratio (SNR).

The first group of capability indices should be taken into account during part inspection and measurement-system selection. In the case of process control, measurement-system selection has to be made using the second group's criteria. In many cases, when the data from parts are used to determine the process variability, measurement-system selection must consider both groups of criteria simultaneously. In the literature, a lower PTR value than the threshold value (commonly set between 5% [36,37] and 10% [31]) indicates an acceptable measurement method. The NDC has the opposite behavior to that of the PTR. A larger value indicates a more acceptable measurement method, and the threshold value is commonly set to 5 [1,38]. It must be pointed out that there is no indication of how these thresholds were established.

Referencing the MSA study of Reference [23,24], a type-1 study corresponds to the capability of the measurement equipment (the measurement process) and type-2 and -3 studies correspond to a repeatability and reproducibility study (with and without the operator's influence). The measurement equipment's capability is commonly calculated as the C_p factor, which is called the precision index and is calculated as:

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{\text{allowable process spread}}{\text{actual process spread}} \\ &= \frac{TOL}{6\sigma_p} \\ &= \frac{USL - LSL}{6\sigma_p} \end{aligned} \quad (2)$$

USL and LSL are the upper and lower specification limits. Due to its simplicity, C_p cannot provide an assessment of the process centering. To measure the degree of process centering relative to the manufacturing tolerance, the accuracy index C_a is defined as:

$$C_a = 1 - \frac{|\mu - m|}{d}, \quad (3)$$

where μ is the process mean, $d = \frac{USL - LSL}{2}$ is the half specification width, and $m = \frac{USL + LSL}{2}$ is the midpoint between the upper and lower specification limits. As can be seen from (3), any deviation from the centered point results in a reduction of the C_a value. Combining the C_p and C_a factors results in a definition of the C_{pk} factor as:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\} = \frac{d - |\mu - m|}{3\sigma}. \quad (4)$$

It must be noted that the use of the parameters C_p , C_a , and C_{pk} requires a normal distribution of the measured data.

An MSA type-1 study evaluates the capability of a measuring process. In studies of type-2 and -3, it is the capability of the measuring process in terms of the verification of variation using measurements of the serial product (R&R—the repeatability and the reproducibility) with or without operator influence.

3. Materials and Methods

3.1. Measurement Equipment

For our study, we used an adaptive robotic cell (ARC) for automated SPC dimensional measurements developed in our laboratory in collaboration with the company Kolektor. The whole robotic cell consists of five modules, a module with a robot, a module with the Equator, a module for optical inspections, an accessory module with a storage area, and a module for the supply of subjects on measuring pallets. The ARC, therefore, makes possible

contact and non-contact dimensional measurements. For our research, a subset of a module with a robot, a supply module, and a module with the Equator were used (Figure 2). The immediate observation was that the robot manipulation has a more significant influence on the variance of contact dimensional measurements than the non-contact dimensional measurements; therefore, non-contact methods were off the study.

In the ARC and this study, we used a collaborative robot UR5e manufactured by Universal Robots, with an attached CRG 30-050 collaborative servo gripper from Weiss Robotics. For the contact measurements, the comparator principle-based measurement system Renishaw Equator 300 was used. The primary task of the robot is to tend the Equator with measured objects into a fixture in the Equator's working area. The robot was replicating the operator in traditional and manual measurements.

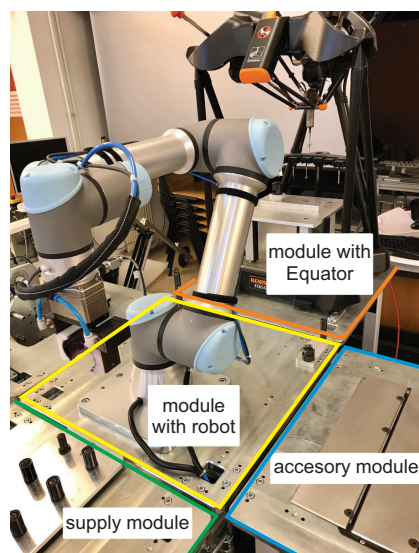


Figure 2. The subset of the adaptive robotic cell used in the study (bottom-left supply module, a module with the robot in the center, and a module with the Equator at the back). The robot hand is equipped with a Weiss Robotics two-finger gripper equipped with custom fingers, suitable for measured objects.

3.2. Measured Objects

For our study, we selected two types of serial product, i.e., a Magnet and a PKR. For each of the products, we implemented the measurement characteristics currently measured as part of the SPC measurements. In the case of the Magnet object, two characteristics were measured: (i) the characteristic diameter with code 20 and (ii) the characteristic height with code 30, with tolerances, respectively, ± 0.05 mm and ± 0.15 mm (Figure 3), and, in the case of the PKR object, four characteristics were measured: (i) the characteristic height with code 10, (ii) the characteristic height with code 100, (iii) the characteristic diameter with code 130, and (iv) the characteristic height with code 140, with tolerances, respectively, ± 0.1 mm, ± 0.1 mm, $+0.5$ mm, and ± 0.2 mm (Figure 4). In total, this was four heights and two diameters.

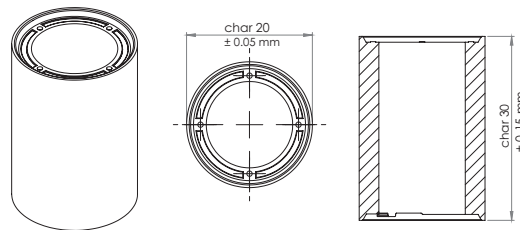


Figure 3. Demonstration of the measured characteristics with tolerances for the product Magnet.

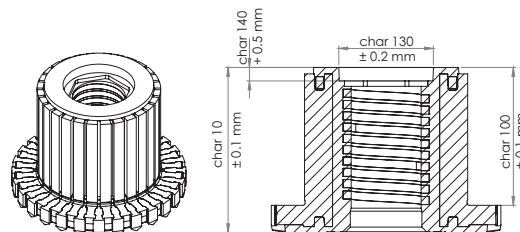


Figure 4. Demonstration of the measured characteristics with tolerances for the product PKR.

