# UNIVERZA V LJUBLJANI FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Jure Rejc

# Hitre in točne brezkontaktne meritve razdalj v industrijskem okolju

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, november 2008



"I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it. But when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind."

"Pogosto pravim, da če znaš tisto, o čemer govoriš, izmeriti in izraziti s števili, potem nekaj veš o stvari. O tistem, česar ne znaš izmeriti in izraziti s števili, pa je tvoje znanje pomanjkljivo in nezadostno."

> Lord Kelvin (William Thomson) Lecture to the Institution of Civil Engineers, 3 May 1883

## Zahvala

Najlepše se zahvaljujem mentorju prof. dr. Marku Munihu, ki me je z nasveti strokovno in kritično vodil skozi izdelavo doktorskega dela. Najlepša hvala tudi vsem sodelavcem v Laboratoriju za robotiko in biomedicinsko tehniko na Fakulteti za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, še posebej mag. Justinu Činklju, univ. dipl. inž. el., za nesebično pomoč in dobrodošle nasvete.

Najlepše se zahvaljujem tudi Francu Kovačiču, univ. dipl. inž. el., direktorju DE Livarna ETA, g. Antonu Prebilu, direktorju DE Termoregulacija, g. Antonu Trpinu, univ. dipl. inž. el., Borisu Čuku, dipl. org. man., Jožetu Svetličiču, univ. dipl. inž. metal., Jerku Močniku, univ. dipl. inž. metal., Marku Hadalinu, univ. dipl. inž. str., Danilu Rejcu, univ. dipl. inž. el., strojnima tehnikoma Miranu Štrusu in Pavlu Obidu ter Igorju Turku, dipl. inž. el. in Bogomirju Rejcu, univ. dipl. inž. el. iz podjetja ETA, ki so mi omogočili delo na dveh zanimivih industrijskih problemih. Zahvaljujem se tudi strojni tehnici Tatjani Rutar iz Orodjarne podjetja ETA, ki je s svojim znanjem veliko pomagala pri opravljanju dimenzijskih meritev s kontaktnim merilnikom. Poleg navedenih se zahvaljujem tudi vsem zaposlenim v proizvodnji podjetja ETA, ki so kakorkoli pomagali pri izvajanju poskusov.

Iskrena hvala vsem domačim, predvsem mami Mariji Rejc, ki je lektorirala moje delo, saj so mi že v času dodiplomskega študija ter nato v času podiplomskega študija stali ob strani in me podpirali.

# Originalni prispevki disertacije

• Razvoj metodologije merjenja in umerjanje sistema za brezkontaktno dimenzijsko merjenje izdelkov iz sive litine z robotom in laserskim triangulacijskim merilnikom razdalje.

Pri razvoju robotskega merilnega sistema smo razvili lastno metodologijo za umerjanje sistema. Tako smo uporabili poseben kalibracijski objekt, ki je bil predhodno izmerjen s certificirano koordinatno merilno napravo. Poleg tega objekta smo za preverjanje pravilnosti delovanja sistema uporabili tudi druge (kontaktne in brezkontaktne) referenčne sisteme, s katerimi smo preverili dinamični odziv uporabljenega laserskega merilnika ter tudi pravilnost uporabljenih kinematičnih enačb. Nenazadnje pa je bila ustreznost delovanja izdelanega sistema preverjena posredno preko čiščenja rešetk z drugim robotom, z upoštevanjem izmerjenih dimenzij čiščene rešetke.

• Hitra izvedba brezkontaktnih dimenzijskih meritev rešetke iz sive litine z robotom in laserskim triangulacijskim merilnikom razdalje.

Razvili smo svoj robotski sistem za merjenje dimenzije rešetke iz sive litine, saj obstoječe rešitve na trgu niso zadostile zahtevam, ki jih je določil naročnik celotnega sistema. Poleg mehanske zgradbe je bila razvita tudi ustrezna programska oprema, tako za zajem izmerjenih koordinat kot tudi za določanje robnih točk rešetke.

• Razvoj metodologije merjenja raztezka membrane v fazi polnjenja diastata s polnilnim oljem.

Reševanje problema merjenja raztezka membrane med samim polnjenjem v proizvodnih prostorih je zahtevalo, da uvedemo povsem svojo metodologijo, saj gre za povsem specifično nalogo. Tako smo s posebnimi metodami preverili delovanje uporabljenega brezkontaktnega merilnika razdalje, namensko izdelanega mikrokrmilniškega sistema ter sistema za brezžično distribucijo izmerjenih podatkov, in to najprej v laboratorijskih razmerah ter predvsem v samem proizvodnem okolju.

• Razvoj točnega merilnega sistema za merjenje raztezka membrane s keramičnim gumbom v fazi polnjenja diastata s polnilnim oljem v mikrometrskem območju.

Specifične razmere v proizvodnji, predvsem pa dejstvo, da smo opremljali obstoječe polnilne naprave, ki niso bile opremljene z nobenim podobnim merilnim sistemom,

so zahtevali razvoj povsem svojega merilnega sistema. Analize razmer in proizvodnih pogojev so zahtevale uporabo brezkontaktne metode. Kljub temu da tržišče ponuja veliko število brezkontaktnih merilnikov, predvsem triangulacijskih, je bilo izredno težko najti takega, ki je fizično ustrezal zahtevam. Poleg velikosti je moral odgovarjati tudi pogoju točnosti, vendar pa smo na tem področju morali uvesti kompenzacijo nelinearnosti meritev, da smo izpolnili zastavljene cilje. Uspešno smo rešili tudi prenos podatkov z rotirajočih polnilnih naprav, in to s povsem svojim mikrokrmilniškim sistemom, katerega načrtovanje je bilo tudi izredno skrbno, pa tudi z uporabo kupljene naprave za brezžični prenos podatkov na centralni nadzorni računalnik.

### • Uporaba polinomov višjih stopenj pri aproksimaciji robov merjenih objektov in kompenzaciji nelinearnosti merilnikov oddaljenosti.

Za zagotovitev vseh zadanih pogojev delovanja obeh brezkontaktnih merilnih sistemov s strani naročnika smo z velikim uspehom uporabili polinome višjih stopenj. Pri določanju dimenzij rešetke iz sive litine smo jih uporabili zato, da smo z njimi aproksimirali dejanski rob rešetke tudi v področju, kjer ni bilo izmerjenih koordinat. Izdelan algoritem je poleg spremenljivega števila aproksimacijskih točk uporabil polinome 4., 6. in lahko tudi 8. stopnje.

Uporabljen brezkontaktni merilnik za merjenje raztezanja membrane diastata med polnjenjem je sicer zadostil pogoju največje dovoljene fizične velikosti, ne pa tudi pogoju točnosti meritev. Težava je bila v nelinearnosti meritev, ki je predvsem posledica uporabe analognih elementov v ojačevalnem delu merilnika. Rešili smo jo s kompenzacijo nelinearnosti, in to s polinomom 4. stopnje, ki se izvaja v samem mikrokrmilniškem sistemu na polnilni napravi. V sami proizvodnji se točnost meritev preverja s kalibracijskim objektom znanih dimenzij. V primeru prevelikih odstopanj je tako potrebno na novo posneti nelinearnost in jo kompenzirati z novim polinomom.

# Kazalo

1	Uvo	rod .			
	1.1	Splošno o meritvah	2		
		1.1.1 Sistem merskih enot			
		1.1.2 Razdalja, dolžina, dimenzija oziroma višina	3		
	1.2	Temeljni pojmi merilne tehnike	4		
	1.3	Cilji	7		
<b>2</b>	Me	rjenje dolžine v industriji	8		
	2.1	Koordinatni merilni stroji	8		
	2.2	Mehanski mikrometri	11		
	2.3	Optični merilniki oddaljenosti	12		
		2.3.1 Triangulacijski optični merilniki oddaljenosti	12		
		2.3.2 Drugi načini merjenja razdalje	16		
		2.3.2.1 Konoskopična holografija	16		
		2.3.2.2 Time-Of-Flight	17		
		2.3.2.3 Laserski radar oziroma LIDAR	18		
	2.4	Industrijski roboti in optični merilniki oddaljenosti	19		
3	Opi	s izdelkov in utemeljitev potrebe po rešitvah	23		
	3.1	Primer A: Merjenje dimenzije rešetk	23		
	3.2	Primer B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem	29		
4	Izbi	ranje in uporabljena strojna oprema	39		
	4.1	Primer A: Merjenje dimenzije rešetk	39		
		4.1.1 Izbira ustrezne opreme	39		

		4.1.2	Realizirani sistem z robotom Epson in laserski točkovni merilnik oddalionosti Micro Epsilon	40
		112	Dinamika aprominiania robou ročetka	40
	4.9	4.1.5	n Di Spremliania polnionia diastata a polnilnim aliam	44
	4.2	Frime	r B: Spreinijanje pomjenja diastata s pominim oljem	40
		4.2.1	Izbira ustrezne opreme	45
		4.2.2	Sistem za merjenje raztezka membran	47
		4.2.3	Dinamika raztezanja membrane med polnjenjem na polnilnih napravah	51
<b>5</b>	Pot	rebna	in izdelana programska oprema	53
	5.1	Prime	r A: Merjenje dimenzije rešetk	53
		5.1.1	Gonilnik za zajem koordinat robota in meritev laserskega merilnika	55
		5.1.2	Program za popravljanje skeniranih podatkov in določanje robnih točk skeniranih objektov	56
	5.2	Prime	r B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem	61
		5.2.1	Program mikroprocesorskega sistema	61
		5.2.2	Glavni nadzorni program	64
6	Met	todolog	gija	66
	6.1	Prime	r A: Merjenje dimenzije rešetk	66
		6.1.1	Pravilnost kinematičnih enačb	66
		6.1.2	Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika ILD 2200-10	68
		6.1.3	Določanje merilnega pogreška z referenčnim kvadrom	69
		6.1.4	Primerjalne meritve na testnih rešetkah	72
	6.2	Prime	r B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem	74
		6.2.1	Določanje nelinearnosti merilnika Keyence PT-165	74
		6.2.2	Stabilnost merjenja fiksne razdalje z merilnikom Keyence PT-165 $$ .	75
		6.2.3	Stabilnost merjenja fiksne razdalje s celotnim merilnim sistemom	76
		6.2.4	Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami sprotne kontrole in preverjanje pravilnosti enačb	77
		6.2.5	Vpliv zaščitnega stekla na meritve s triangulacijskim merilnikom oddaljenosti	79

		6.2.6	Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami končne kontrole	81	
		6.2.7	Meritve raztezka membran s kovinsko ploščico	82	
7	Rez	ultati	meritev	84	
	7.1	Primer	r A: Merjenje dimenzije rešetk	84	
		7.1.1	Pravilnost kinematičnih enačb	84	
		7.1.2	Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika ILD 2200-10	85	
		7.1.3	Določanje merilnega pogreška sistema z referenčnim kvadrom	90	
		7.1.4	Primerjalne meritve na testnih rešetkah	95	
	7.2	Primer	r B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem	98	
		7.2.1	Določanje nelinearnosti merilnika Keyence PT-165	98	
		7.2.2	Stabilnost merjenja fiksne razdalje z merilnikom Keyence PT-165 $$ .	100	
		7.2.3	Stabilnost merjenja fiksne razdalje s celotnim merilnim sistemom	101	
		7.2.4	Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami sprotne kontrole in preverjanje pravilnosti enačb	103	
		7.2.5	Vpliv zaščitnega stekla na meritve s triangulacijskim merilnikom oddaljenosti	105	
		7.2.6	Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami končne kontrole	106	
		7.2.7	Meritve raztezka membran s kovinsko ploščico	115	
8	Skle	epi in ι	ıgotovitve	119	
9	Viri in literatura				
10	Pril	oge		127	
	10.1	Triang	ulacijski laserski merilnik oddaljenosti Micro-Epsilon ILD2200	127	
	10.2	Robot	Epson E2S651	129	
	10.3	Sheme	delovanja celotnega sistema nadzora polnjenja diastatov	130	
	10.4	Pravilı	nost kinematičnih enačb	133	
	10.5	IEC 60	0825-1 varnostni standard za laserje	134	

10.6	Dinamični odziv merilnika ILD 2200-10 - določanje pozicije roba kvadra $\ .$ .	135
10.7	Pogrešek določanja dimenzij zaradi načina delovanja gonilnika v primeru A	136

10.8	8 Clanek sprejet v reviji Robotics and Computer-Integ	grated I	Manufa	actur	ring,	
	2007					. 138

# Slike

1.1	Sedem osnovnih merskih enot		
1.2	Osnovna shema merjenja	5	
2.1	Serijski koordinatni merilni stroj	9	
2.2	Paralelni koordinatni merilni stroj	9	
2.3	Levo: kontaktna merilna konica, desno: laserska merilna "konica" $\hdots$	10	
2.4	Najpogosteje uporabljeni izvedbi mehanskih mikrometrov	11	
2.5	Difuzni odboj vpadnega žarka oziroma svetlobe	13	
2.6	Dva tipa triangulacijskih merilnikov oddaljenosti	13	
2.7	$\operatorname{PSD}$ in CCD tipa sprejemnika ter način določanja pozicije žarka na njiju $% \operatorname{PSD}$ .	14	
2.8	Napačne meritve triangulacijskih merilnikov razdalje v različnih situacijah	15	
2.9	Merilnik merjenja razdalje na principu konoskopične holografije $\ .\ .\ .\ .$	16	
2.10	Princip delovanja "Time-Of-Flight" merilnikov	17	
2.11	Princip delovanja LIDAR merilnikov	18	
2.12	Industrijski robot s kontaktno konico kot koordinatni merilni stroj $\ . \ . \ .$	19	
2.13	Industrijski robot z nameščenim 2D merilnikom	21	
2.14	Komercialni triangulacijski merilnik razdalj z enim izvorom laserske linijske svetlobe in dvema CCD kamerama	22	
2.15	Princip naprednega varjenja s podatki neposrednih meritev	22	
3.1	Dvojna rešetka za plinski štedilnik	23	
3.2	Pozicija kontaktno izmerjenih točk	24	
3.3	Pozicija tipanja koordinate na rešetki	25	
3.4	Primerjava izmerjenih točk (rdeči krogi) z referenčnimi (modri krogi) $\ .$	25	
3.5	Absolutni pogrešek med ekstremnimi vrednostmi koordinate v posamezni točki	26	