3.3. Measurement Scenarios

To investigate the robot movement's influence that occurs prior to a dimensional measurement on the final measured values, we divided the robot's tasks into functions, such as grip, rotation, and translation, which were the basis for the composition of nine different robot scenarios (Table 1). In all scenarios, and for all codes, the Renishaw Equator was used as the measuring device.

Various scenarios are defined, programmed, and verified, from no robot manipulation to full robot manipulation, and their short descriptions, together with the used measurement method, are listed in Table 1.

Scenario 1 represents no robot manipulation. The measured object is inserted into a fixture inside the Equator working area with no additional robot manipulation. The fixture is placed firmly at the very beginning and locked with a pneumatic system in the Equator system's measuring area. The measured object is being positioned in the measurement area, without any interruption at all over time, without any removal or external interference. Only the Equator measurement device makes contact during the measurement itself. Therefore, this situation is the best possible environment, where the measurement error is equal only to the capability of the Equator and the supporting fixture of the measured object.

The subsequent scenarios are adding more manipulative gestures to the primary scenario 1. In scenario 2, only a short and simple gripping sequence is superimposed to investigate how much the gripping of the object, placed in the fixture, influences the measurements. The robot approaches the object (from a distant point outside the Equator working area) that is already in a fixture and has just been measured, grasps with the gripper, and makes a release immediately, without any robot movement during this time. Then, the robot retracts from the object and moves outside the Equator working area.

Further scenarios 3 to 6 represent other, different starting displacements of the object, such as translation along the vertical z-axis, rotation around the vertical z-axis, or a combination of both. Different starting displacements correspond to different robot motions for placing the object in the measuring position. In scenario 3, the object is already in a fixture and has been measured, the robot approaches the object from a distant point outside the Equator working area, grasps it, and does a simple translation along the z-axis

for 20 mm. This is followed by a backward movement and placement of the object in a fixture. The robot then moves away, and a subsequent measurement with the Equator is begun. In scenario 4, as well, the object is in a fixture and has just been measured. The robot approaches the object from a distant point outside the Equator working area, grasps it, and makes a rotation around the z-axis by 15 degrees. The opposite rotation back to the original pose is executed, the object is released, the robot moves away, and the measurement commences. A translation along the object’s z-axis involves the movement of three robot joints (2, 3, and 4), while rotation about the object’s z-axis involves two robot joints (1 and 5). Scenario 5 represents a combination of scenario 3 and 4; thus, translation for 20 mm and rotation by 15 degrees with the robot are applied after object grasping. Any other procedures are the same as in the scenarios mentioned before.

Table 1. Short description of nine robotized scenarios for an investigation of the robot’s influence on the capability of the measurement process C_p with used measurement methods in Equator gauge. For the Magnet object, three different measurement methods were used (touch-triggering method (TTM), scanning method (SM), and scanning method with additionally increased sampling points (SM+)); for the PKR object, only a combination of TTM and SM was used.

Measurement Scenario	Description of Scenario	Measurement Method Used	
		Magnet	PKR
Scenario 1	No robot manipulation, measurement capability of Equator.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 2	Grip and release.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 3	Grip and translation.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 4	Grip and rotation.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 5	Grip, rotation, and translation.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 6	Grip, translation, and release.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 7	Total repositioning.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 8	Regripping.	TTM, SM, SM+	TTM + SM
Scenario 9	Complete automated measuring cycle, measurement capability of ARC.	TTM, SM, SM+	TTM + SM

In scenarios 3 to 5, there is no release of the object between the individual measurements. After the measurement, the robot approaches the object from a distant point outside the Equator working area, grasps it, and moves to a displaced position. Insertion into the fixture is followed, and the robot releases the object and moves away. In scenario 6, releasing the object after moving into a displaced position is added. The sequence after the individual measurement is as follows. The robot approaches the object from a distant point outside the Equator working area, grasps it, moves to a displaced position, releases the object, and moves away to a distant point outside the Equator working area. Then, the robot approaches the object in a displaced position, grasps it, and inserts it into a measuring position in the fixture.

Scenario 7 is the total removal of the object from the fixture compared to scenario 3 to 6. After grasping the object in the fixture, the robot removes the object and moves outside the Equator’s working area. In previous scenarios (3 to 6), the object was displaced (relatively small translations or rotations) from the measuring position and still located in the fixture. In scenario 7, these displacements were more significant, and the object is moved outside the fixture and the Equator’s working area, as well, i.e., total removal.

One new robot gesture is introduced in scenario 8. Namely, in some measurement or object positioning variations, an intermediate mechanical fixture is introduced, in most cases, with the aim of re-grasping the object in a different orientation (from vertical to horizontal or from horizontal in vertical). To investigate these situations, picking and placing to the re-gripping position in a workspace is added in scenario 8 to the previous total removal from a fixture. After the object’s placement in the re-gripping fixture, the robot makes a release and changes its orientation, followed by a new grasp (in horizontal orientation) and positioning in the measurement fixture in the Equator.

The last scenario, scenario 9, is equal to a complete, automated measuring cycle, starting from picking an object from the pallet, re-gripping from a vertical to a horizontal orientation, inserting the object into the fixture, measuring with the Equator, removing the object from the fixture, re-gripping back from the horizontal to the vertical orientation, and placing the object back at starting position in the pallet.

The compound robot manipulation operations from the basic operations are collected in Table 2. Operations involving precise movements (e.g., object insertion or object removal) and movements in constricted spaces involve linear movements, while operations that are not spatially constrained involve joint motion type. Correspondingly, velocities and accelerations in spatially unconstricted motions are significantly higher compared to constricted motions. The first four operations (approach, retract, insertion, and removal) vary according to the selected scenario. For example, in scenario 3, insertion contains linear translation along the z-axis for 20 mm, rotation around the z-axis by 15 degrees in scenario 4, and a combination of both movements in scenario 5. The other four operations are scenario-independent.

Table 2. Short description of compound robot manipulation operations from basic functions in measurement scenarios (motion type, desired velocities v , accelerations a , and involvement in scenarios).