3.6	Standardni odklon vseh 30 kontaktno izmerjenih rešetk v posamezni točki . 2		
3.7	Porazdelitev razlik glede na povprečno vrednost koordinate toč k $\ldots\ldots$ 2		
3.8	Mehanski termostat	29	
3.9	Sklop treh komponent, imenovan diastat	29	
3.10	Sestava mehanskega termostata in način delovanja	30	
3.11	Dvostopenjska regulacija temperature mehanskega termostata $\ .\ .\ .$ .	30	
3.12	Levo: membrana s keramičnim gumbom; desno: membrana s kovinsko ploščico	31	
3.13	Slaba raztezna karakteristika diastata	32	
3.14	Rotirajoča polnilna naprava	34	
3.15	Rezultati statistične kontrole hoda nazaj za diastat $715\text{-}601$ v letu $2006$	36	
3.16	Rezultati statistične kontrole hoda nazaj za diastat 715-601 z grupiranjem membran v prehodu iz leta 2006 v leto 2007	37	
3.17	Idealna normalna porazdelitev hoda nazaj, k čemer je potrebno težiti $\ .$ .	38	
4.1	Robot, laserski točkovni merilnik oddaljenosti in nosilna miza	41	
4.2	Skeniran rob rešetke, njegova matematična aproksimacija in dvižni čas $~$ .	44	
4.3	Polnilna naprava, lepo vidne polnilne glave in vstavljena čutila diastatov $% \left( {{{\bf{n}}_{{\rm{s}}}}} \right)$ .	45	
4.4	Merjenje raztezka membrane z laserskim mikrometrom in referenčnim objektom	46	
4.5	Merilni sistem Keyence: krmilnik PT-A160 in merilna glava PT-165	47	
4.6	Frekvenčni odziv merilnika Keyence PT pri nastavljenem stikalu na 1 ${\rm ms}~$ .	48	
4.7	Vezje mikroprocesorskega sistema	49	
4.8	V petje merilnika Keyence in membrane na polnilni napravi Brückne r $\ .$	50	
4.9	Polnilna karakteristika, opisana s sistemom 2. reda	51	
5.1	Vezalna shema in princip delovanja merilne celice	54	
5.2	Časovni potek zajemanja vrednosti sprememb enkoderja $\ .\ .\ .\ .\ .$	56	
5.3	Algoritem za določanje robnih točk iz skeniranih podatkov	57	
5.4	Primer napake pri skeniranju profila rešetke	58	
5.5	Matematična aproksimacija levega in desnega roba rešetke	59	

5.6	Trije deli programa v mikroprocesorju Atmel Mega 8 $\ldots$	62		
5.7	Uporaba in delovanje Timer/Counter-jev			
5.8	Okno glavega nadzornega programa			
5.9	Okno za preverjanje merilnega pogreška merilnikov Keyence 65			
6.1	Skica sistema za preverjanje preračunov koordinat z mikrometrom	66		
6.2	Skica sistema za preverjanje preračunov koordinat s sistemom Optotrak $\ .$	67		
6.3	Sistem za določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika ILD 2200-10 $$ .	68		
6.4	Referenčni kvader, gumijast trak in trajektorija skeniranja	69		
6.5	Uporabljen referenčni kvader, gumijast trak in trajektorija skeniranja $\ .\ .$	71		
6.6	Začrtana pot gibanja robota z merilnikom	73		
6.7	Mehanski sistem za določanje nelinearnosti merilnega sistema membrane s keramičnim gumbom	74		
6.8	Sistem za merjenje stabilnosti razdalje	76		
6.9	Merjenje stabilnosti meritev razdalje z vsemi komponentami, nameščenimi na polnilni napravi	77		
6.10	Nosilec za merilnik in membrano, vpet na polnilno napravo	78		
6.11	Uničeni leči merilnika Keyence zaradi vpliva polnilnega olja	80		
6.12	Sprememba poti žarka zaradi vpliva loma svetlobe skozi steklo	80		
6.13	Sistem za določanje nelinearnosti z dodanim steklom	81		
6.14	Mehanski sistem za določanje nelinearnosti merilnega sistema membrane s kovinsko ploščico	83		
6.15	Mehanski sistem za določanje nelinearnosti merilnega sistema membrane z nagnjeno kovinsko ploščico	83		
7.1	Odziv laserskega merilnika ILD2200-10 na stopničast rob kvadra	86		
7.2	Napaka v obliki luknje laserskega merilnika ILD2200-10 v bližini roba kvadra	87		
7.3	Hitrost spremembe nivoja signalov napake	87		
7.4	Koordinata roba kvadra na nepobarvani strani	88		
7.5	Koordinata roba kvadra na pobarvani strani	89		
7.6	Pogrešek izdelanega sistema na nepobarvani strani kvadra pri hitrosti 20 mm/s	90		

77	Pogroček izdolanoga sistema na poharvani strani kvadra pri hitrosti 20 mm/s. 0	1
7.0		L
(.8	mm/s	2
7.9	Pogrešek izdelanega sistema na pobarvani strani kvadra pri hitrosti 50 mm/s $92$	2
7.10	Absolutni pogrešek med mejnimi vrednostmi koordinate v posamezni točki 96	3
7.11	Standardni odklon vseh 42 kontaktno izmerjenih rešet k ${\bf v}$ posamezni točki . $96$	3
7.12	Porazdelitev pogreškov glede na povprečno vrednost koordinate točk 97	7
7.13	Nekompenzirana merilna karakteristika merilnika Keyence PT-165 98	3
7.14	Kompenzirana merilna karakteristika merilnika Keyence PT-165 99	)
7.15	Stabilnost merjenja fiksne razdalje v proizvodnih prostorih 100	)
7.16	Stabilnost merjenja fiksne razdalje v proizvodnji s celotnim sistemom 102	L
7.17	Stabilnost merjenja fiksne razdalje v proizvodnji s celotnim sistemom $\ .\ .\ .\ 102$	2
7.18	Meritev številka 7 - celotna polnilna karakteristika diastata	3
7.19	Meritev številka 13 - celotna polnilna karakteristika diastata 104	1
7.20	Primerjava meritev hoda nazaj med izdelanim sistemom in končno kontrolo 104	1
7.21	V kovinsko ohišje s steklom zaprta merilna glava merilnika Keyence $\ . \ . \ . \ 100$	3
7.22	Diastat 715-601, od 1.1.2006 do 31.12.2006, izven glave	7
7.23	Diastat 715-601, od 1.2.2007 do 31.8.2007, izven glave, grupiranje membran $107$	7
7.24	Diastat 715-601, od 1.2.2007 do 31.8.2007, izven glave, grupiranje membran, merilno/regulacijski sistem	3
7.25	Diastat 715-680, od 1.1.2006 do 31.12.2006, v glavi	)
7.26	Diastat 715-680, od 12.6.2007 do 10.10.2007, v glavi, grupiranje membran . 110 $$	)
7.27	Diastat 715-680, od 1.12.2007 do 30.4.2008, izven glave, grupiranje mem- bran skupaj, merilno/regulacijski sistem	)
7.28	Diastat 715-612, od 1.1.2006 do 31.12.2006, v glavi	L
7.29	Diastat 715-612, od 1.2.2007 do 30.9.2007, v glavi, grupiranje membran $~.~.~112$	2
7.30	Diastat 715-612, od 1.12.2007 do 1.3.2008, izven glave, grupiranje membran skupaj, merilno/regulacijski sistem	2
7.31	Diastat 715-697, od 1.1.2006 do 31.12.2006, ročno polnjenje	3
7.32	Diastat 715-697, od 4.2.2008 do 23.5.2008, izven glave, grupiranje membran	1
	skupaj, merino/reguacijski sistem	ŧ

7.33	Primerjava meritev na kovinski ploščici brez njenega naklona $\ldots$ 115		
7.34	Primerjava meritev na kovinski ploščici z njenim naklonom		
7.35	Polnilne karakteristike diastatov z membranami s kovinsko ploščico z izraz- itim prenihajem		
7.36	Keramični gumb z magnetom kot nastavek za membrane s kovinsko ploščico 118		
10.1	Značilnosti laserskega triangulacijskega merilnika oddaljenosti Micro-Epsilon127		
10.2	Shema delovanja laserskega triangulacijskega merilnika oddaljenosti Micro-		
	Epsilon		
10.3	Delovni prostor robota EPSON E2S651		
10.4	Nadzorni računalnik in nanj priključena periferija		
10.5	Komponente regulacijske zanke na eni polnilni napravi		
10.6	Komponente, potrebne za izvajanje in posredovanje meritev na eni polnilni		
	napravi		
10.7	Opozorilne označbe po standardu IEC60825-1		
10.8	Idealno časovno ujemanje in idealno določen rob kvadra		
10.9	Idealno časovno ujemanje, vendar je kvader prekratek za približno $1.5~{\rm ms}$ . 136		
10.10	)Višina in pozicija sta zamaknjeni, zato je kvader predolg za približno 0.2 ms136		
10.11	Kvader je prekratek za približno 1.3 ms		
10.12	2Kvader je predolg za približno 0.7 ms		
10.13	3Kvader je prekratek za približno 2 ms		

# Tabele

4.1	Časovno dogajanje v krmilniku laserskega merilnika	43
6.1	Koordinate merjenih točk s KMS na nepobarvani strani kvadra	70
6.2	Koordinate merjenih točk s KMS na pobarvani strani kvadra $.$	70
7.1	Preverjanje kinematičnih enač b $z$ mikrometrom pri hitrosti 50 mm/s	84
7.2	Preverjanje kinematičnih enač b ${\rm s}$ sistemom Optotrak pri hitrosti 50 mm/s	85
7.3	Skrajna območja pogreškov pri drugih hitrostih in površinah kvadra $\ .\ .\ .$	93
7.4	Ovrednotenje vplivov pogreška glede na opravljene meritve in analize $\ .\ .$	94
7.5	Določitev neovrednotenega pogreška glede na testirane hitrosti $\ .\ .\ .\ .$	94
7.6	Primerjava meritev na kovinski ploščici brez njenega naklona 1	16
10.1	Značilnosti robota EPSON E2S651	29
10.2	Preverjanje kinematičnih enač b $z$ mikrometrom pri hitrosti 10 mm/s $1$	33
10.3	Preverjanje kinematičnih enač b $z$ mikrometrom pri hitrosti 20 mm/s $1$	33
10.4	Preverjanje kinematičnih enač b $z$ mikrometrom pri hitrosti 100 mm/s $\ .$ $\ .$ . 1	33
10.5	Klasifikacija laserskih izdelkov po standardu IEC 60825-1	34
10.6	Koordinata roba kvadra na nepobarvani strani	35
10.7	Koordinata roba kvadra na pobarvani strani	35

## Povzetek

Cilj doktorskega dela je bil razvoj hitrih in tudi točnih meritev razdalje za zahtevno industrijsko okolje. Analize, testiranja in rezultate predstavljamo na dveh povsem različnih industrijskih aplikacijah. Prvi primer opisuje razvoj hitrega brezkontaktnega robotskega merilnega sistema z laserskim merilnikom oddaljenosti za merjenje dimenzije rešetk iz sive litine pred fazo čiščenja z drugim robotom v zahtevnem okolju livarne. Drugi primer pa govori o razvoju točnega brezkontaktnega merilnega sistema za merjenje raztezka membrane diastata v fazi polnjenja diastata s polnilnim oljem v zahtevnem industrijskem okolju, polnem vibracij, olja in izpostavljenosti temperaturnim nihanjem.

V delu najprej na kratko podajamo zgodovino merjenja in nekaj osnovnih pojmov iz merilne tehnike. Sledi pregled najbolj pogostih načinov merjenja dimenzij v industrijskem okolju. Ti so v grobem razdeljeni na kontaktne in brezkontaktne principe, tiste, ki smo jih uporabili tudi sami, pa predstavljamo natančneje, z njihovimi prednostmi in slabostmi.

Celotno tretje poglavje je namenjeno samemu opisu obravnavanih proizvodnih procesov oziroma izdelkov, kjer podajamo tudi glavne razloge za potrebo po uvajanju novih rešitev v proizvodnjo, podkrepljene z nekaterimi meritvami in rezultati. Sledi razlaga izbire uporabljene strojne opreme in tudi razvite ter potrebne programske opreme.

Za boljše spoznavanje merilnih komponent in razvitih merilnih sistemov smo opravili niz meritev, poskusov in analiz: preverjanje uporabljenih kinematičnih enačb robota, določanje dinamike merilnikov in mej merilnega pogreška sistemov, določanje nelinearnosti, temperaturne stabilnosti merilnikov, vpliv zaščitnih komponent za merilne glave in posredno preverjanje meritev z že uveljavljenimi kontrolnimi pristopi v proizvodnji.

Obsežne analize in testiranja so pokazala, da je uporabljena merilna oprema ustrezna, vendar je bilo potrebno vključiti nekaj originalnih rešitev in izboljšav. Pokazali smo tudi, da uporabljeni referenčni kvader z ostrimi robovi, kot objekt za določanje mej merilnega pogreška, ni bil najboljša izbira, saj delovanje napisanega gonilnika za zajem koordinat robota in vertikalnih meritev neposredno vpliva na velikost pogreška. Drugi poskusi so pokazali ustreznost tako hitrega robotskega merilnega sistema z laserskim triangulacijskim točkovnim merilnikom oddaljenosti kot tudi izredno točen merilni sistem za merjenje raztezka membrane diastata s keramičnim gumbom in zato oba sistema izpolnjujeta na začetku zadane cilje. Prvi sistem ni bil vpeljan v proizvodnjo, drugi pa je bil in znatno prispeva k zmanjševanju stroškov proizvodnje.

Ključne besede: robot, rešetka za plinski štedilnik, kontaktni merilnik, triangulacijski optični merilnik oddaljenosti, merjenje dimenzije, raztezanje membrane, polinomi.

## Abstract

The goal of present doctoral thesis is development of fast and very accurate distance measurements in demanding industrial environment. Analysis, testing, and results are shown on two completely different industrial applications. The first is a development of a quick non-contact robotic measurement system with use of a laser distance sensor for gray-iron grates dimensional measurements before their deburring with another industrial robot, located in a foundry. The second example shows a development of a very accurate noncontact distance measurement system for diastat membrane expansion measurement in a dirty industrial environment with plenty of vibrations, dirt and temperature fluctuations.

The text is started with the history of distance measurements and description of a few basic measurement techniques. Follows a review of the most frequently used dimensional sensors in industrial environment. These can be divided into contact and non-contact sensors. All the sensors used are described in details with all their features and drawbacks.

The whole third chapter describes relevant manufacturing phases and products. There are also presented the main reasons for the need of a new approaches and solutions, corroborated with some measurements and results. Follows a detailed description of used and combined hardware and dedicated software.

For acquiring relevant characteristics of measurement components and the developed measurement system as a whole, a set of measurements, tests, and analysis was performed including checking of the kinematic equations of the measurement robot, dynamic response of the sensors, determination of the measurement error range, the linearity of the sensors, the temperature stability of the smaller optical sensor, influence of protection housing on measurement accuracy and indirect comparison of the system performance with the established industrial control procedures.

Extensive analysis and tests indicated that the measuring equipment used met the predefined requirements. Furthermore, it was necessary to implement several original solutions and improvements. It was also shown that use of reference cube with sharp edges was not the best choice for accuracy determination, due to sampling driver operation principle. However, the other measurement results confirmed that the fast robot measurement cell and the very accurate measurement system for membrane extension monitoring correspond to the predefined goals. Unfortunately, the first system was never introduced into production, but the second one brought significant production economic savings.

**Keywords:** robot, gas stove grate, contact coordinate measuring machine, triangular optical sensor, dimensional measurements, membrane expansion, polynomials.

## 1 Uvod

Zahteva po merjenju različnih veličin je stara in se ni spremenila do današnjih dni, ko se zahteve po hitrejših in točnejših meritvah različnih veličin samo stopnjujejo. Definiramo lahko, da je merjenje neke veličine skupek dejavnosti, s katerimi opravimo meritev lastnosti določene nežive ali žive stvari in pri katerem primerjamo neznano vrednost z znano količino iste vrste. Tako nam meritev pove, koliko je naš merjenec dolg, težak, topel. Rezultat merjenja je število, ki pove, kolikšen delež lastnosti izraža izmerjena veličina glede na osnovno mersko enoto. Meritve opravljamo s pomočjo različnih merilnih inštrumentov, odvisno kaj želimo meriti. Zavedati pa se moramo, da izmerjena vrednost ni nikoli enaka resnični, in to zaradi objektivnih ali subjektivnih vplivov [1].

Rdeča nit doktorske disertacije so hitre in točne meritve dimenzij v industrijskem okolju, in to na brezkontaktni način. Namreč, v današnji industrijski proizvodnji je zagotavljanje kvalitete izdelka postalo ključnega pomena za obstoj podjetja in njegovo konkurenčnost na trgu. V proizvodnjo je potrebno uvajati sodobne principe, med katere spadajo tudi nove metode merjenja, ki zagotavljajo vedno hitrejše in točnejše meritve. Uvajanje sodobnih merilnih procesov ne pomeni samo izboljšanja kvalitete izdelka, ampak tudi možnost avtomatizacije in robotizacije proizvodnega procesa ter tudi boljše spoznavanje samega merjenega izdelka oziroma njegovega delovanja. Slednje pa prinese zmanjševanje proizvodnih stroškov in posledično povečevanje konkurenčnosti na trgu. Naše industrijske rešitve merjenja dimenzij oziroma razdalj bomo demonstrirali na dveh primerih.

Prvi primer, v nadaljevanju označen kot primer A, je del večjega projekta, kjer smo realizirali robotsko čiščenje podstavne rešetke za plinski štedilnik, ulite iz sive litine [2]. Način čiščenja rešetke z robotom je temeljil na povsem togem obdelovalnem orodju in ker rešetke istega tipa med seboj dimenzijsko odstopajo, je bilo potrebno le-te pred čiščenjem premeriti ter tako prilagoditi trajektorijo gibanja čistilnega robota. V ta namen smo zgradili hiter merilni sistem, zgrajen iz robota, laserskega merilnika oddaljenosti in ustrezne programske opreme.

Drugi primer, primer B, predstavlja realizacijo merjenja raztezanja membrane kot del sklopa, imenovanega diastat, v fazi polnjenja diastata s polnilnim oljem. Diastat je sestavni del mehanskega termostata, ki ga vsakodnevno uporabljamo kot temperaturni regulacijski element. Pravilna napolnjenost diastata neposredno vpliva na kvaliteto in varnost termostata, primer pa zahteva opravljanje meritev raztezka v področju mikrometrov.

#### 1.1 Splošno o meritvah

V razvoju človeštva ima merjenje (oziroma meritve) zelo pomembno vlogo. Namreč, že preprosta ljudstva so rabila osnovne principe merjenja pri veliko svojih opravilih: gradnji svojih bivališč, oblikovanju obleke in obutve ter predvsem pri trgovanju. Ta dejstva povedo, da je bilo merjenje količin eno izmed zgodnejših odkritij človeštva, dolžina pa ena izmed prvih merjenih količin.

Prvotno trgovanje je potekalo predvsem znotraj vasi in z bližnjo okolico, kjer so za izmenjavo blaga uporabljali neko enoto za merjenje količin. S širjenjem trgovine pa je, zaradi jezikovnih preprek in večjih razdalj, nastala težava zaradi neenotnosti merskih enot. To za trgovanje ni bilo ugodno, zato so se kmalu uvedle merske enote, ki so veljale tudi na širšem področju. Tako je bilo tudi v velikih imperijih, vendar niti Julij Cezar (1. st. pr. n. št.) niti Karel Veliki (742 - 814) nista povsem uspela uvesti poenotenja merskih enot. Z razmahom obrti in trgovine je nuja po enotnih merskih enotah postala potreba, zato je obvezno mersko enoto določil kar vladar in tako rešil zadrego. Na primer, angleški kralj Henrik I (1068 - 1135) je uvedel jard (angleško "Yard") kot razdaljo od nosu do vrha prstov svoje iztegnjene levice [3]. Colo ali palec (angleško "Inch") pa je določil kralj Edvard II (1284 - 1372) tako, da je v vrsto postavil tri ječmenova zrna iz sredine klasa.

Francoska revolucija je na področje merskih enot prinesla preobrat. Leta 1790 je bila ustanovljena komisija [4], ki so jo sestavljali takrat najboljši francoski matematiki in fiziki. Ta komisija je imela nalogo sestaviti nov in enoten sistem merjenja za celoten svet. Delo je trajalo kar 9 let, najprej pa sta bila določeni enoti za dolžino in maso, torej meter in kilogram. Zelo pomembno sprejeto določilo je bilo, da je dovoljeno uporabljati le desetiške mnogokratnike za pretvorbo enot. Prva država, ki je uporabila nov merski sistem, je bila Francija, sistem pa se v večini držav uporablja še danes.

V naših krajih se je sistem pričel uvajati z letom 1872, šele leta 1875 pa je v Parizu 17 držav podpisalo *Metrsko konvencijo* (francosko "Convention du Mètre") in ustanovilo *Mednarodni urad za uteži in mere* [5]. Konvencijo so podpisale tudi ZDA, a jo do danes še niso pričele uporabljati. Po 100 letih od podpisa konvencije je sistem uporabljalo že 43 držav, danes pa 153 držav. Vprašanje enot od leta 1889 ureja *Generalna konferenca za uteži in mere (CGPM)*, pri nas pa je to *Urad RS za meroslovje* v Ljubljani.

#### 1.1.1 Sistem merskih enot

Sistem merskih enot je koherenten sistem, ki ga je sprejela in priporočila *Generalna konferenca za uteži in mere (CGPM)*. Temelji na sedmih osnovnih enotah, s katerimi je mogoče opisati vse fizikalne pojave. Iz njih so izpeljane vse ostale izvedene veličine (Slika 1.1 [5]).

Veličina	Enota	Simbol	Definicija
dolžina	meter	m	Meter je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v časovnem intervalu 1/299.792.485 sekunde. Realizacija metra poteka s pomočjo jodovega stabilizi- ranega helij-neonskega laserja z valovno dolžino 633 nm in ponovljivostjo 3*10 <sup>-11</sup> , čemur je ekvivalentno merjenje Zemljinega srednjega obsega s točnostjo 1 mm. Meter je torej realiziran z naravnim pojavom. Naprava, ki realizira to definicijo, je primarni etalon z določeno negotovostjo.
masa	kilogram	kg	Masa je količina snovi, ki meri upiranje telesa pri pospeše- vanju in vplivu gravitacijskega polja na telo. Kilogram je enak masi mednarodnega prototipa - prakilograma, ki ga hrani Mednarodni urad za uteži in mere (BIPM) v Parizu. Ker je to kilogram po definiciji in se ne veže na noben naravni pojav ali zakonitost, ta prakilogram nima negotovosti.
čas	sekunda	S	Sekunda je trajanje 9 192 631 770 period sevanja, ki ustre- za prehodu med dvema hiperfinima nivojema osnovnega stanja atoma cezija 133. Ralizacija sekunde poteka s pomočjo cezijeve ure, ki ima pogrešek eno sekundo v 300.000 letih.
električni tok	amper	A	Amper je jakost enosmernega električnega toka, ki povzro- ča v vakuumu pri prehodu skozi dva ravna, en meter oddaljena, neskončno dolga, vzporedna vodnika z zanema- rljivo majhnim krožnim presekom silo 2*10 <sup>-7</sup> N na meter dolžine. Realizacija ampera poteka s pomočjo tokovne tehtnice.
termodi- namična temperatura	kelvin	K	Kelvin je enota termodinamične temperature, ki je enaka 273,16 delu termodinamične temperature trojne točke vode. Temperatura trojne točke vode v diagramu stanj ustreza trojnemu stanju, kjer so pri določenem tlaku v ravnovesju vse tri agregatne faze čiste snovi: trdna (led), kapljevinska (tekoča voda), plinska (vodna para). Realizacija termodinamične temperature temelji na trojni točki vode, (izvedeni v posebni celici) fiksne točke ITS.
množina snovi	mol	mol	Mol je tista množina snovi, ki vsebuje toliko delcev, kolikor je atomov v 12 gramih ogljikovega izotopa C-12. Mol ni realiziran neposredno iz definicije, pač pa na različne posredne načine.
svetilnost	kandela	cd	Kandela je svetilnost vira sevanja v določeni smeri, ki oddaja monokromatsko sevanje s frekvenco 540 THz in katerega energijska jakost v tej smeri je 1/683 (W/sr). Realizacija kandele poteka s pomočjo kyrogenskega radiometra, ki primerja učinek segrevanja optičnega sevanja z električno močjo.

Slika 1.1: Sedem osnovnih merskih enot

#### 1.1.2 Razdalja, dolžina, dimenzija oziroma višina

Besede razdalja, dolžina, dimenzija in višina - vse se uporabljajo za opis razdalje med eno in drugo točko v poljubni smeri. Za navpične razdalje je uporabljena beseda višina, v ostalih primerih pa se uporabljajo vse tri, odvisno od opisovane stvari.

Uporaba veličine dolžina je bila za človeka pomembna od pradavnine in predstavlja pomembno področje tudi še danes, tako v vsakdanjem življenju kot tudi v merilno procesni tehniki. Namreč, iz meritev razdalje lahko določimo hitrost merjenega objekta, njegov pospešek, njegovo velikost, obliko, lego v prostoru itn.

Sistem merskih enot (Slika 1.1) določa, da je osnovna enota za merjenje dolžine meter. Ker pa običajno merjene dimenzije variirajo, je enota meter lahko prevelika ali premajhna. Zato osnovni enoti dodamo predpono, ki za desetiško vrednost zmanjša ali poveča vrednost osnovne enote. Tako poznamo naslednje pogoste predpone, ki opisujejo krajše dimenzije od osnovne enote: decimeter (dm = m / 10), centimeter (cm = m / 100), milimeter (mm = m /1000), mikrometer ( $\mu$ m = m / 1000000) itn. Poznamo pa tudi predpone, ki opišejo daljšo dimenzijo od osnovne enote, najpogostejša je kilometer (km = m \* 1000). Omeniti velja, da obstaja tudi dimenzijska enota za opis razdalje, ki nima standardne predpone enoti meter, in ta je svetlobno leto. Svetlobno leto (oznaka sv. l., mednarodna pa ly) je enota za dolžino in predstavlja razdaljo, ki jo svetloba premosti v enem julijanskem letu, v prostoru brez ovir neskončno daleč od gravitacijskih ali magnetnih polj [6]. Po definiciji je svetlobno leto enako 9.4605284 × 10<sup>15</sup> metrov (petametrov), uporabljeno pa je za opis razdalj v vesolju, kjer so razdalje prevelike za uporabo standardnih predpon.

#### 1.2 Temeljni pojmi merilne tehnike

Kot smo že omenili, je merjenje neke veličine definirano kot skupek dejavnosti, s katerimi opravimo meritev lastnosti določene stvari in pri katerem primerjamo neznano vrednost z znano količino iste vrste. Vendar pa nobena meritev ni enaka **resnični vrednosti**, ampak je samo bolj ali manj dober približek. S specialnimi in kvalitetnimi merilnimi inštrumenti se resnični vrednosti približamo. Izmerjeno vrednost teh merilnih inštrumentov imenujemo **prava vrednost**. To pomeni, da ta vrednost ni enaka resnični, vendar jo uporabljamo za ugotavljanje pogreška merilnih inštrumentov oziroma naprav. **Merilni (absolutni) pogrešek - E** je definiran kot razlika med resnično (pravo) in izmerjeno vrednostjo (E =  $x_i - x$ ), **relativni pogrešek - e** pa kot razmerje med absolutnim pogreškom in resnično (pravo) vrednostjo (e =  $\frac{E}{x} \cdot 100$  %). Največjemu, še dopustnemu pogrešku, pravimo **meja pogreška**.

Slika 1.2 [1] prikazuje osnovno shemo merjenja, kjer okolica s svojimi mnogimi vplivi vpliva tako na **merilni objekt** kot tudi na samo **merilno napravo**. S<sub>1</sub> je občutljivost merilnega objekta na vplivne veličine iz okolice in S<sub>2</sub> občutljivost morebitne priključitve same merilne naprave. Ti dve občutljivosti vplivata na to, da je na vhodu v merilno napravo vhodna vrednost x spremenjena za vplivni veličini  $z_1$  in  $z_2$ . Ker pa okolica vpliva tudi na merilno napravo z občutljivostjo S<sub>3</sub>, je izhodna oziroma izmerjena vrednost spremenjena še za vpliv  $z_3$ .



Slika 1.2: Osnovna shema merjenja

Ko je naša želja, da so izmerjene vrednosti zelo točne, je potrebno proučiti množico vplivov pri meritvi. Tako lahko ovrednotimo kakšen **delni pogrešek** in z njegovim upoštevanjem popravimo izmerjeni rezultat. Tovrstni pogrešek imenujemo **sistematski pogrešek**, ki je v enačbi 1.1 označen z  $E_s$ . Zavedati pa se je potrebno, da vseh delnih pogreškov ne moremo ugotoviti in jih tudi kompenzirati. Poleg njih in zaradi neustrezne občutljivosti inštrumenta ter drugih pomanjkljivosti, predvsem pri umerjanju merilne naprave, vedno ostane pogrešek z nedoločenim predznakom, ki ga imenujemo **naključni pogrešek**, z oznako  $E_r$ . Iz enačbe oziroma teorije tudi sledi, da s ponavljanjem meritev lahko izničimo vpliv naključnega pogreška  $(n \to \infty)$ , vendar še vedno ostane sistematski, če ga seveda ne kompenziramo. Neskončnega števila meritev v praksi ne opravljamo, ampak zajamemo določeno število vzorcev  $(x_{i,j})$ , ki jih nato povprečimo, kar je v enačbi 1.1 označeno z  $\bar{x}$ .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (x + E_s + E_{r,j}) x_{i,j} = x + E_s + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} E_{r,j}$$
(1.1)

Iz zapisanega lahko zaključimo, da izmerjena vrednost ni nikoli ena sama, ampak območje vrednosti, kar pa imenujemo **merilna negotovost** (u). Natančnejša definicija pravi, da je merilna negotovost parameter k merilnemu rezultatu in označuje razpršenost vrednosti, ki jih je mogoče z neko verjetnostjo pripisati merjeni veličini in govori o kakovosti merilnega rezultata. Tudi merilno negotovost delimo v dva dela: **merilna negotovost tipa A**  $(u_A)$  in **merilna negotovost tipa B**  $(u_B)$ .

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{1.2}$$

Merilna negotovost tipa A je tip negotovosti, ki jo ugotavljamo s statističnimi metodami, te pa uporabimo na podatkih, pridobljenih s ponavljanjem meritev. Natančneje, je eksperimentalni standardni odklon aritmetične sredine. Merilno negotovost tipa B pa ugotavljamo s pomočjo drugih virov, kot so podatki proizvajalca, izkušnje itn. Skupna negotovost je enaka geometrijski vsoti obeh negotovosti (Enačba 1.2), vsaka pa je določena s standardnim odklonom, zato tudi ime **standardna negotovost** (u).

Na tem mestu je potrebno omeniti tudi, katere so najpogosteje uporabljene statistične metode v merilni tehniki. Kot je že bilo omenjeno, sta najpogosteje uporabljena statistična prijema **povprečna vrednost** oziroma **aritmetična sredina** in **standardni odklon** oziroma **deviacija**. Aritmetična sredina je definirana z enačbo

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x_{i,j}.$$
(1.3)

Standardno deviacijo oziroma odklon (s), ki je tudi merilo za razpršenost, definira enačba

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} (x_{i,j} - \bar{x})}{n-1}}.$$
(1.4)

Iz slike 1.2 razberemo, da na izmerjeno vrednost lahko vpliva tudi merilni inštrument. Pot merjene veličine, gledano s položaja merilne naprave, lahko razdelimo na tri dele: **vhodno veličino, vmesno veličino** in **izhodno veličino**. Pojem vmesne veličine smo vpeljali zato, ker je običajno potrebno vhodni signal, preden ga v neki obliki podamo merilcu, ojačiti ali celo pretvoriti v kakšno drugo obliko. Tako prevladujeta dva postopka, ki se razlikujeta prav v tem, kakšen način preoblikovanja doživi vhodni signal [1]. Kadar izhodna veličina zvezno zavzame katerokoli vrednost znotraj merjenega območja, govorimo o **analognem merilnem postopku**. Merilni postopek, ki smo ga uporabljali tudi sami, imenujemo **digitalni merilni postopek**, kjer neko zvezno fizikalno vrednost **digitaliziramo**. Digitalizacijo v osnovi razdelimo na tri dele: **vzorčenje**, **kvantizacija** in **kodiranje**.