Robot Operations	Motion Type	In Scenario	a	v
Approach to the object in the Equator (open gripper)	linear	2, 6–9	0.5 m/s ²	0.5 m/s
Retract from the object in the Equator (open gripper)	linear	2, 6–9	0.5 m/s ²	0.5 m/s
Object insertion	linear	3–9	0.5 m/s ²	0.5 m/s
Object removal	linear	3–9	0.5 m/s ²	0.5 m/s
Re-gripping phase (V to H and H to V)	joint	8–9	2.5 rad/s ²	1.5 rad/s
Re-gripping position to outside of the Equator workspace (and in reverse direction)	joint	8–9	5.0 rad/s ²	3.0 rad/s
Pick and place from/to the pallet	linear	9	0.5 m/s ²	0.5 m/s
	joint	9	0.5 m/s ²	0.5 m/s
Pallet to the re-gripping position (and in reverse direction)	joint	9	5.0 m/s ²	3.0 m/s

It is important to highlight that before every measurement session that includes several subsequent measurements, the re-master procedure with a master object is performed in comparative measurements. After the re-master procedure, 25 repetitions of the selected scenario were performed.

One set of measurements consists of three repetitions of nine scenarios for both characteristics for the Magnet object and characteristic 100 for the PKR object. For the remaining characteristics of the PKR object (10, 130, and 140), one set consists of two repetitions. Additionally, each scenario consists of 25 measurements, for a total of 2700 dimensional measurements. For each repetition of the scenario, an MSA type-1 analysis was performed.

Please note that the differences among the sets are in the measurement strategy of the Equator. Set 1 represents a basic measurement strategy with the touch-triggering method (TTM). In set 2, the TTM was replaced with the scanning method (SM), and the number of sampling points was increased from 8 to 25 for defining the planes in the length measurements and from 12 to 25 for the spherical geometries. In set 3, the number of sampling points was additionally increased to separate 200 and 400 for the length and spherical geometries (SM+). For the PKR object, only one set of measurements (a combination of TTM and SM) was performed prior measurement strategy and had no significant influence in the case of the measurements of the Magnet object.

The last column of Table 1 indicates the measurement method used for an individual object in a particular scenario, TTM, SM, and SM+ for the Magnet object, and TTM + SM (combination of TTM and SM) for the PKR object.

3.4. Measurement Uncertainty

The extended measurement uncertainty of the measurement system according to the ISO standard 15530-3 is generally written using the (5), where k represent the factor of extended uncertainty, u_{cal} contribution to the uncertainty due to uncertainties of the standard, u_p contribution to the uncertainty due to the measurement procedure, and u_w contribution to the uncertainty due to the measured object itself.

$$U = k\sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2}. \quad (5)$$

Due to the comparative method used, the term for calculating the measurement uncertainty is simplified in

$$U = ku(x) + |\bar{x} - x_{cal}|, \quad (6)$$

where

$$u(x) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

and \bar{x} is the average value of measured values, x_i i-th is measurement, and x_{cal} measured value of master part.

The Equator has specified measurement uncertainty of $\pm 2 \mu\text{m}$, provided that the measured object is inserted within $\pm 1 \text{ mm}$ relative to the inserted master object in the re-master procedure. In combination with the UR5e robot, which has declared positional repeatability of $\pm 0.03 \text{ mm}$, it would mean that the robot error, due to the repeatability error, does not affect the measurement uncertainty of dimensional measurements so that the measurement system uncertainty would be equal to the measurement uncertainty of the Equator.

However, we must be aware that this is not the case in our case. The robot's contribution to the measurement uncertainty is not only due to the error due to positional repeatability but also due to the orientational repeatability and the uncertainty in gripping with the gripper. Last but not least, we must also consider the compliance of the robotic mechanism. Therefore, the general measurement uncertainty based on the specified uncertainties or repeatabilities of the Equator gauge and the UR5e robot is not valid in our case or is not credible data.

3.5. Fixture Design

Special fixtures were designed to fix the measuring objects. The fixtures are designed in such a way that allows robot interventions and satisfactory fixation, and, at the same time, they enable the accessibility of measuring features with measuring probes.

The mandrel of the fixture fits with the outer diameter to the inner diameter of the measuring object. Due to the use of a robot and the robot's error due to the positional and orientational repeatability error, this fit is not entirely tight. Even a small deviation, especially in orientation, causes excessive forces/stresses when inserting the measuring object into the fixture or removing the object from the fixture. A spring ball inside the mandrel is added to ensure better stability of the measuring object inside the fixture.

It is designed on a hexagonal base, which ensures the proper orientation of the fixture in the Equator. The fixture itself is pneumatically mounted inside the Equator working volume via a pneumatic pin and a pneumatic cylinder. Figure 5 represents fixture for measuring the PKR object. An equivalent principle/design is used for a fixture for measuring a Magnet object.

The original design of the fixtures was satisfactory, as the capability factor C_p in scenario 1 for all measured characteristics for all measured objects were significantly higher than the limit value 1.33 (see Section 4), so the design of the fixtures did not change.

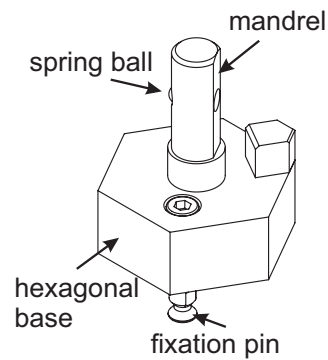


Figure 5. Display of the fixture for the measuring object PKR. The object fits the fixture with its internal diameter, and the spring ball provides additional stability. The fixture is pneumatically mounted in the working area of the Equator via a pin in the pneumatic cylinder.

4. Results

In the experiments, we used comparative measurements (see Section 3), with the main goal to show how any additional robot manipulation influences the measurement process's capability (process variation). Centering was of interest, so only the precision index C_p was used in our study.