Omembe vredna pojma pri uporabi digitalnih merilnih naprav sta: **ločljivost**, ta pomeni vrednost vhoda, ki ustreza najmanjši spremembi izhodne veličine, kar je pri digitalnih inštrumentih kar **korak kvantizacije (Q)**; **pogrešek kvantizacije** pa se giblje znotraj mej koraka kvantizacije, torej med -Q/2 in +Q/2.

#### 1.3 Cilji

Doktorska disertacija je razdeljena v dva dela. Oba zajemata brezkontaktne meritve oddaljenosti v zahtevnem industrijskem okolju. Prvi del je razvoj hitrega merilnega sistema za objekte večjih dimenzij. Sistem mora izpolnjevati tri osnovne cilje:

- razviti brezkontaktni način za merjenje dimenzije objekta iz sive litine v fazi pred robotiziranim raziglenjem oziroma čiščenjem, časovna omejitev opravljanja meritev na zadostnem številu izmerjenih točk je 1 minuta;
- določiti mejo pogreška razvitega merilnega sistema glede na želeno mejo pogreška  $\pm 0.2 \text{ mm};$
- najti način za matematični opis robov merjenih objektov, saj je brušenje potrebno ravno na mestih, kjer meritve ne podajo dejanske geometrije roba in je potrebno področje čiščenja matematično opisati.

Drugi del doktorske disertacije se osredotoča na razvoj merilnega sistema za spremljanje polnjenja diastatov, kjer je potrebno izpolniti naslednje cilje:

- razviti in izdelati namenski merilni sistem za spremljanje raztezanja membrane diastata s keramičnim gumbom v fazi polnjenja s posebnim oljem z zahtevano mejo pogreška  $\pm 5 \ \mu m$ ;
- izbrati merilnik razdalje, ki bi s svojo majhnostjo, točnostjo in varnostjo za delavce izpolnil zahteve, v nasprotnem primeru pa z uporabo ustreznih metod poskušati njegove karakteristike izboljšati;
- z meritvami in poskusi pokazati, koliko na meritve raztezka in njihov prenos vpliva zahtevno industrijsko okolje; vplive kompenzirati oziroma minimizirati.

# 2 Merjenje dolžine v industriji

V industriji je področje točnih dimenzijskih meritev oziroma koordinatnih meritev eno najpomembnejših področij razvoja. V osnovi lahko principe industrijskega merjenja dimenzij razdelimo v dva dela [7]:

- kontaktni načini merjenja,
- brezkontaktni načini merjenja.

Najpogostejši kontaktni načini [8] izvajanja dimenzijskih meritev, tako avtomatskih kot ročnih, so:

- koordinatni merilni stroji (KMS) s pripadajočo kontaktno konico (Poglavje 2.1),
- mehanski mikrometri (Poglavje 2.2),
- električni potenciometri,
- kljunasta merila.

V razred brezkontaktnih principov merjenja dimenzij oziroma razdalj, ki se najbolj uporabljajo v industriji, pa spadajo:

- optični merilniki oddaljenosti (Poglavje 2.3),
- merilni sistemi z video kamero,
- ultrazvočni, kapacitivni in induktivni merilniki.

Iz teh dveh vej so se razvili tudi kombinirani sistemi [9], kjer brezkontaktni triangulacijski laserski merilnik v kombinaciji s koordinatnim merilnim strojem izboljša merilne karakteristike naprave ali pa je nameščen na manipulator oziroma robot, s čimer povečamo hitrost in merilno območje takega sistema (Poglavje 2.4). V nadaljevanju podajamo podrobnejši opis nekaterih najpogostejših načinov merjenja dimenzij v industrijskih okoljih, ki smo jih uporabili ali spoznali tudi sami.

## 2.1 Koordinatni merilni stroji

Ene izmed točnejših merilnih naprav, ki se uporabljajo v industriji, so koordinatni merilni stroji. Ti s pripadajočo kontaktno konico omogočajo meritve z merilno negotovostjo



Slika 2.1: Serijski koordinatni merilni stroj

 $\pm 1 \ \mu$ m ali celo manj [10, 11], temeljijo pa na serijskih (Slika 2.1) ali paralelnih (Slika 2.2) mehanizmih. Zavedati se je potrebno, da ti merilniki zagotavljajo določeno merilno negotovost le v pogojih, ko je za merjenje na voljo dovolj časa, merjena površina pa mora biti primerna za tipanje z nameščeno tipalno glavo [12]. Koordinatni merilni stroji so običajno veliki in težki, zato ne omogočajo opravljanja hitrih meritev. Poleg tega pa se je



Slika 2.2: Paralelni koordinatni merilni stroj

potrebno s kontaktno konico fizično dotakniti površine merjenca (Slika 2.3, levo), kar tudi upočasnjuje postopek merjenja. Prav tako kontaktni merilniki ne omogočajo merjenja dimenzij objektov, ki so po naravi krhki oziroma mehki. Zaradi teh omejitev se lahko namesto kontaktnega principa uporabi brezkontakten način, kjer se kontaktna konica zamenja z lasersko merilno glavo (Slika 2.3, desno), vendar njihova uporaba še ni množična. Zaradi svoje počasnosti in prevelikih dimenzijskih zahtev se koordinatnih merilnih strojev ne uporablja neposredno v proizvodnem okolju, ampak kot referenčne merilnike v industrijskih laboratorijih.

Poznamo dva načina vodenja teh strojev. Pri prvem merilec s svojo roko premika sistem in se s konico dotika merjenca, rezultat pa je podan preko ustreznega terminala. Koordinatni merilni stroji pa so lahko tudi povsem avtomatske naprave, kjer merilec vodi stroj preko posebne učne naprave ali vnaprej sprogramira gibanje merilnega stroja. Trajektorijo gibanja lahko določimo preko že izdelanih 3D CAD zapisov, kjer lahko neposredno primerjamo dimenzije z načrta in dejanskega izdelka.



Slika 2.3: Levo: kontaktna merilna konica, desno: laserska merilna "konica"

Ker se koordinatni merilni stroji uporabljajo predvsem v industrijskih laboratorijih in zaradi njihovih odličnih merilnih karakteristik, se jih pogosto uporablja tudi kot referenčne naprave za umerjanje ter določanje merilnih pogreškov in negotovosti ter karakteristik drugih merilnih naprav. Zato je potrebno koordinatne stroje redno preverjati, če s svojimi merilnimi karakteristikami, pri določenih pogojih, še ustrezajo specifikacijam oziroma merilni negotovosti proizvajalca ali ne. Način preverjanja in podajanja merilne negotovosti predpisujejo standardi, najpogosteje uporabljena standarda [13] sta ISO10360-2 in VDI/VDE 2617, ki se razlikujeta samo v oznakah rezultata, postopki preverjanja pa so enaki. Poleg tega poznamo še CMMA, ASME B89 in JIS standarde.

VDI/VDE 2617 in ISO 10360-2 [10, 14] določata preverjanje karakteristik s kalibracijskimi kladicami. Najpogosteje se podaja aksialno (U1), planarno (U2) in volumsko (U3) merilno negotovost. Na primer, volumsko opišemo po standardu VDI/VDE 2617 z enačbo

$$U3[\mu m] = \pm (A[\mu m] + B \cdot \frac{L[mm]}{1000}), \qquad (2.1)$$

pri ISO 10360-2 pa z

$$MPE_E[\mu m] = \pm (A[\mu m] + \frac{L[mm]}{K}).$$
 (2.2)

V zgornjih enačbah črka A opisuje merilno negotovost merilne naprave, ko ne merimo ničesar in ta pogrešek lahko smatramo kot sistematski pogrešek, saj ga s ponavljanjem meritev ne odpravimo. Parametri B in L oziroma K pa opisujejo povečevanje merilne negotovosti v odvisnosti od dolžine merjenca.

#### 2.2 Mehanski mikrometri

Za merjenje dimenzij se v industriji množično uporabljajo mikrometri, ki so običajno podkvaste ali cevne oblike, kar prikazuje tudi slika 2.4, na voljo pa so v zelo različnih merilnih območjih. Njihova uporaba temelji na vrtenju držala, s katerim primikamo ali odmikamo konico mikrometra. Ta je običajno izdelana iz železa in kaljena ter brušena, da je njena ravnost čim višja. Ob vrtenju držala se kontaktna konica lahko vrti, obstajajo pa tudi translacijske izvedbe.



Slika 2.4: Najpogosteje uporabljeni izvedbi mehanskih mikrometrov

Naprave se uporabljajo za izredno točne meritve, saj je njihova merilna negotovost manj kot  $\pm 3 \ \mu$ m, merilni rezultat pa je podan digitalno ali ga odčitamo s skale ob držalu. Dandanes mikrometri omogočajo priključitev in branje meritev neposredno z osebnim računalnikom preko ustreznega vodila (RS-232 ali USB), vendar zaradi ročnega vrtenja držala in počasnega posredovanja meritev vseeno ne omogočajo avtomatizacije brez prisotnosti človeka.

#### 2.3 Optični merilniki oddaljenosti

Najpogosteje uporabljeni brezkontaktni merilniki razdalje, dimenzij oziroma oddaljenosti so svetlobni merilniki, ki projicirajo žarek svetlobe na površino merjenca [15]. Svetloba je laserska ali pa tudi ne, vidna ali nevidna človeškemu očesu. Projiciran žarek je lahko v obliki pike, linije, skupek vzporednih oziroma pravokotnih linij ali v obliki kroga, odvisno od potreb. Uporabljamo jih za merjenje in preverjanje pozicije, razdalje, dimenzij, profilov površin, deformacij, vibracij in merjenja nivojev tekočin. Glavna značilnost merilnikov razdalje je delovna razdalja merilnika glede na merjenec, ki je od nekaj milimetrov do nekaj metrov. Najpogostejši načini za izmero razdalje teh merilnikov so:

- triangulacija,
- drugi načini: konoskopična holografija (angleško "Conoscopic holography"), "timeof-flight" metoda, LIDAR (angleško "LIght Detection And Ranging").

#### 2.3.1 Triangulacijski optični merilniki oddaljenosti

Najpogosteje uporabljeni merilniki oddaljenosti, ki smo jih uporabili tudi sami, delujejo na principu optične triangulacije [16]. Merjenje razdalje z uporabo triangulacije izhaja iz geodezije, kjer razdaljo dveh oddaljenih, a vidnih točk, določimo z uporabo triangulacije. Želeno razdaljo določimo posredno preko dveh znanih kotov in ene znane razdalje.

To znanje iz geodetskih meritev s pridom uporabljamo tudi za namene točnejših meritev v sodobnih merilnih napravah. Glavna sestavna dela merilnikov oddaljenosti sta oddajnik in sprejemnik svetlobe. Oddajni element oddaja žarek različnih oblik, ki ga ustrezna leča fokusira na površino merjenca. Žarek se od te površine odbije in gre skozi sprejemno lečo na svetlobni sprejemnik. Sprejeti žarek, recimo v obliki pike, se na sprejemniku premika, če se razdalja med merilnikom in merjencem spreminja.

Tako se razdalja od merilnika do merjenca izračunava posredno preko odboja žarka (Slika 2.5). Odboj od površine merjenca je sestavljen iz zrcalnega in difuznega odboja, razmerje odbojev pa je odvisno od površine merjenca. Zrcalne oziroma svetleče površine predvsem odbijajo zrcalno komponento, mat površine pa razpršeno oziroma difuzno komponento.



Slika 2.5: Difuzni odboj vpadnega žarka oziroma svetlobe

Poznamo različne načine nameščanja sestavnih delov triangulacijskih merilnikov, predvsem oddajnega vira svetlobe in sprejemnega dela. Pozicioniranje elementov je odvisno glede na to ali merimo zrcalne ali mat površine. Na sliki 2.6 je levo prikazan način delovanja merilnikov, ki so namenjeni večjim razdaljam in difuzno odbiti svetlobi na mat površinah, desno pa primer merilnika za merjenje razdalje na zrcalnih površinah in zelo majhnih razdalj. V primeru posedovanja levega tipa merilnika, lahko, po navajanjih proizvajalcev merilnikov, z rotacijo merilnika zagotovimo merjenje tudi zrcalnih oziroma svetlečih objektov.



Slika 2.6: Dva tipa triangulacijskih merilnikov oddaljenosti

Pomemben podatek merilnikov oddaljenosti na triangulacijski princip je t.i. delovna razdalja (angleško "Reference distance"). Ta podatek pove, na kateri oddaljenosti od merilnika se nahaja sredina merilnega območja (angleško "Measuring range"). Proizvajalci podajajo tudi podatke o velikosti svetlobne pike na površini merjenca, ponovljivosti, resoluciji, dinamiki merilnika in linearnosti meritev. Podatek o linearnosti opiše tolerančno območje glede na idealno linijo preslikave meritev, običajno v obliki odstotka celotnega merilnega območja.

Kot vire svetlobe danes najpogosteje uporabljamo laserske vire, predvsem polprevodniške laserje z vidnim ali nevidnim žarkom vidnih valovnih dolžin 650 nm, 670 nm in 690 nm ter nevidnih s 780 nm. Laser (angleško "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation") je vir svetlobe, ki je ozek, z nizko divergenco žarka, ene valovne dolžine in koherentnim žarkom. Poleg laserske svetlobe se uporablja tudi usmerjena svetloba svetlečih diod - LED, predvsem rdečih diod. Prednost uporabe LED diod je v tem, da ne zahtevajo nobenih varnostnih standardov, kar pa ni primer pri uporabi laserskih virov. V letu 2001 [17] je IEC tehnični komite določil razrede laserskih virov (Priloga 10.5) glede na valovno dolžino, oddajne moči in nevarnost za uporabnike, predvsem njihove oči. Določili so naslednje razrede: Class 1, Class 1M, Class 2, Class 2M, Class 3R, Class 3B in Class 4, kjer naraščajoča številka pomeni večjo nevarnost poškodb.



Slika 2.7: PSD in CCD tipa sprejemnika ter način določanja pozicije žarka na njiju
Kot sprejemne elemente se najpogosteje uporablja PSD (angleško "Position Sensitive Device") elemente, vendar pa so vedno pogosteje v uporabi tudi CCD (angleško "Charge Coupled Device") elementi. PSD elementi določajo pozicijo pike na sprejemnem delu s povprečenjem žarka (Slika 2.7, levo), CCD elementi pa položaj pike določijo glede na največjo vrednost intenzitete vpadnega žarka (2.7, desno).