We confirmed the normal distribution of the measured data for all measured characteristic codes for both measured objects using Anderson Darling normality test [39] with 95% confidence level. Anderson Darling normality test rejects the hypothesis of normality when the p-value is less than or equal to $p_{min} = 0.05$. Corresponding statistical p-values for all characteristic codes for scenario 1 and scenario 9 are greater than p_{min} and are gathered in Table 3. Additionally, Figure 6 shows the normal probability plot, respectively, of characteristic codes 20 and 30 for a Magnet object, and Figure 7 shows the normal probability plot, respectively, of characteristic codes 10, 100, 130, and 140 for PKR object.

Table 3. Calculated p-values of normality test using Anderson Darling normality test. Values are calculated for all measured characteristic codes for one repetition of scenario 1 and scenario 9.

Object	Ch. Code	Scenario	p-Value
Magnet	20	1	0.910
		9	0.518
	30	1	0.754
		9	0.441
PKR	10	1	0.743
		9	0.639
	100	1	0.226
		9	0.086
	130	1	0.588
		9	0.678
	140	1	0.968
		9	0.717

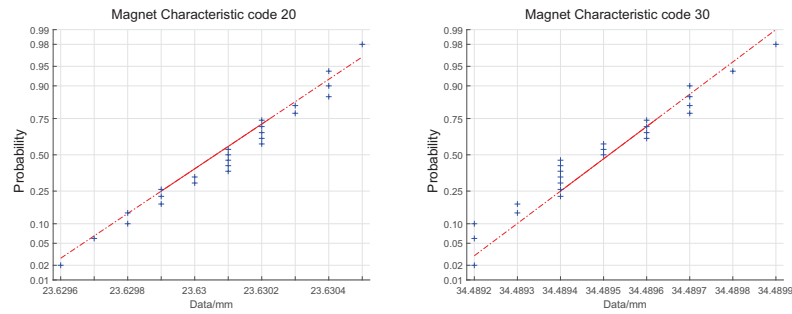


Figure 6. Normal probability plot for measurement codes 20 and 30 of Magnet object for measurements of one repetition for measurement scenario 1 (n = 25). Calculated p-values using Anderson Darling normality test are, respectively, 0.910 and 0.754.

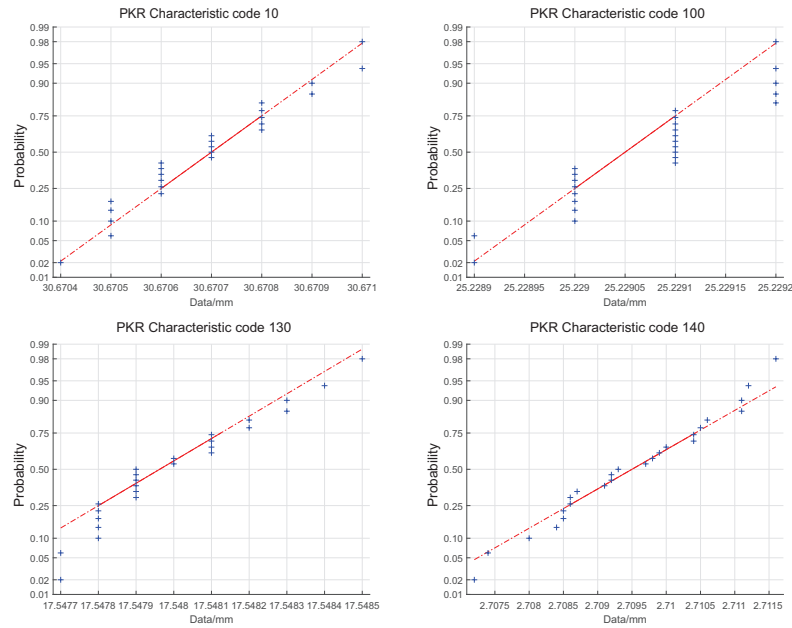


Figure 7. Normal probability plot for measurement codes 10, 100, 130, and 140 of PKR object for measurements of one repetition for measurement scenario 1 (n = 25). Calculated p-values using Anderson Darling normality test are, respectively, 0.743, 0.226, 0.588, and 0.968.

The normal distribution of the measured data allows the use of the capability index C_p .

Results provide the first selected graphs for the Magnet object. The following are selected graphs for the PKR object. For each repetition of the scenario, an MSA type-1 analysis was performed for each characteristic code. The selected statistical characteristics obtained from the MSA study are the capability factor C_p , the range of measurements R , and 6σ (standard deviation) of the individual repetitions. The relationship between C_p and 6σ is described in (2), and the range of measurements R has no mathematical relationship

with the C_p factor and 6σ but, in many cases, suggests a similar trend. Additionally, outliers, which are not seen on σ , can be seen on the R graphs.

4.1. Results for the Magnet object

Figures 8 and 9 present the measurement data calculated by the MSA type-1 analysis separately for the characteristic codes 20 and 30 for the object Magnet. The first row represents the capability factor C_p , the second row depicts the range of measurements R , and the third row shows the 6σ values. The columns represent the individual measurement sets: the first column measurement set 1, the second column measurement set 2, and the third column measurement set 3. In contrast, the last column shows only the average values of the individual sets on a common graph. The red color represents the average values of set 1, the green color represents the average values of set 2, and the blue color represents the average measurements of set 3. The black dotted lines represent individual repetitions of a particular set of measurements. The absolute value of statistical parameters (C_p , R , and 6σ) is not as significant as the decreasing/increasing trend.

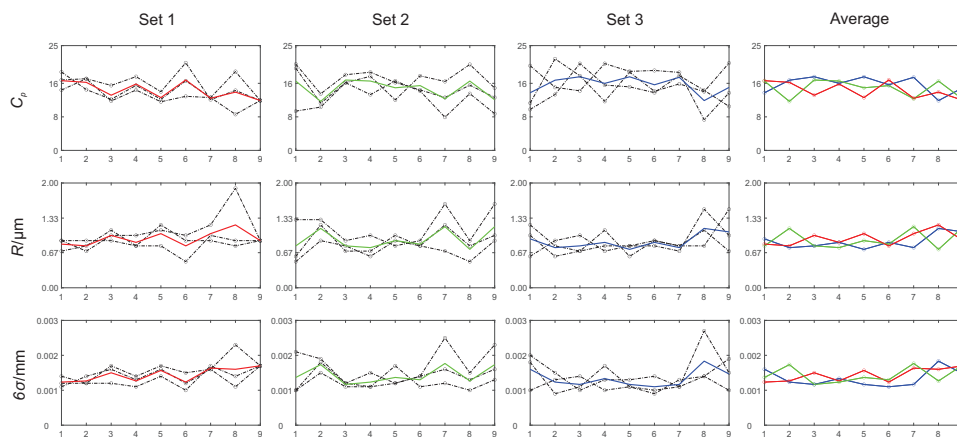


Figure 8. Measurement results for a Magnet object characteristic code 20 (diameter) for all measuring sets and the average. The red line represents the average of set 1, the green line represents the average of set 2, the blue line represents the average of set 3, and the black dotted lines represent individual repetitions of the desired set of measurements. The absolute value of statistical parameters (C_p , R , and 6σ) is not as significant as the decreasing/increasing trend. Scenario numbers appear on the horizontal axis.

4.2. Results for the PKR Object

Figure 10 shows the measurement data calculated for the MSA type-1 analysis for the characteristic codes 10, 100, 130 and 140 for the object PKR. The first row represents the capability factor C_p , the second row shows the range of measurements R , and the third row shows the 6σ values. The first column represents the measurements of the characteristic code 10, the second column represents the measurements of the characteristic code 100, the third column represents the measurements of the characteristic code 130, and the fourth column represents the measurements of the characteristic code 140. The red, green, and blue lines represent the individual measurements, while the black lines represent the average measurement values. The absolute value of statistical parameters (C_p , R , and 6σ) is not as significant as the decreasing/increasing trend.

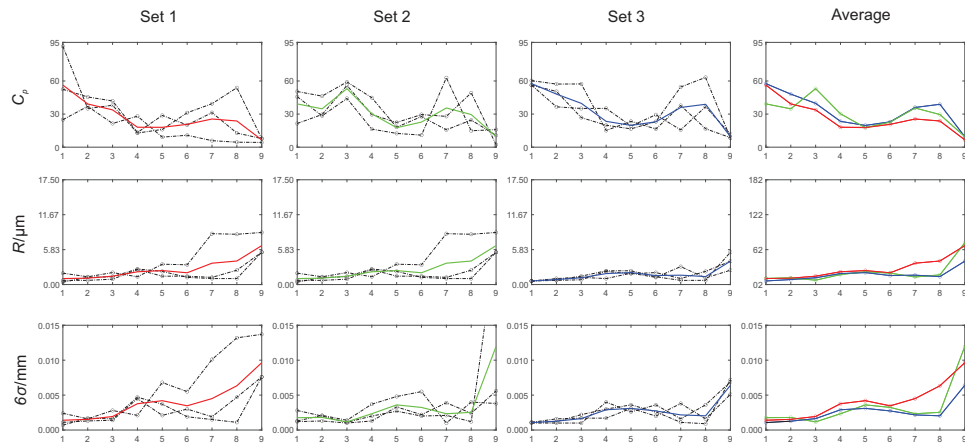


Figure 9. Measurement results for a Magnet characteristic code 30 (height) for all the measuring sets and the average. The red line represents the average of set 1, the green line represents the average of set 2, the blue line represents the average of set 3, and the black dotted lines represent individual repetitions of the desired set of measurements. The absolute value of statistical parameters (C_p , R , and 6σ) is not as significant as the decreasing/increasing trend. Scenario numbers appear on the horizontal axis.

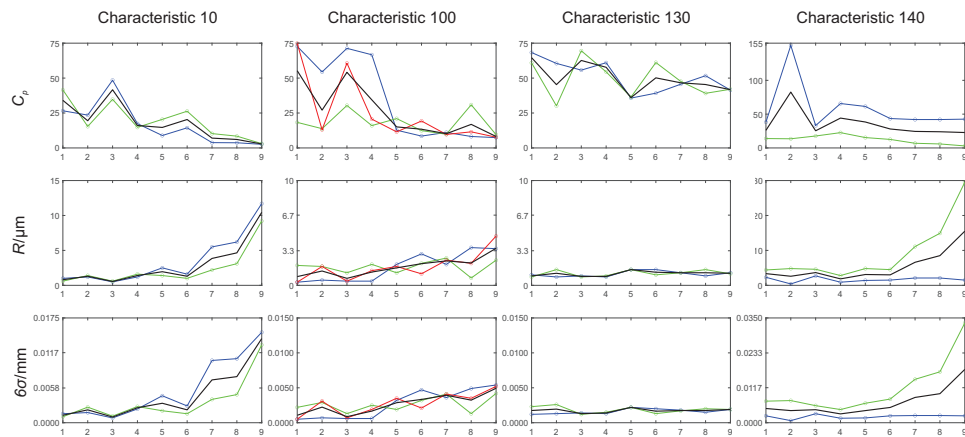


Figure 10. Measurement results for PKR object characteristic code 10 (height), code 100 (height), code 130 (diameter), and code 140 (height). Red, green, and blue lines represent individual measurements, while black lines represent the average measurement values. The absolute value of statistical parameters (C_p , R , and 6σ) is not as significant as the decreasing/increasing trend. Scenario numbers appear on the horizontal axis.

5. Discussion

It should be underlined that the primary goal of our research was not to confirm the ability of the measuring system but to investigate the influence of various robot interventions made with the measured object on the final dimensional measurements. In automated measurements in industry, it is assumed that the measurement uncertainty is much lower than in traditional, manual measurement methods. The main reason for this assumption is

human/operator influence on measurements. In the case of automated measurements, this influential factor is typically reduced or eliminated.

As can be seen from a general observation of Figures 8–10, the robot actions do influence the dimensional measurements. Furthermore, various robot interventions do not have the same impact on the measurement capability of the measurement system. While observing more closely, Figures 8–10 in comparison to Figures 3 and 4, that describe the measurement codes, it turns out that the influence is noticeable in the length measurements (Magnet code 30, PKR codes 10, 100, and 140), while, in the spherical geometries, the influence is less recognizable (Magnet code 20 and PKR code 130).