Zaradi preprostega delovanja, preproste zgradbe in odličnih merilnih lastnosti se triangulacijske merilnike oddaljenosti množično uporablja. Vendar zaradi uporabe triangulacije, kot načina za določanje razdalje, ti merilniki ne omogočajo merjenja oddaljenosti na vseh želenih objektih oziroma njihovih oblikah [18, 19]. Največja omejitev teh merilnikov je nezmožnost merjenja globine lukenj in razdalje v bližini robov (Slika 2.8, a), saj pride do prekinitve odbitega svetlobnega žarka. V nekaterih primerih lahko težavo odpravimo s pravilno orientacijo merilnika. Merilniki vrnejo napačno vrednost izmerjene razdalje tudi v primeru, ko žarek pada na različne oblike robov, kot kaže slika 2.8 (b in c). Na isti sliki (d) je narisan primer, ko žarek pade na področje, kjer se površina merjenca spremeni, recimo iz zrcalne oziroma svetleče na mat površino. Tudi v tem primeru lahko pričakujemo napačno izmero razdalje.



Slika 2.8: Napačne meritve triangulacijskih merilnikov razdalje v različnih situacijah

Omeniti velja tudi še nekatere druge izvore merilne napake, kot so končna resolucija sprejemnega elementa, elektronsko filtriranje signalov, kvantizacijska napaka in druge. Literatura navaja tudi napačne meritve, ki so posledica laserskih lis oziroma peg (angleško "Speckle"), ki se pojavijo, ko se koherenten laserski žarek odbije od površine merjenca, katerega površina je hrapava v primerjavi z valovno dolžino laserja [20, 21]. Groba površina merjenca povzroči naključne variacije v dolžini poti žarka, kar povzroči naključne interferenčne vzorce na sprejemnem elementu. Rezultat tega je pika na sprejemnem elementu z veliko šuma, kar povzroči napačno izmero razdalje celo na ravnih površinah.

### 2.3.2 Drugi načini merjenja razdalje

Zaradi omejitev pri merjenju razdalj z uporabo triangulacijskih merilnikov so bili razviti drugi načini merjenja, opis njihovega osnovnega principa delovanja sledi v nadaljevanju.

#### 2.3.2.1 Konoskopična holografija

Slika 2.9 prikazuje način delovanja merilnika [22, 24] na principu konoskopične holografije. Izvor svetlobe, ki je laserski, z valovno dolžino 655 nm v razredu Class 2, projicira žarek



Slika 2.9: Merilnik merjenja razdalje na principu konoskopične holografije

na površino merjenca v obliki pike ali linije. Difuzno odbiti vhodni žarek (angleško "Incident Ray") v določenem kotu skozi polarizator pada na kristal, kjer se razdeli v dva različno hitra žarka. Enega imenujemo običajen (angleško "Ordinary Ray"), drugega pa neobičajen žarek (angleško "Extraordinary Ray") žarek. Ko izstopita iz kristala, obstaja med njima fazna zakasnitev; ta se na sprejemnem elementu CCD kaže v obliki koncentričnih krogov (interferenca), kar imenujemo konoskopična slika (angleško "Conoscopic figure"). Z analizo slike merilnik določi razdaljo objekta od merilnika. Zaradi dejstva, da merilnik analizira večji del difuzno odbitega žarka, omogoča tudi merjenje globljih lukenj [23], njegovo merilno območje in merilne parametre, za razliko od triangulacijskih, pa spreminjamo z menjavo leč, kar je tudi velika prednost. Slabost teh merilnikov pa je dokaj visoka cena v primerjavi s triangulacijskimi.

### 2.3.2.2 Time-Of-Flight

Za merjenje večjih razdalj od nekaj metrov do kilometrov pogosto izbiramo merilnike, ki za merjenje razdalje uporabljajo merjenje časa med oddajo in sprejetjem laserskega impulza svetlobe (angleško "Time-Of-Flight") [15]. Za pravilno delovanje je najpomembnejše, da je elektronsko vezje dovolj hitro, da pravilno izmeri čas leta svetlobe, saj je njena hitrost 299.792.458 m/s. S tega stališča so ti merilniki problematični glede merilne negotovosti, saj proizvajalci navajajo negotovost  $\pm 5$  mm na razdalji 1 m, brez povprečenja, s povprečenjem pa se merilna negotovost nekoliko izboljša.



Slika 2.10: Princip delovanja "Time-Of-Flight" merilnikov

### 2.3.2.3 Laserski radar oziroma LIDAR

Za merjenje večjih razdalj se uporablja tudi merilnike, ki jih imenujemo LIDAR merilniki. Uporabljajo se na področju mobilne robotike za digitalizacijo okolja gibanja [25] in ustvarjanju zemljevidov gibanja ter v izdelavi 3D profilov terena in oceanov [49]. Način delovanja je podoben radarju, ki ga srečamo v letalstvu, vendar se v tem primeru meri fazni zamik amplitudno moduliranega laserskega žarka (Slika 2.11). Slabost merilnikov LIDAR je ta, da vedno vračajo dvomljive rezultate [27], kar je posledica periodično moduliranega signala oziroma merjenja faze.



Slika 2.11: Princip delovanja LIDAR merilnikov

## 2.4 Industrijski roboti in optični merilniki oddaljenosti

Kontaktni in brezkontaktni merilniki oddaljenosti oziroma razdalje imajo svoje prednosti in slabosti; da pa bi izrabili prednosti pristopov, so se razvili kombinirani sistemi. Omenili smo že slabost kontaktnih koordinatnih merilnih strojev zaradi počasnosti opravljanja meritev. Zato so jim namestili brezkontaktni merilnik in tako povečali hitrost odčitavanja merjenih koordinat ter tudi omogočili zvezno merjenje profilov objektov. Tudi s tem pristopom pa še ni možno izvajati hitre meritve, predvsem zaradi počasnosti pogonskih mehanizmov koordinatnih merilnih naprav. Poleg tega imajo koordinatni merilni stroji zelo omejen delovni prostor in tudi niso primerni za delovanje v industrijskih okoljih. Na tem mestu velja omeniti tudi kontaktne merilne sisteme oziroma koordinatne merilne stroje, ki temeljijo na industrijskem robotu z nameščeno kontaktni konico, ki pa niso zelo razširjeni. Prednost takega sistema je v povečani hitrosti tipanja, lažjem programiranju gibanja, ki lahko temelji na CAD modelu, in predvsem v veliko večjem delovnem področju (Slika 2.12).



Slika 2.12: Industrijski robot s kontaktno konico kot koordinatni merilni stroj

Tako so bili razviti brezkontaktni merilni sistemi z ustreznimi merilniki oddaljenosti in industrijskimi roboti. Slednji so že namenjeni rabi v industriji, zato so primerno zaščiteni, imajo velike delovne prostore, omogočajo kompleksne trajektorije gibanja, ki jih programiramo "off-line", njihova ponovljivost izvajanja nalog in togost mehanizmov se pa tudi iz leta v leto izboljšuje. Ti merilni sistemi so lahko fiksni [28], torej robot nosi merjenec, kar zmanjša fleksibilnost sistema, ali pa je merilni sistem pritrjen na robot [29]. Vsak pristop ima prednosti in slabosti, zato je potrebno proučiti naslednje dejavnike [30]:

- merilni pogrešek in merilna negotovost meritev,
- dolgoročna stabilnost merilnega sistema,
- prostorske zahteve aplikacije in masa merjenca,
- robustnost sistema,
- razpoložljiv čas merjenja,
- fleksibilnost merilnega sistema,
- cena sistema,
- preprostost uporabe,
- možnost nesreč in kalibracija sistema.

Ena najpomembnejših postavk meritev je sam merilni pogrešek in merilna negotovost. Fiksno postavljen merilnik je običajno nameščen na poseben nosilec, ki je tipično temperaturno drugače odvisen kot robot, kar vpliva na spremenljive meritve. Vendar pa je tak nosilec lahko bolj robusten in tako bolj tog. Po drugi strani namestitev merilnika na vrh robota pomeni, da se v meritvi upoštevajo vse negotovosti in lezenja robota, kar je velika slabost, saj jih je praktično nemogoče izločiti iz meritve. Prednost nošenja se kaže predvsem v tem, da je merilnik majhen in lahek. Zato lahko uporabimo robote z manjšo nosilnostjo, ki so običajno bolj togi in ponovljivi.

Zelo pomembno je tudi, da pri načrtovanju robotskega merilnega sistema proučimo razpoložljiv delovni prostor in tudi s kakšnimi dimenzijami ter masami merjencev bomo imeli opravka. Pri objektih z večjimi masami je bolje, da robot nosi merilnik, saj je izdelava robotskih prijemal draga in tudi v veliki meri doprinese k skupni obremenitvi robota ter tako pomeni zahtevo po dražjih robotih z večjo nosilnostjo. Poleg tega težkih objektov ne moremo hitro premikati oziroma z njimi hitro manipulirati, kar neposredno vpliva na razpoložljiv čas merjenja ter tudi na fleksibilnost sistema.

Pojem dolgoročne stabilnosti merilnega sistema zajema težave, ki se lahko pojavijo na merilniku zaradi hitrega pospeševanja in zaviranja ter tudi vibracij robota. Zato morajo biti merilniki dovolj robustni in obenem dovolj lahki, če jih uporabljamo na robotih z majhnimi nosilnostmi.

Kljub temu da so roboti mehanizmi, ki se gibajo po napisanem programu, je potrebno upoštevati možnost nesreč. V teh primerih so merilniki na robotu veliko bolj izpostavljeni udarcem in uničenju kot pa stacionarni. Ob morebitnem udarcu merilnika je tega v najboljšem primeru potrebno ponovno kalibrirati, kar pa zahteva uporabo kalibracijskih objektov, postopek pa zahteva določen čas. Običajno je potrebno ponovno kalibrirati tudi robota. V industriji, predvsem v avtomobilski, kjer so objekti običajno veliki in težki, se je uveljavil način opravljanja meritev z robotom, ki nosi merilnik (Slika 2.13). Merilniki so najpogosteje triangulacijski, ki projicirajo žarek različnih oblik, pogosto v obliki linije, običajno z eno CCD kamero. Tak linijski sistem omogoča izvajanje hitrih 2D meritev. Ti sistemi v avtomobilski industriji opravljajo naloge meritev pozicioniranja komponent pri njihovem sestavljanju in tudi kasnejšem nadzoru kvalitete sestavljanja. Ker je merilnik nameščen na robot, lahko z enim robotom, na izbrani poziciji tekočega traku, opravimo več meritev [31] v zelo kratkem času. V strokovni literaturi ni mogoče najti zapisov o teh sistemih, saj so vsi komercialni, njihova cena pa je tudi precej visoka.



Slika 2.13: Industrijski robot z nameščenim 2D merilnikom

Uporaba merilnih robotov je prisotna tudi v drugih vejah industrije, predvsem v jeklarski in livarski, saj so tam deli veliki in težki, zahteve po točnejših dimenzijah pa naraščajo iz dneva v dan. Literatura navaja sistem za 3D meritve dimenzij jeklenih izdelkov kompleksnih oblik [32]. Uporabili so industrijski robot, nanj namestili merilnik z linijskim laserskim izvorom in dve CCD kameri, s katerima se kompenzira sence, v osnovi pa je tak sistem še vedno triangulacijski (Slika 2.14). Avtorji navajajo, da je bilo treba med meritvami na objektih postaviti merilni sistem v 10 do 20 različnih leg. Z referenčnimi objekti, s katerimi so preverjali merilne karakteristike sistema, so dosegli merilno negotovost  $\pm 0.24$  mm.



Slika 2.14: Komercialni triangulacijski merilnik razdalj z enim izvorom laserske linijske svetlobe in dvema CCD kamerama

Zelo razširjeno področje uporabe triangulacijskih merilnikov oddaljenosti je tudi na področju robotskega varjenja [33] in laserskega rezanja materialov z roboti. V aplikacijah varjenja ima robot poleg varilne pištole nameščen tudi 2D merilnik, s katerim preverja dimenzijo in pozicijo špranje, ki jo je potrebno zavariti [34] (Slika 2.15). Lahko pa tak sistem uporabljajo tudi za preverjanje kvalitete varjenja, torej je merilnik nameščen za varilno pištolo. Glede na meritve robotski krmilnik prilagaja moč varjenja in lego varilne pištole. Ker so ti merilniki izpostavljeni visokim temperaturam, jih je potrebno termično zaščititi, vendar so običajno tudi dodatno hlajeni, da temperatura merilnika ne preseže 30°C. Uporaba laserske svetlobe omogoča, da je le-ta dokaj imuna na vpliv varjenja in zunanje svetlobe. Litaratura navaja uporabo valovne dolžine laserja 611.49 nm in uporabo ustreznih ozkih filtrov s pasovno širino 0.99 nm [35].



Slika 2.15: Princip naprednega varjenja s podatki neposrednih meritev

# 3 Opis izdelkov in utemeljitev potrebe po rešitvah

## 3.1 Primer A: Merjenje dimenzije rešetk

Današnja konkurenca na trgu sili proizvajalce k temu, da v svoje proizvodne procese uvajajo nove tehnologije. Med take panoge sodi tudi livarstvo, ki omogoča proizvodnjo izdelkov iz različnih materialov oziroma kovin, kot npr. siva litina in aluminij. Število kosov oziroma ulitkov je običajno zelo veliko, kar jim znižuje prodajno ceno. Sam proces ulivanja pa ni edini, ki povzroča stroške izdelave, saj mu sledi kar nekaj nadaljnjih. Med temi izstopa faza, kjer se ulitkom odstranjuje dele, ki ne pripadajo dejanski geometriji izdelka, ampak so stranski produkt faze ulivanja. Tu prednjači odstranjevanje t.i. dolivkov, to je delov, kjer litina priteka v kalup in t.i. srhov. Ti nastanejo, ko litina nekoliko privzdigne zgornji kalup glede na spodnjega in litina steče v špranjo v t.i. delilni ravnini. Po zagotovilih livarjev in tudi naših izkušnjah med opravljanjem poskusov se srhom ni mogoče izogniti, jih je pa mogoče zmanjšati. Vendar to zahteva zopet investicijo v novo, tehnološko bolj izpopolnjeno fazo ulivanja. Odstranjevanje odvečnih delov v današnjih livarskih procesih, kjer je delo odstranjevanja predvsem ročno, pomeni do 25 % ali več vseh proizvodnih stroškov [36].

Podjetje ETA iz Cerknega ima v svoji lasti tudi livarno, kjer ulivajo različne izdelke, največ pa ulijejo običajnih kuhalnih plošč. Kot material uporabljajo sivo litino, ki je sestavljena



Slika 3.1: Dvojna rešetka za plinski štedilnik

iz ogljika in železa, kjer je ogljika le med 3 % do 4 %, granulacija kremenčkovega peska pa je okrog 0.2 mm. V svoj proizvodni program so leta 2005 sprejeli tudi podstavne rešetke za plinske štedilnike, ki jih imenujejo rešetke. Njihove rešetke so zelo kompleksnih oblik (Slika 3.1), namenjene dvema kuhalnima mestoma, delilna ravnina je na spodnjem robu, dimenzije pa segajo od ( $D \times \tilde{S} \times V \times mm$ )  $552 \times 265 \times 19$  do  $559 \times 305 \times 19$ .

Żelja podjetja ETA Cerkno je bila, da se proces odstranjevanja srhov po fazi ulivanja avtomatizira oziroma robotizira. Študija problema je pokazala, da je siva litina izredno težka za obdelavo, zato so že uveljavljeni postopki, kot recimo uporaba podajnih orodij, neuporabni. Tako smo predlagali in razvili povsem lasten robotski sistem za čiščenje [2], kjer se uporablja povsem togo orodje, trajektorija robota pa bi bila izpeljana iz 3D CAD modela rešetke. Ta model nam je preskrbel naročnik rešetk. Na robot Motoman UP165 smo togo pritrdili električni pogonski motor Elettromeccanica GIORDANO COLOMBO; tip RV 73.2; 24000 vrt/min; 2.2 kW, obdelovalno orodje pa je bil rezkar premera 4 mm pri 8000 vrt/min.