The results describing the measurement results obtained from the MSA study for the Magnet characteristic code 20 (diameter) are shown in Figure 8. Increasing the degree of the robot's manipulation (moving from scenario 1 to scenario 9) does not influence the dimensional measurements. The C_p , R , and 6σ values do not change significantly from scenario 1 to scenario 9. Furthermore, their values remain similar for all three measurement sets, representing the different measurement methods (last column). Measurement set 1 consists of measurements with the Touch-trigger-based measurement method (red line), set 2 consists of measurements with SM (green line) and an increased number of sampling points, and set 3 consists of measurements with SM+, with an additionally increased number of sampling points (blue line). The black dotted lines represent repetitions of a particular measurement method for all the scenarios.

As is clear from Figure 9, which represents the measurement results for the Magnet characteristic code 30 (height), various robot interventions influence the dimensional measurements. By increasing the degree of manipulation, the C_p value decreases and the values R and 6σ increase from scenario 1 to scenario 9. Similar to the measurements of the Magnet characteristic code 20 are the curves describing C_p , R , and 6σ for the Magnet code 30 for all three measurement sets corresponding to three measurement methods (Figure 9, last column). In all three cases, the C_p value decreases with an increase of the robot's degree of manipulation, which means an increase in the scatter of the measurement data (6σ).

The Magnet object was our primary case study investigating the influence of robot manipulation on dimensional measurements in rectangular and spherical geometries. For this reason, more measuring sets were collected for the Magnet object than for the PKR object. The importance of the PKR object is that there are more added measurement codes. Furthermore, it served for the verification of the previously observed trends. The measurements on the PKR object confirmed the findings of the robot's manipulation influence on the dimensional measurements obtained with the Magnet object.

Figure 10 shows measurements for the PKR object characteristic codes 10, 100, 130, and 140. The characteristic codes 10, 100, and 140 represent length measurements, and, by increasing the robot's degree of manipulation, the trend of the decrease of the C_p value and the increase of R and 6σ can be observed for all three cases. In the case of the PKR object characteristic code 130, which represents the spherical geometry, a decrease of the C_p value is present but, in comparison with the other codes, to a much lesser extent. The R and 6σ values, in this case, do not increase significantly.

The similarity between the measurement results for the different measurement methods is not surprising. A comparable measurement uncertainty for TTM and SM was shown by Bastas [12] for rectangular and spherical geometries. They also showed that the measurement uncertainty decreases with an increasing number of sampling points. In our case, we could not prove a direct relationship between the number of sampling points and the factor C_p , as the differences between the measurement sets, which have different numbers of sampling points, were practically negligible. From a statistical point of view, the measurement methods TTM and SM are equivalent, so, from the process measurements' point of view, SM is more desirable, as it enables shorter measurement cycles.

Due to the Equator measurement device's comparative measurement principle, the absolute ambient temperature did not play a significant role. However, variations do play

a more critical role. If the ambient temperature changes by more than the allowed temperature deviation, it is necessary to perform a re-master procedure, which “re-calibrates” the Equator. A direct relationship between the measurement uncertainty and the magnitude of the change in the ambient temperature was shown by Papananias et al. in Reference [21]. It turns out that, with a larger allowable temperature deviation between individual measurements, the measurement uncertainty increases exponentially and decreases with the implementation of the re-master procedure for relatively small temperature changes. The allowable temperature range in our study was defined as $T_a = T_m \pm 1^\circ$, where T_m is the ambient temperature during the master procedure. Observing individual repetitions within the measurement sets, it can be argued that the ambient temperature was stable, since none of the repetitions triggered a request to perform a re-master procedure.

By comparing Set 1, Set 2, and Set 3 (TTM, SM, and SM+) in Figure 8, as well as in Figure 9, it can be confirmed that different measurement methods and the number of sampling points do not play a significant role in the final dimensional measurements. Based on the used comparative method with frequent re-mastering, it can be stated that the ambient temperature and variation of it also have a minimal impact.

Angular misalignment could be the reason for the increase of the 6σ and R values and the consequent decrease in the value of the factor C_p . The positional misalignment was not noticeable. This would happen by increasing the degree of the robot’s manipulation. An angular misalignment represents the misalignment of the measurement object’s orientation in the fixture between measurements compared to the object’s orientation in the fixture during the re-master procedure. The misalignment error is manifested as a loose fit of the subjects in the pallet, in the re-gripping position and the fixture, as well. Increasing the degree of the robot’s manipulation means more manipulation or more extended robot movements, and above all, an increase in the number of gripping sequences during the measurement process. For example, scenario 1 does not involve any gripping sequence, which means the misalignment error is practically zero. With the added short gripping sequence in scenario 2, a small amount of misalignment error is already present. As evident from Figures 9 and 10, in the case of length measurements (Magnet code 30 and PKR codes 10, 100, and 140), the misalignment error increases with an increase in the degree of robot manipulation, resulting in a decrease of the C_p value.

The cause is also in the axially symmetrical shape of both objects, Magnet and PKR. Due to the axial symmetry, there is no pronounced edge that would easily ensure optimal rotation of the object in the gripper and, consequently, at the Equator’s measuring point. Because of the robot’s repeatability and accuracy errors, and due to the overall gripping situation, one of the fingers comes into contact with the object earlier than the other and not entirely in the intended place, which, combined with the loose fit, result in a small, but unwanted, rotation. A tighter fit would be a potential solution. However, we must be aware of the limitations of tightness. A tight fit requires a very accurate and tight object positioning in the fixture. In the case of a too tight fixation of the object in the pallet (or fixture), the robot with the gripper will not be able to pick the object out of a particular place (the object would slip from the grip). A similar situation applies to the placement of the object. An excessive gripper force would also cause damage or deformation to the subject.

The most significant impact on angular misalignment originates from grasping and tightness in fit to fixture. Further, robot positional and orientational errors increase object-to-fixture interaction forces and, this way, cause increased misalignment.