Ulitki oziroma rešetke se po fazi ulivanja ohlajajo in pogoji ohlajanja niso enaki za vse. Posledica tega so dimenzijske razlike med njimi, čeprav k temu prispevajo tudi drugi dejavniki. Da bi ugotovili kakšne so dimenzijske razlike, oziroma ali so takšne, da jih je sploh potrebno upoštevati pri načrtovanju trajektorije čiščenja, smo s koordinatnim merilnim strojem premerili 30 rešetk. Koordinatni sistem smo postavili na sredino rešetke, kjer je njegova X os kazala v smeri daljše stranice. Koordinatni sistem smo določili preko zunanjih stranic rešetke. Na rešetkah smo določili najmanjše potrebno število točk, s katerimi najbolje opišemo dimenzije rešetke. Na sliki 3.2 vidimo postavljene točke, ki jih je bilo 96, vendar je nadaljnja analiza pokazala, da jih lahko uporabimo samo prvih 88. Glede na zaporedno številko smo ločili točke med 1 in 40, kjer nas je zanimala samo X komponenta, in točke med 41 in 88, kjer pa nas je zanimala Y komponenta koordinate.



Slika 3.2: Pozicija kontaktno izmerjenih točk



Slika 3.3: Pozicija tipanja koordinate na rešetki

Meritve smo opravljali s certificirano koordinatno merilno napravo, katere planarna merilna negotovost je podana z enačbo

$$U2[\mu m] = \pm (4[\mu m] + 4.5 \cdot \frac{L[mm]}{1000}), \qquad (3.1)$$

kar pomeni, da je merilna negotovost na daljši stranici rešetke znašala dobrih  $\pm 5 \ \mu$ m. Način merjenja je bil tak, da smo uporabili okroglo tipalno glavo premera 2 mm, gibanje koordinatnega merilnika pa je bilo programirano preko 3D CAD modela rešetke. Vsako točko smo potipali približno 1 mm nad srhom, ta se nahaja na spodnjem robu rešetke. Skica tipanja je na sliki 3.3. Za izmero 88 točk na eni rešetki je bilo potrebno kar 7 minut.



Slika 3.4: Primerjava izmerjenih točk (rdeči krogi) z referenčnimi (modri krogi)



Slika 3.5: Absolutni pogrešek med ekstremnimi vrednostmi koordinate v posamezni točki

Na sliki 3.4 so grafično prikazane kontaktno izmerjene točke glede na referenčne s 3D CAD modela. Referenčne so označene z modrimi krogi, izmerjene pa z rdečimi. Vidimo, da obstajajo odstopanja, ki so zaradi večje razdalje od koordinatnega izhodišča najvidnejša na zunanjih robovih. Izkazalo se je tudi, da je 3D CAD model izdelka nekoliko večji od dejanskih rešetk.



Slika 3.6: Standardni odklon vseh 30 kontaktno izmerjenih rešetk v posamezni točki

Sliki 3.5 in 3.6 kažeta absolutno razliko glede na srednjo vrednost ter standardni odklon med največjo in najmanjšo vrednostjo določene koordinate v posamezni točki. Iz slike, ki prikazuje vrednosti standardnega odklona, vidimo, da je njegovo povprečje okoli vrednosti 0.1 mm, natančneje 0.13 mm. V nekaterih primerih lahko doseže celo vrednost do 0.31 mm. Za slednje obstaja razlaga, kajti večja odstopanja se pojavljajo v točkah 13, 14, 17, 18, 23, 24, 27, 28, 55, 56, 79 in 80, kjer je bilo že med opravljanjem meritev vidno, da so ti deli malenkostno bolj grobi oziroma je bila površina zelo neravna, predvsem pa so ti deli prosti in se zato lahko bolj prosto deformirajo. Tudi slika 3.5 govori o tem, da imajo omenjeni deli rešetke nekoliko bolj neravno površino, saj največja razlika znaša 1.47 mm. Potrebno se je zavedati, da je na teh mestih običajno izrazitejši tudi srh, tako da je te vrednosti potrebno posebej upoštevati. Razlika pri ostalih točkah se giblje okrog 0.5 mm.



Slika 3.7: Porazdelitev razlik glede na povprečno vrednost koordinate točk

Ker se običajno za pokritje večjega dela populacije upošteva trikratni standardni odklon, upoštevamo raztros vrednosti okrog  $\pm 0.3$  mm ali  $\pm 0.4$  mm. Predvidimo lahko, da se največja razlika in standardni odklon ne bosta spreminjala glede serije ulivanja, kar pa ne moremo trditi za celotno dimenzijo rešetke oziroma povprečne vrednosti aktualnih komponent koordinat. Odstotek skrčka pri ohlajanju je namreč odvisen od veliko parametrov in je zelo nepredvidljiv.

Slika 3.7 prikazuje normirano porazdelitev razlik glede na povprečno vrednost v vseh izmerjenih točkah rešetke. Na isto sliko je dodan graf normalne porazdelitve s standardnim odklonom, izračunanim glede na raztros vseh razlik glede na 3D CAD model rešetke, ki znaša 0.13 mm. Primerjava pokaže, da je porazdelitev meritev zelo podobna normalni oz. Gaussovi, ki jo opisuje enačba 3.2. Parametri v enačbi so:

- $\sigma$  ... standardni odklon (0.13 mm),
- $\mu$  ... povprečna vrednost (0 mm zaradi primerjave med vsemi točkami),
- x ... vrednosti napake,
- $P(x) \dots porazdelitev vrednosti.$

$$P(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$
(3.2)

Poleg teh statističnih analiz je bilo opravljenih še nekaj dodatnih analiz, nanašajoč se na referenčni 3D CAD model [2]. Ta je povsem linearno simetričen glede na sredinsko postavljeni koordinatni sistem, kar pa za rešetke ne velja. Zaradi obsežnosti analize teh rezultatov ne podajamo, izkazalo pa se je, da deformacije niso linearne in jih ni mogoče opisati z matematičnim modelom.

Rezultati oziroma zaključki kontaktnih meritev na testnih rešetkah so:

- 3D CAD model je nekoliko večji od dejanskih dimenzij rešetk,
- dimenzijska odstopanja glede na 3D CAD model niso linearna in so nepredvidljiva,
- dimenzijske razlike glede na 3D CAD model so v povprečju okrog 0.5 mm, vendar pa so lahko tudi večje,
- zaradi nepredvidljivega dimenzijskega odstopanja je na rešetki potrebno premeriti vsaj 88 točk,
- vsako rešetko je potrebno pred robotskim čiščenjem premeriti,
- uporaba kontaktne metode je s časovnega stališča neprimerna, zato je potrebno najti ustreznejši način.

## 3.2 Primer B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem

Podjetje ETA Cerkno ima v svojem proizvodnem programu tudi proizvodnjo mehanskih regulatorjev temperature, ki jih imenujemo termostati (Slika 3.8). Srečamo jih na mnogih področjih človeškega bivanja, predvsem v kuhinjah, kopalnicah in napravah za ogrevanje. Glavni sestavni deli termostata so: temperaturni senzor oziroma diastat, stikalo, regulacijska os, električni kontakti in ohišje.



Slika 3.8: Mehanski termostat

Najpomembnejši del za pravilno delovanje mehanskega termostata je sklop, imenovan diastat, vidimo pa ga na sliki 3.9. Le-ta je sestavljen iz čutila, kapilare in membrane, napolnjen pa je z ustreznim polnilnim oljem, ki služi kot toplotno-mehanski vmesnik. Polnilno olje se pod vplivom višanja zunanje temperature segreva in razteza, kar povzroči premike membrane v sistemu diastata. Ko je raztezek dovolj velik, membrana preklopi stikalo, ki odpre oziroma zapre električni tokokrog. Shemo takega sistema prikazuje slika 3.10. Uporabnik želeno vrednost preklopne temperature nastavlja z regulacijsko osjo, lahko pa konstantno preklopno vrednost nastavi že proizvajalec.



Slika 3.9: Sklop treh komponent, imenovan diastat



Slika 3.10: Sestava mehanskega termostata in način delovanja

Delovanje mehanskih termostatov je dvostopenjsko, saj omogoča le vrednosti "Vklop"in "Izklop". Za take sisteme je značilno, da med preklopnima vrednostma obstaja histereza, zato regulirana temperatura oscilira okrog nastavljene vrednosti, kar prikazuje shema reguliranja na sliki 3.11.



Slika 3.11: Dvostopenjska regulacija temperature mehanskega termostata

Glavni sestavni deli diastata so membrana, kapilara in čutilo, vendar pa med diastati obstajajo velike razlike, saj vse komponente lahko nastopajo v različnih oblikah oziroma dimenzijah. Členi so med seboj povezani z lotanjem ali varjenjem.

Vezni člen med membrano in čutilom diastata je cevka, imenovana kapilara. Ta je zelo tanka, z zunanjim premerom 1 mm in notranjim premerom 0.5 mm ter dolga med 470 mm in 1550 mm, kar je tudi najdaljša kapilara diastatov, ki se polnijo na obravnavanih polnilnih napravah Brückner.

Poleg kapilare je izven termostata tudi čutilo, ki predstavlja temperaturni senzor. Zunanji premeri čutil variirajo med 3 mm in 6 mm. Ker se termostati vgrajujejo v različne naprave, je dolžina čutil zelo različna, in to med 73 mm in 201 mm.

Najpomembnejši del diastata je membrana, ki s svojo mehansko zasnovo oziroma zgradbo omogoča pretvarjanje spremembe temperature v linearne raztezke. Vendar mora biti tudi preostali del diastata izdelan po specifikacijah in znotraj toleranc. Tudi membrane so različne, v osnovi pa se razlikujejo glede na premer, ki je od 20 mm do 26 mm. Membrane se razlikujejo tudi v sestavnem delu, ki pritiska stikalo (Slika 3.10), saj poznamo membrane s keramičnim gumbom, kot tudi take s kovinsko sijočo ploščico. Oba primera membran sta prikazana na sliki 3.12. Razlika med njima je v tem, da membrana s keramičnim gumbom že sama vsebuje vzmet, ki skrbi za pravilnost preklapljanja stikala, pri membrani s kovinsko ploščico pa to funkcijo nadomešča listnata vzmet. Vendar ta razlika ne vpliva na delovanje termostata.



Slika 3.12: Levo: membrana s keramičnim gumbom; desno: membrana s kovinsko ploščico

Na polnilnih napravah Brückner se polnijo diastati z enim in drugim tipom membrane ter tudi vse druge možne kombinacije dolžin in premerov kapilar ter čutil. Razmerje napolnjenih diastatov na letnem nivoju je približno 3:1 v korist membran s keramičnim gumbom, zato je naročnik želel, da najdemo rešitev najprej za merjenje raztezka membran s keramičnim gumbom. Omenili smo že, da je za pravilno reguliranje temperature najpomembnejši sklop, imenovan diastat, saj so raztezki membrane izredno majhni. Namreč, pri termostatu v kuhinjski pečici raztezek membrane za 0.01 mm pomeni spremembo temperature za okrog 3°C, kar narekuje izredno natančno izdelavo diastata, predvsem pa mora biti v njem ravno prava količina polnilnega olja.



Slika 3.13: Slaba raztezna karakteristika diastata

Na sliki 3.13 je prikazana karakteristika raztezanja oziroma krčenja membrane diastata v odvisnosti od temperature. Na abscisni osi je temperatura v °C, na ordinatni pa raztezek oziroma hod membrane v milimetrih. Membrana je zasnovana tako, da je raztezek membrane čim bolj linearno odvisen od temperature. Za kvaliteto delovanja termostata je pomemben podatek t.i. temperatura zapiranja, ki jo označujemo s  $T_Z$ , na obravnavani sliki z vrednostjo 25°C. Da termostat ustreza zahtevam kupcev, je proizvajalec postavil teoretično postavko, da mora biti skrček membrane od temperature  $T_Z$  navzdol v območju  $0.05 \pm 0.03$  mm, preostali del 0.02 mm pa deluje kot varnostni faktor. Ta del hoda membrane od temperature  $T_Z$  nazaj proizvajalec imenuje hod nazaj. Hod od temperature  $T_Z$ navzgor pa proizvajalec imenuje hod naprej in predstavlja delovno področje termostata. Obravnavana karakteristika kaže izredno slabo napolnjen diastat, saj je skrček membrane od  $T_Z$  navzdol veliko prevelik in znaša celo 0.17 mm, in to v širšem kontrolnem območju temperature, kot je predpisano. Ker je hod nazaj prevelik, temperatura zapiranja ni več prava. Termostat s takim diastatom je problematičen s stališča kvalitete in varnosti, zato so taki diastati označeni kot neustrezni. Pravilni hodi naprej in nazaj ter zagotavljanje kvalitete izdelka niso težnja samo podjetja ETA Cerkno in kupcev samih. Namreč, na področju bele tehnike, kamor se najpogosteje vgrajujejo mehanski termostati, veljajo določena priporočila oziroma standardi. Ti določajo tako način delovanja naprav in komponent ter tudi načine in pogoje testiranja naprav. Evropski standard EN 60335-1 [37] pravi, da morajo biti gospodinjski aparati in druge naprave zgrajene tako, da v normalnih pogojih delujejo varno in ne povzročajo nevarnosti za uporabnike in okolico, in to tudi v primeru površne uporabe. Ta priporočila pa ne veljajo samo za aparate kot celota, ampak tudi za njihove sestavne dele [38], torej tudi za mehanske termostate in posledično tudi diastate.

Evropski standard EN 14597 [39] na področju kvalitete temperaturnih regulacijskih elementov predpisuje, da je lahko največje odstopanje od nastavljene temperature  $\pm 5$  %, kar pri temperaturi 200°C, recimo v pečici, pomeni tolerančno območje  $\pm 10$ °C. V podjetju ETA Cerkno temu priporočilu zadostijo, saj je njihovo tolerančno območje pri pečniškem termostatu na temperaturi 200°C še ožje in znaša  $\pm 8$ °C. Na tolerančno območje regulacije temperature mehanskega termostata predvsem vpliva izdelava mehanskih delov pa tudi pravilna napolnjenost diastata. Ta ima znatnejši vpliv na mejne temperature delovanja termostata.

Vendar pa imajo kupci ravno pri pečniških termostatih zahtevo, da termostat nikoli ne sme vklopiti, ko je le-ta izklopljen oziroma v poziciji izklopa. Ta zahteva pa je neposredno povezana s pravilno napolnjenostjo diastata, saj če je le-ta preveč napolnjen in temperatura v prostoru pade pod sobno temperaturo (23°C), na recimo 15°C, bi tak termostat vklopil grelec in tako reguliral temperaturo v pečici okrog nižje temperature. To pa je tako s stališča varnosti in ekonomičnosti nedopustno. Tak primer je prikazan na sliki 3.13, vendar tak termostat nikoli ne bi prišel do kupca, saj se jih izloči. Temu se je seveda mogoče izogniti z vgradnjo dodatnih stikal v napravo, vendar to podraži končni izdelek, zato kupci želijo, da to funkcijo prevzame kar termostat. Omenjene zahteve v priporočilih neposredno ni mogoče zaznati, omenja se le priporočilo [40], ki pravi, da mora proizvajalec podati obnašanje regulacijskega elementa v področju sobne temperature, kar v podjetju ETA Cerkno kupcem tudi podajajo.

Omeniti velja tudi, da takih zahtev pri višjih temperaturah od sobne temperature ne srečamo, saj mehanski termostat ni varnostni element, ampak regulacijski element, kot ga definira tudi standard EN 60947-5-1 [41]. Najbolj nazorno to pojasnjuje standard EN60335-2-21 [42], ki pravi, da mora biti bojler, kot zaprt ogrevalni sistem, zgrajen tako, da v normalnem delovanju varnostni ventil ali druga varovalka ne deluje oziroma ne sme delati, za kar pa je neposredno odgovoren kvaliteten regulacijski element, torej mehanski termostat.

V podjetju ETA Cerkno izdelajo na leto izredno veliko število<sup>1</sup> diastatov, kar pomeni tudi veliko dnevno obremenitev. Poleg velikega števila izdelanih diastatov pa je veliko tudi število različnih tipov diastatov, ki znaša nekaj sto. Zaradi tako velike količine izdelanih diastatov se jih večina polni na šestih posebnih rotirajočih napravah (Slika 3.14), imenovanih Brücknerji. Vendar pa je tudi kar nekaj temperaturno zelo občutljivih diastatov, ki jih je potrebno polniti in sklop zapirati ročno. Ta postopek pa je izredno počasen in drag. Zato obstaja želja, da bi se tudi te diastate polnilo na rotirajočih polnilnih napravah.



Slika 3.14: Rotirajoča polnilna naprava

Na rotirajočih polnilnih napravah je princip polnjenja tak, da delavec ročno vstavi vsak diastat v polnilno glavo, in to tako, da vstavi čutilo v posebno odprtino polnilne glave. V tem trenutku je čutilo še odprto, da olje lahko prosto teče v notranjost diastata. Na štirih polnilnih napravah je 48 polnilnih glav, na dveh pa 32. Za polnjenje uporabljajo različna polnilna olja, njihovih karakteristik pa tu ne navajamo. Glava z diastatom rotira v obratni smeri urinega kazalca, najprej v področje grobega vakuumiranja, kjer se preveri vsak diastat in če pušča se ga izloči. Temu sledi faza finega vakuumiranja, nato pa se prične faza polnjenja. V fazi polnjenja je več diastatov naenkrat. Med polnjenjem se membrana razteza do neke končne vrednosti, ki je odvisna od nastavljenega tlaka polnilnega olja. Sledi zapiranje odprtine čutila s posebnimi kleščami. Poudariti moramo, da obstajata dva načina zapiranja. V prvem čutilo ostane v polnilni glavi (zapiranje v glavi), v drugem pa se čutilo iztakne iz glave (zapiranje iz glave) in tako določen čas olje uhaja iz diastata. Slednji način je cenejši, saj omogoča uporabo krajših cevk čutil. Po stiskanju s kleščami sledi še zapiranje z električnim točkanjem in krajšanje predolgih cevk v primeru zapiranja v glavi.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Točna številka je poslovna tajnost.

Iz opisanega sledi, da na kvaliteto napolnjenosti diastata oziroma pravilne  $T_Z$  na polnilnih napravah lahko vpliva le polnilni tlak olja. Dosedanji način dela na napravah Brückner je bil tak, da se je preko enačb<sup>2</sup>, ki so jih v podjetju ETA izpeljali v predhodnih letih, izračunalo začetni polnilni tlak (Enačba 3.3), nato pa preko statistične kontrole diastatov (hod nazaj in naprej) spreminjalo polnilni tlak. Težava tega pristopa je v tem, da se je kontrola opravljala v predolgih časovnih intervalih in je bila lahko narejena že velika škoda, če polnilni tlak ni bil pravi. Ker opravljanje statistične kontrole traja določen čas, je nemogoče skrajšati interval preverjanja preko neke meje, ki je bila okrog 15 do 30 minut. Za boljše razumevanje naj omenimo, da se v tem času na eni polnilni napravi lahko napolni med 400 in 800 diastatov. Na sliki 3.13 vidimo, da je odvisnost raztezka od temperature linearna, to pa velja tudi za tlak v diastatu in raztezek membrane, kar opisuje odvisnost oziroma enačba 3.4:

$$P = f(K_P, F, H_{DS}, V_{KAP}, V_M, V_{\check{C}UT}, T_O, T_Z, K_1, K_2).$$
(3.3)

$$H_M = f(P, K_1, K_2). (3.4)$$

Iz odvisnosti 3.3 in 3.4 izpeljemo odvisnost za hod membrane pri določenih zunanjih pogojih:

$$H_M = f(K_P, F, H_{DS}, V_{KAP}, V_M, V_{\check{C}UT}, T_O, T_Z).$$
(3.5)

Posamezne komponente enačb 3.3, 3.4 in 3.5 pomenijo:

- $H_M \Rightarrow hod membrane (mm),$
- P  $\Rightarrow$  polnilni tlak (bar),
- $K_P \implies \text{faktor povesa membrane pod obremenitvijo } (\frac{mm}{N}),$
- F  $\Rightarrow$  sila obremenitve membrane (N),
- $H_{DS} \Rightarrow$  specifičen hod diastata  $\left(\frac{mm}{\circ C}\right)$ ,
- $V_{KAP} \Rightarrow$  volumen kapilare  $(mm^3)$ ,
- $V_M \Rightarrow$  volumen membrane  $(mm^3)$ ,
- $V_{\check{C}UT} \Rightarrow$  volumen čutila  $(mm^3)$ ,
- $T_O \implies$  temperatura okolice (°C),
- 23  $\Rightarrow$  predvidena sobna temperatura (°C),
- $T_Z \implies$  temperatura zapiranja (°C),
- K<sub>1</sub>  $\Rightarrow$  naklon linearne karakteristike  $\left(\frac{mm}{bar}\right)$ ,
- $K_2 \implies \text{konstanta (mm)}.$

 $<sup>^2 \</sup>mathrm{Enačb}$ v eksplicitni obliki zaradi poslovne tajnosti ne podajamo.

Predstavljene odvisnosti hitro povedo, da je vplivnih parametrov na kvaliteto polnjenja preveč, saj že rahla sprememba zunanje temperature (odprtje okna) vpliva na potreben raztezek med polnjenjem in sistema praktično ni mogoče voditi. To tezo podkrepijo tudi rezultati končne kontrole diastatov, kjer se statistično preverja hod nazaj in hod naprej. To storijo tako, da čutila diastatov vstavijo v kadi z različnimi temperaturami, membrane pa so vpete v mikrometrske merilnike in preko njih odčitavajo njihove raztezke oziroma skrčke membran. Na sliki 3.15 so prikazani statistični rezultati hoda nazaj za tip diastata 715-601 v letu 2006. Vertikalni črtkani črti omejujeta teoretično tolerančno območje hoda nazaj. Vidimo, da je večina diastatov veliko preveč napolnjenih, saj jih ima največ hod nazaj velik 0.10 mm. Zavedati se je potrebno, da se histogram ne konča pri 0.11 mm ampak se, če predvidevamo normalno porazdelitev, konča približno pri 0.20 mm. Predvsem pa je potrebno opozoriti na diastate, ki ležijo skrajno levo. To so tisti, ki so prazni oziroma izredno malo napolnjeni, kar pomeni, da njihov hod naprej in nazaj nista normalna. Težava teh diastatov je v tem, da pri vgradnji v termostat, diastat ne deluje pravilno, zato so taki termostati vrnjeni v popravilo oziroma v zamenjavo s pravilno napolnjenimi. V izogib temu je pristop podjetja ETA takšen, da se v primeru prevelikega števila takih diastatov opravi 100 % končna kontrola vseh diastatov istega tipa in se na ta način preveč slabo napolnjene izloči, kar pa pomeni dodatne stroške proizvodnje. Zato so bili prisiljeni polniti diastate z veliko višjimi tlaki od želenih, saj je take termostate še vedno mogoče ob koncu proizvodnje justirati, vendar pa ima tudi to dejanje določeno zgornjo mejo in posledično povečan obseg popravil.



Slika 3.15: Rezultati statistične kontrole hoda nazaj za diastat 715-601 v letu 2006

Za izboljšanje postopkov polnjenja je naročnik v proizvodnjo uvedel dodatno operacijo po fazi izdelave membran. Pričeli so statistično meriti raztezek membran pri tlaku 3.5 bar, za kar uporabljajo zrak. To storijo tako, da statistično izberejo nekaj membran in jih pritrdijo v posebno napravo, kjer je v merilni mikrometer vpeta membrana, čutilo pa v posebno glavo. Glede na raztezek so jih pričeli grupirati v skupine od A do H oziroma od raztezka 0.06 mm do 0.34 mm, s korakom 0.04 mm. S tem so potrdili, da se membrane razlikujejo glede na serijo uporabljene pločevine, čeprav naj bi bila po specifikacijah enaka. Razlika nastaja tudi glede na različna orodja za izdelavo komponent membrane. Ugotovili so tudi, da membrane iz iste serije pločevine in izdelane z istim orodjem spadajo v eno skupino. Zato so pričeli že pri proizvodnji membran le-te grupirati in označevati, da je že pred postopkom polnjenja na napravah Brückner znano, v katero skupino spadajo. Te oznake so upoštevali pri izračunih polnilnih tlakov. Rezultat statistične kontrole hoda nazaj za tip diastata 715-601 v prehodu iz leta 2006 v 2007 z grupiranjem membran prikazuje slika 3.16.



Slika 3.16: Rezultati statistične kontrole hoda nazaj za diastat 715-601 z grupiranjem membran v prehodu iz leta 2006 v leto 2007

S to dodano operacijo je bil narejen izreden korak naprej, saj se je karakteristika pomaknila v levo. Največ diastatov že leži v bližini teoretične sredine hoda nazaj. Tako so v proizvodnjo vpeljali upoštevanje zelo pomembnega faktorja za kvaliteto polnjenja. Kljub temu je karakteristika še vedno preveč široka in tudi praznih diastatov je bilo še vedno preveč. Nadalje so poskušali uvesti še ožja področja grupiranja membran, vendar se je izkazalo, da proizvodnja ne omogoča izdelave še bolj ponovljivih membran. Rezultati oziroma zaključki predstavljenega postopka polnjenja diastatov s posebnim oljem so:

- izdelava sklopa diastata je zelo kompleksna,
- vplivnih parametrov na kvaliteto polnjenja je preveč,
- dosedanji rezultati končne kontrole kažejo, da bi bilo kvaliteto polnjenja diastatov potrebno izboljšati,
- vpeljano grupiranje membran se je izkazalo kot dobro in ostaja tudi v prihodnje,
- premalo napolnjen diastat pomeni neustrezen hod nazaj in posledično tudi hod naprej, kar zmanjšuje definirano delovno območje termostata,
- slabo napolnjen diastat povzroča nedoseganje definirane temperature zapiranja,
- neustrezen hod nazaj ima odločilen vpliv na varnost reguliranja termostata in končnega uporabnika,
- slabo napolnjen diastat lahko pomeni izmet celotnega termostata, ki ga je potrebno popraviti, to pa pomeni izgubo velikega dela zaslužka,
- $\bullet$  preveč prazni in premalo napolnjeni diastati pomenijo dodatne stroške, saj se zahteva 100 % končna kontrola,
- da bi kvaliteta polnjenja diastatov postala zadovoljiva (Slika 3.17), je potrebno rotirajoče polnilne naprave opremiti z ustreznim merilnim sistemom, s katerim bi spremljali raztezek membran in glede na te meritve hitreje prilagajali polnilni tlak.



Slika 3.17: Idealna normalna porazdelitev hoda nazaj, k čemer je potrebno težiti

## 4 Izbiranje in uporabljena strojna oprema

### 4.1 Primer A: Merjenje dimenzije rešetk

### 4.1.1 Izbira ustrezne opreme

S strani naročnika je bila podana kar ostra zahteva glede najdaljšega časa za opravljanje meritev kot tudi glede zahtevane meje pogreška pri merjenju dimenzij podstavne rešetke za plinski štedilnik pred fazo čiščenja z drugim robotom. V poglavju 2 smo navedli najpogosteje uporabljene merilnike razdalje v industriji, med katerimi smo, za omenjeni problem, izbirali tudi sami. Glede zagotavljanja mej merilnega pogreška bi bil najprimernejši kontaktni način merjenja, z uporabo koordinatne merilne naprave, ki ji je mogoče preko CAD modela definirati trajektorijo merjenja. V poglavju 3, kjer smo opisali predhodne meritve dimenzij rešetk, smo zapisali, da je trajanje meritev na eni rešetki in na zadostnem številu točk trajalo kar 7 minut, kar je občutno predolgo. Po proučevanju različnih možnosti za pohitritev kontaktnega merilnega sistema smo zaključili, da želenega časa merjenja, ki je 1 minuta ali manj, s tem sistemom ni mogoče doseči.

Ker je bil po našem mnenju edini možen in primeren kontaktni sistem le z uporabo koordinatnih kontaktnih strojev, ki je žal prepočasen, smo se pričeli ozirati po brezkontaktnih sistemih. Najbolj idealen brezkontaktni sistem za izmero dimenzij rešetke bi bil z uporabo ene ali morda celo več video kamer. Največja težava merjenja dimenzij objektov z uporabo video kamere je pravilna osvetlitev in tudi dejstvo, da sta si pojma vidno polje in točnost merjenja v nasprotju [43]. Za točne meritve z video kamero se najpogosteje uporablja princip osvetlitve od zadaj, vendar to ni pravilo, kar bi za izmero dimenzij rešetke z lahkoto realizirali. Po trdnem razmisleku je bila za nas nepremostljiva ovira vidnost srhov in dolivkov na sliki oziroma nismo našli odgovora na vprašanje, kaj narediti, da bi dimenzijo rešetke določali nad srhom. Poleg omenjene težave bi z video kamero zajeli sliko z zelo slabim kontrastom med deli rešetke, zaradi velike dimenzije rešetke pa je vprašljiva tudi točnost meritev, ne glede na ločljivost kamere ali več kamer.

Med najbolj pogostimi brezkontaktnimi merilniki razdalje se v industriji pojavljajo optični merilniki oddaljenosti, ki smo jih podrobno opisali že v poglavju 2. Ker so ti merilniki dokaj majhni in z različnimi merilnimi karakteristikami, smo kot za nas najugodnejše smatrali take, ki na površino merjenca projicirajo linijo, vračajo pa profil merjenca. Tako bi za merjenje rešetke potrebovali samo mehanizem za njegovo premikanje, lahko tudi robot. Ker je širina odsekov rešetke lahko tudi 20 mm, smo naleteli na težavo, saj na tržišču ni bilo mogoče najti optičnega linijskega merilnika oddaljenosti, z dovolj velikim merilnim področjem, gledano v smeri X ali Y oziroma v horizontalni ravnini, ali pa je bila horizontalna ločljivost preslaba. Tako smo pričeli razmišljati o uporabi točkovnega laserskega merilnika oddaljenosti, ki bi ga premikal robot. Način merjenja bi bil tak, da robot, brez ustavljanja, premika merilnik nad merjencem, naša naloga pa bi bila zajemati horizontalno X ali Y koordinato robota in vertikalno Z koordinato merilnika. Predhodni testi so pokazali, da je tak način celo primernejši oziroma hitrejši od uporabe linijskih merilnikov, kjer bi merilnik morali ustavljati nad želenim merilnim območjem in počakati določen čas, da se mehanizem robota izniha, nato pa zajeti profil ter nadaljevati do naslednje pozicije.