It is evident that a higher number of grasps of the measured object with a robotic gripper causes a greater scatter of the measurements (scenarios 8 and 9). The same applies to the number of active joints of the robot when performing movements. A lower number of active joints (scenarios 3 and 4) during robot movements means minor scatter of measurement data than movements with a higher number of active joints. Nevertheless, minor changes in the object’s orientation also result in less scatter. Practical suggestions originating from this work are minimization of grasping actions, minimization of active joints, and manipulation and measurement sequence optimization.

For measurements with the Equator, special fixtures were developed to position objects with a robot in the Equator's working area. Fixtures were designed to fit the object's inner diameter, while the spring provides an additional tight fit, as shown in Figure 5. The C_p values for scenarios 1 for all the measurement sets show that the fixtures are suitable for the given characteristics. Furthermore, it is clear that the whole measuring system (robot, fixture, Equator, and other peripherals) is capable in every scenario for all the characteristics of achieving the minimum calculated values of the C_p factor, which were, respectively, 7.3, 2.3, 2.6, 3.1, 7.4, 30.1, and 3.0, for the Magnet characteristics 20 and 30 and PKR characteristics 10, 100, 130, and 140. In the most common cases, the minimum allowable C_p value is set as $C_{p,min} = 1.33$. In the worst case, the calculated capability factor C_p of the measurement system is approximately twice as large ($C_p = 2.3$ for Magnet code 20).

6. Conclusions

Product-quality and process control are gaining influence in the process industry and are an inherent part of Industry 4.0. Due to the increasing daily demands for product quality, the need for ever-improving measuring systems is also growing. In addition, the trend for automated measurements has been present for some time due to the improved reliability of the measurement results compared to the current traditional, manual measurements.

The main reason for measurement automation is the reduction or elimination of human-operator influence on the measurements.

Our research wanted to show that just as the operator impacts on the dimensional measurements, so does the robot manipulation. We divided the robot's tasks into the functions of grip, rotation, translation, etc., which were the basis for the composition of nine different robot scenarios. The robot was used for serving the Equator measuring device.

This study recognized that the effect of the robot's manipulation influence is much more pronounced for length measurements than for spherical geometries. Different measuring methods (TTM and SM, different number of sampling points) were used, which showed similar trends in the measurement data. The independence of using different measurement methods on the final dimensional measurements directly indicates the influence of robot manipulation.

The main influential factor for decreasing the capability factor C_p with an increased degree of robot manipulation was an angular misalignment of the measured part compared to the master part in the re-master procedure. Angular misalignment is manifested as a set of errors due to the robot's inaccuracy and repeatability errors, the loose fit of the measured object in the pallet and the intermediate mechanical fixture (re-gripping), and the error in the gripping phase. The following steps would investigate the impact of the gripping error compared to the robot's accuracy and repeatability.

Author Contributions: Conceptualization, A.Z., R.Č., and M.M.; methodology, A.Z. and M.M.; software, A.Z.; validation, A.Z., R.Č. and M.M.; formal analysis, A.Z.; investigation, A.Z. and M.M.; resources, R.Č. and M.M.; data curation, A.Z.; writing—original draft preparation, A.Z.; writing—review and editing, A.Z., R.Č., and M.M.; visualization, A.Z.; supervision, M.M.; project administration, R.Č. and M.M.; funding acquisition, R.Č. and M.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors acknowledge the financial support from the Slovenian Research Agency (research core funding No. P2-0228). The investment is co-financed by the Republic of Slovenia and the European Union under the Cohesion Fund/European Regional Development Fund/European Social Fund, project GOSTOP - Building Blocks, Tools and Systems for the Factories of the Future, Smart specialization, C3330-16- 529000, 2016-20.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

SPC	Statistical Process Control
CMM	Coordinate Measurement Machine
PTR	Precision to Tolerance Ratio
NDC	Number of Distinct Categories
R&R	Repeatability and Reproducibility
DC	Discrimination ratio
MSA	Measurement System Analysis
ARC	Adaptive Robotic Cell
TTM	Touch-Triggering Method
SM	Scanning Method
SM+	Scanning Method with additionally increased sampling points

References

- Montgomery, D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*, 4th ed.; John Wiley and Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2001.
- Chandra, M.J. *Statistical Quality Control*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2001.
- Krawczyk, M.; Gaska, A.; Sladek, J. Determination of the uncertainty of the measurements performed by coordinate measuring machines. *TM-Tech. Mess.* **2015**, *82*, 329–338. [\[CrossRef\]](#)
- Weckenmann, A.; Knauer, M.; Kunzmann, H. The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements. *CIRP Ann.* **1998**, *47*, 451–454. [\[CrossRef\]](#)
- Colosimo, B.M.; Moroni, G.; Petrò, S. A tolerance interval based criterion for optimizing discrete point sampling strategies. *Precis. Eng.* **2010**, *34*, 745–754. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, S.; Ajmal, A.; Wootton, J.; Chisholm, A. A feature-based inspection process planning system for co-ordinate measuring machine (CMM). *J. Mater. Process. Technol.* **2000**, *107*, 111–118. [\[CrossRef\]](#)
- Lee, G.; Mou, J.; Shen, Y. Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **1997**, *37*, 917–934. [\[CrossRef\]](#)
- Takamasu, K.; Furutani, R.; Ozono, S. Basic concept of feature-based metrology. *Measurement* **1999**, *26*, 151–156. [\[CrossRef\]](#)
- Weckenmann, A.; Eitzert, H.; Garmer, M.; Weber, H. Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology. *Precis. Eng.* **1995**, *17*, 244–252. [\[CrossRef\]](#)
- Kawalec, A.; Magdziak, M. Usability assessment of selected methods of optimization for some measurement task in coordinate measurement technique. *Measurement* **2012**, *45*, 2330–2338. [\[CrossRef\]](#)
- Maresca, P.; Gómez, E.; Caja, J.; Barajas, C.; Berzal, M. Use of coordinate measuring machines and digital optical machines for the geometric characterization of circumference arcs using the minimum zone method. *Measurement* **2010**, *43*, 822–836. [\[CrossRef\]](#)
- Bastas, A. Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe. *Measurement* **2020**, *156*, 107604. [\[CrossRef\]](#)
- Stojadinovic, S.M.; Majstorovic, V.D.; Durakbasa, N.M.; Sibalija, T.V. Towards an intelligent approach for CMM inspection planning of prismatic parts. *Measurement* **2016**, *92*, 326–339. [\[CrossRef\]](#)
- Forbes, A.B.; Mengot, A.; Jonas, K. Uncertainty associated with coordinate measurement in comparator mode. *Laser Metrol. Mach. Perform.* **2015**, *2015*, 146–155.
- Cheng, Y.; Wang, Z.; Chen, X.; Li, Y.; Li, H.; Li, H.; Wang, H. Evaluation and Optimization of Task-oriented Measurement Uncertainty for Coordinate Measuring Machines Based on Geometrical Product Specifications. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 6. [\[CrossRef\]](#)
- Kritikos, M.; Concepción Maure, L.; Leyva Céspedes, A.A.; Delgado Sobrino, D.R.; Hrušický, R. A Random Factorial Design of Experiments Study on the Influence of Key Factors and Their Interactions on the Measurement Uncertainty: A Case Study Using the ZEISS CenterMax. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 37. [\[CrossRef\]](#)
- Kiraci, E.; Palit, A.; Donnelly, M.; Attridge, A.; Williams, M.A. Comparison of in-line and off-line measurement systems using a calibrated industry representative artefact for automotive dimensional inspection. *Measurement* **2020**, *163*, 108027. [\[CrossRef\]](#)
- Kiraci, E.; Franciosa, P.; Turley, G.A.; Olifent, A.; Attridge, A.; Williams, M.A. Moving towards in-line metrology: Evaluation of laser radar system or in-line dimensional inspection for automotive assembly systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2017**, *91*, 69–78. [\[CrossRef\]](#)
- Altinisik, A.; Bolova, E. A comparison of off-line laser scanning measurement capability with coordinate measuring machines. *Measurement* **2021**, *168*, 108228. [\[CrossRef\]](#)
- Lemes, S.; Strbac, D.; Cabaravdic, M. Using Industrial Robots to Manipulate the Measured Object in CMM. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **2013**, *10*, 281. [\[CrossRef\]](#)
- Papananias, M.; Fletcher, S.; Longstaff, A.P.; Forbes, A.B. Uncertainty evaluation associated with versatile automated gauging influenced by process variations through design of experiments approach. *Precis. Eng.* **2017**, *49*, 440–455. [\[CrossRef\]](#)

22. Forbes, A.B.; Papananias, M.; Longstaff, A.P.; Fletcher, S.; Mengot, A.; Jonas, K. Developments in automated flexible gauging and the uncertainty associated with comparative coordinate measurement. In Proceedings of the Euspen's 16th International Conference & Exhibition, Nottingham, UK, 30 May–3 June 2016; European Society for Precision Engineering and Nanotechnology; pp. 111–112.
23. Quality Management in the Bosch Group. *Booklet 10—Capability of Measurement and Test Processes*; Quality Management in the Bosch Group: Geilingen, Germany, 2010. Available online: https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/purchasing_and_logistics/information_for_business_partners/downloads/quality_docs/general_regulations/bosch_publications/booklet-no10-capability-of-measurement-and-test-processes_en.pdf (accessed on 10 July 2021).
24. Sivaji, A. Measurements System Analysis. In *DELTA '06, Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, 17–19 January 2006*; IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2006; p. 393–396.
25. Vocetka, M.; Huňady, R.; Hagara, M.; Bobovský, Z.; Kot, T.; Kryš, V. Influence of the Approach Direction on the Repeatability of an Industrial Robot. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 8714. [[CrossRef](#)]
26. OH, Y.T. Study of Orientation Error on Robot End Effector and Volumetric Error of Articulated Robot. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 5149. [[CrossRef](#)]
27. Kane, V.E. Process Capability Indices. *J. Qual. Technol.* **1986**, *18*, 41–52. [[CrossRef](#)]
28. Amara, S.B.; Dhahri, J.; Samet, S.; Fredj, N.B. Method for improving the measurement system selection depending on part and process precisions. *Measurement* **2017**, *98*, 103–111. [[CrossRef](#)]
29. Wu, C.W.; Pearn, W.; Kotz, S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. *Int. J. Prod. Econ.* **2009**, *117*, 338–359. [[CrossRef](#)]
30. Pearn, W.; Liao, M.Y. Measuring process capability based on CPK with gauge measurement errors. *Microelectron. Reliab.* **2005**, *45*, 739–751. [[CrossRef](#)]
31. Pearn, W.L.; Liao, M.Y. Estimating and Testing Process Precision with Presence of Gauge Measurement Errors. *Qual. Quant.* **2007**, *41*, 757–777. [[CrossRef](#)]
32. Majeske, K.D.; Andrews, R.W. Evaluating measurement systems and manufacturing processes using three quality measures. *Qual. Eng.* **2002**, *15*, 243–251. [[CrossRef](#)]
33. Hsu, B.M.; Shu, M.H.; Pearn, W.L. Measuring process capability based on Cpmk with gauge measurement errors. *Qual. Reliab. Eng. Int.* **2007**, *23*, 597–614. [[CrossRef](#)]
34. Burdick, R.K.; Borror, C.M.; Montgomery, D.C. A review of methods for measurement systems capability analysis. *J. Qual. Technol.* **2003**, *35*, 342–354. [[CrossRef](#)]
35. Knowles, G.; Vickers, G.; Anthony, J. Implementing evaluation of the measurement process in an automotive manufacturer: a case study. *Qual. Reliab. Eng. Int.* **2003**, *19*, 397–410. [[CrossRef](#)]
36. Fu, S.; Kauppila, O.; Mottonen, M. Measurement system escape and overkill rate analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2011**, *57*, 1079. [[CrossRef](#)]
37. Morchower, N.D. Two-location gauge evaluation. *Qual. Prog.* **1999**, *32*, 79–86.
38. Al-Refaie, A.; Bata, N. Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. *Measurement* **2010**, *43*, 842–851.
39. Anderson, T.W.; Darling, D.A. Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Processes. *Ann. Math. Stat.* **1952**, *23*, 193–212. [[CrossRef](#)]