### 4.1.2 Realizirani sistem z robotom Epson in laserski točkovni merilnik oddaljenosti Micro-Epsilon

Zamišljeni sistem smo realizirali s SCARA 4-osnim robotom Epson E2S651 in točkovnim triangulacijskim laserskim merilnikom oddaljenosti Micro-Epsilon ILD2200-10. Podrobnejše specifikacije o njiju podajamo v Prilogi 10.1 in Prilogi 10.2. Sliko sistema prikazuje Slika 4.1.

Ta robot je v osnovi namenjen za avtomatizacijo sestavljanja delov v industrijskih procesih, kjer s svojo odlično ponovljivostjo in hitrostjo zadošča vsem zahtevam. Ponovljivost doseganja določene horizontalne točke v delovnem prostoru za prvi dve osi je proizvajalec podal s 15  $\mu$ m, za vertikalno Z os z 10  $\mu$ m in za rotacijsko pozicioniranje z 0.02°. Robot ima cilindričen delovni prostor, ki sega od 280 mm do 650 mm.

Robot smo uporabili kot X in Y merilni sistem ter kot nosilec za točkovni laserski merilnik oddaljenosti, kot merilnik koordinate Z. Da smo lahko zadostili pogoju o hitrosti merjenja nismo mogli uporabiti originalne programske opreme, o čemer bo govorilo eno izmed naslednjih poglavij. Tako smo potrebovali tudi kinematični model za prvi dve osi robota. Kinematiko za prvi dve osi opisujeta enačbi 4.1 in 4.2. Vrednost konstante  $d_1$ , to je dolžina prvega segmenta robota, znaša 415 mm, konstante  $d_2$ , to je dolžina drugega segmenta, pa je 235 mm, določil pa ju je proizvajalec v svojih navodilih za uporabo. Spremenljivka  $\vartheta_1$  opisuje rotacijski kot prvega segmenta, spremenljivka  $\vartheta_2$  pa opisuje rotacijski kot drugega segmenta.

$$X = d_1 \cdot \cos \vartheta_1 + d_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) \tag{4.1}$$

$$Y = d_1 \cdot \sin \vartheta_1 + d_2 \cdot \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) \tag{4.2}$$



Slika 4.1: Robot, laserski točkovni merilnik oddaljenosti in nosilna miza

Preslikavo med branimi pulzi enkoderja  $N_1$  za prvo os ter pulzi enkoderja  $N_2$  za drugo os in koti v sklepih opisujeta enačbi 4.3 in 4.4:

$$\vartheta_1(^{\circ}) = \frac{1}{910.\bar{2}} \cdot N_1,$$
(4.3)

$$\vartheta_2(^\circ) = \frac{1}{568.\bar{8}} \cdot N_2. \tag{4.4}$$

Stevilki smo določili tako, da smo uporabili originalen program robota Epson, preko katerega je mogoče spremljati parametre sklepov. Na podlagi zasukov sklepov s korakom 45° in odčitane spremembe pulzov enkoderjev smo izračunali razmerje. Iz predstavljenih enačb smo tako lahko določili tudi teoretično ločljivost zunanjih koordinat ob spremembi enkoderjev za en pulz. Če sta prva dva segmenta popolnoma iztegnjena, potem je zunanja planarna koordinata vrha robota zapisana v obliki točke (650 mm, 0 mm). Če se

v tej poziciji robota v prvi osi spremeni kot sklepa za en pulz enkoderja, to na spremembo koordinate X tako rekoč ne vpliva, Y koordinata pa se spremeni za 0.0125 mm. Če isto storimo z drugo osjo, je sprememba X koordinate ravno tako zanemarljiva, sprememba Y osi pa znaša 0.0072 mm. Sprememba enega pulza v obeh sklepih povzroči spremembo Y koordinate za 0.0197 mm, na koordinato X pa zopet ni vpliva. Iz teh izračunov lahko zaključimo, da je teoretična pozicijska točnost robota izredno dobra. Vendar razni vplivi na mehanske sklope, zračnost ležajev in zračnost zobniških prenosov teoretično točnost poslabšajo, česar pa proizvajalec ne navaja.

Robot Epson ima krmilnik z oznako RC420 v obliki industrijskega osebnega računalnika. Vgrajen ima Intel Celeron 800 MHz procesor, 265 MB delovnega spomina (RAM) in 40 GB trdi disk. Operacijski sistem je Microsoft Windows 2000 Professional.

Za izvajanje brezkontaktnih meritev koordinate Z smo uporabili triangulacijski točkovni laserski merilnik oddaljenosti Micro-Epsilon ILD2200-10. Sistem je sestavljen iz laserske merilne glave in ustreznega krmilnika. Merilno glavo smo na robot namestili preko posebnega aluminijastega nosilca. Laserska merilna glava je prirejena za merilno območje 10 mm oziroma  $\pm 5$  mm, s sredino merilnega območja oddaljeno 35 mm od merilne glave. Proizvajalec podaja ločljivost 0.15  $\mu$ m in linearnost meritev pod  $\pm 0.03$  % na celotnem merilnem območju, kar znaša pod  $\pm 3$   $\mu$ m. Debelina laserskega žarka na sredini merilnega območja je 50  $\mu$ m, na robovih pa 110  $\mu$ m. Kot izvor svetlobe je uporabljen rdeči laser z vidno valovno dolžino 670 nm, ki spada v varnostni razred Class 2 (Priloga 10.5) in največjo močjo 1 mW, sprejemni element pa je CCD.

Krmilnik omogoča uporabniku izbiro povprečenja meritev z različnim številom vzorcev, ničliranje izhodnega signala trenutne oddaljenosti in analogno kot tudi digitalno posredovanje meritev. Analogni izhod je napetostni v območju  $\pm 5$  V, digitalen pa serijski RS-422 oziroma RS-485 s 16-bitnim podatkom in hitrostjo 691.2 kBaud. Za našo aplikacijo smo izbrali analogen izhod, saj ima digitalni nestandardno hitrost. Krmilnik ima tudi dva posebna digitalna TTL izhoda, kot signala napake. Visok POOR TARGET pove, da objekt ni v merilnem območju, visok nivo signala OUT OF RANGE pa nakazuje, da je merjenec zelo na robu merilnega območja. Pri naši aplikaciji nismo uporabili nikakršnega povprečenja izhodnega signala, s pridom pa smo uporabili nazadnje omenjena posebna digitalna signala napake.

Proizvajalec v navodilih za uporabo navaja, da merilnik deluje v realnih ciklih v t.i. "pipeline"načinu [44], ki so:

- 1. Osvetlitev: Polnjenje sprejemnega CCD elementa (meritev).
- 2. Branje: Branje vrednosti iz CCD elementa in pretvarjanje v digitalni zapis.
- 3. Izračun: Izračun meritve in kalibracija z digitalnim signalnim procesorjem (DSP).

Cikel	1	2	3	4
Čas	$100 \ \mu s$	$200~\mu{\rm s}$	$300 \ \mu { m s}$	$400 \ \mu s$
	Osvetlitev N			Izhod N
1. nivo		Branje N	Izračun N	
	(Izhod N-3)			(Osvetlitev N+3)
		Osvetlitev N+1		
2. nivo	Izračun N-2		Branje N+1	Izračun N+1
		(Izhod N-2)		
			Osvetlitev N+2	
3. nivo	Branje N-1	Izračun N-1		Branje $N+2$
	-		(Izhod N-1)	

Tabela 4.1: Časovno dogajanje v krmilniku laserskega merilnika

Krmilnik poda izmerjeno vrednost na začetku vsakega cikla. Analogna vrednost je podana takoj, digitalna pa se prične s prvim začetnim bitom. Vsak cikel traja 100  $\mu$ s (=1/frekvenca zajemanja) pri frekvenci zajemanja 10 kHz. Izmerjena vrednost N je na voljo vsak cikel s konstantnim zaostankom treh ciklov. Tako je zakasnitev med ciklom izpostavljanja in podajanjem rezultata 300  $\mu$ s. Proizvajalec podaja tudi tabelo (Tabela 4.1) dogodkov, kjer si cikli sledijo zaporedno v času in vzporedno v prostoru.

Ker smo uporabili analogni napetostni izhod krmilnika laserskega merilnika, smo potrebovali ustrezno analogno-digitalno pretvorbo. Digitalni izhod AD pretvornika je bil priklopljen na vzporedna (LPT) vrata industrijskega osebnega računalnika robota Epson, za kar smo uporabili kar navaden vzporedni kabel. Ker je bilo na vzporednih vratih prostih še kar nekaj pinov, smo nanje pripeljali digitalna signala napake laserskega merilnika: POOR TARGET in OUT OF RANGE. Uporabljeni AD pretvornik ima oznako MAX197BCNI, proizvajalca Maxim. Deluje na principu zaporednega približevanja. Pretvornik omogoča 12-bitno pretvorbo podatkov, več merilnih območij (0 V do +5 V, 0 V do +10 V, -5 V do +5 V in -10 V do +10 V), čas pretvorbe 6  $\mu$ s in 100 ksps vzorčne frekvence. V našem primeru smo uporabili merilno območje ±5 V, kar je povsem identično analognemu izhodu laserskega merilnika, in dosegli ločljivost digitalnega signala 2.44  $\mu$ m/bit.

Robot Epson je bil pritrjen na masivno vertikalno okroglo cev, ki je bila pritrjena na težak betonski podstavek. S tem smo postavili spodnji del robota na višino 870 mm od tal. Poleg robota smo namestili posebno mizo, ki je služila tudi kot nosilec za robotski krmilnik. Zunanje koordinate robota in stranice mize smo postavili tako, da so bile osi čim bolj poravnane, kar smo preverjali s premikanjem robota. Robot in miza nista bila fizično povezana zato, da smo preprečili prenos vibracij. Miza je bila 650 mm široka in 600 mm dolga, zgornji rob pa je bil 850 mm od tal. Na vrhu mize je bila nameščena posebna jeklena plošča, ki smo jo, s tremi vijaki, lahko nastavljali, da je bila vzporedna z

ravnino gibanja robota. To smo storili kar z nameščenim laserskim merilnikom oddaljenosti, s katerim smo merili oddaljenost jeklene plošče od merilnika v različnih pozicijah delovnega področja robota. Jeklena plošča je bila dimenzijsko nekoliko večja, 800 mm široka, 480 mm dolga in 30 mm debela. Imela je tri okrogle naslone, ki so služili naslonu dveh stranic rešetke, in štiri spone, s katerimi smo vpeli rešetko, kar je na sliki 4.1 tudi označeno. Na omenjeni mizi smo opravljali vsa testiranja, ki jih bomo v delu navajali.

### 4.1.3 Dinamika spreminjanja robov rešetke

Ko je bil sistem zgrajen, smo iz treh preskeniranih robov rešetke določili tudi hitrosti spreminjanja nivoja roba oziroma njegovo dinamiko, da bi ugotovili ustreznost uporabljenega laserskega merilnika.

Robove smo skenirali s hitrostjo gibanja robota 50 mm/s in frekvenco vzorčenja 500 Hz. Tako je bila časovna ločljivost 2 ms. Rob rešetke smo obravnavali kot sistem 1. reda, brez mrtvega časa, saj smo določili, da prevojne točke ni. Karakteristiko smo najprej normirali na najvišjo izmerjeno točko, nato pa opisali z matematično funkcijo kot polinom 6. stopnje. Sistem 1. reda opisuje enačba  $G(s) = \frac{K}{1+sT}$ , kjer T predstavlja časovno konstanto in K ojačenje sistema, v našem primeru 1. Časovno konstanto določimo, ko krivulja naraste na 63.2 % končne vrednosti, naklon krivulje pa je  $\frac{1}{T}$ .



Slika 4.2: Skeniran rob rešetke, njegova matematična aproksimacija in dvižni čas

Primer izrisa preskeniranega robu, z matematično aproksimacijo ter zarisano tangento, in nivo 0.632 končne vrednosti vidimo na sliki 4.2. Krivulja rdeče barve predstavlja z laserjem zajeto karakteristiko, modra pa je matematična aproksimacija. S črno črtkano črto je zarisan odziv določenega sistema na enotino stopnico.

Določili smo, da je časovna konstanta določenega sistema (T) 0.07 s in mejna frekvenca  $(\omega_m = \frac{1}{T})$  približno 14 Hz. Pri drugih dveh karakteristikah so bili zaključki podobni, saj sta bili časovni konstanti 0.1 s in 0.09 s oziroma mejni frekvenci 10 Hz in 11 Hz. Kljub temu da proizvajalec laserskega merilnika ne navaja dinamične karakteristike merilnika, smo z določeno dinamiko spreminjanja nivoja rešetke ugotovili, da je merilnik s

svojim 10 kHz delovanjem povsem ustrezen za opravljanje želene naloge.

## 4.2 Primer B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem

### 4.2.1 Izbira ustrezne opreme

Problematika reševanja tega primera se od primera merjenja dimenzije rešetk povsem razlikuje, saj je potrebno najti rešitev za vgradnjo merilnika razdalje na že obstoječe polnilne naprave. Na teh napravah, ki so rotacijske, je bilo na zahtevo naročnika potrebno namestiti ustrezno merilno opremo, poleg tega pa zagotoviti tudi nemoten prenos podatkov s polnilne naprave in tudi ustrezen način za merjenje in nastavljanje polnilnega tlaka ter merjenje temperature polnilnega olja. Vendar pa nastavljanje in branje tlaka nista del tematike tega dela.



Slika 4.3: Polnilna naprava, lepo vidne polnilne glave in vstavljena čutila diastatov

Osnovna zahteva naročnika je bila izvedba merjenja raztezanja membran s keramičnim gumbom, v fazi polnjenja na polnilnih napravah Brückner, in to na eni polnilni glavi. Na sliki 4.3 vidimo detajl polnilne naprave, kjer so lepo vidne polnilne glave in vanje vstavljena čutila diastatov. Na tem mestu je potrebno omeniti, da je prostora za kakršenkoli dodatek izredno malo. Poleg tega je pri nadgradnji naprave potrebno razmišljati tudi o ostalih komponentah, ki so fiksno pritrjene ob napravi in tudi na morebitne žične povezave. Poleg prostora smo morali upoštevati tudi okvirni cikel naprave, okrog 2.5 sekunde, torej ima delavec samo toliko časa, da vstavi čutilo v ustje polnilne glave. To je pomembno saj je potrebno na začetku cikla membrano utrditi. To bi bila tudi naloga delavca, saj sedaj membrane prosto visijo v zraku.

V preteklih poglavjih smo že omenili, da je pravilna napolnjenost diastatov najpomembnejša za pravilno delovanje termostata in zato so bile zahteve naročnika s stališča največjega pogreška izredno ozke. Zahtevana meja pogreška  $\pm 5 \ \mu$ m ustreza napaki  $\pm 1$ -2°C. Za izvajanje tako točnih meritev je najprimernejši pristop v obliki kontaktnega merilnika, kjer bi ob vstavljanju čutila diastata v poseben nosilec vstavili tudi membrano ter primaknili kontaktni merilnik. Po tehtnem premisleku smo zaključili, da uporaba kontaktnega merilnika zahteva eno operacijo preveč oziroma je trajanje cikla polnilne naprave prekratko. Poleg tega je bil vprašljiv tudi prostor namestitve, saj bi merilnik že segal v območje naslednje polnilne glave.

Ta dva razloga sta bila dovolj, da smo pričeli razmišljati o možnih brezkontaktnih pristopih merjenja raztezka. Ena izmed možnosti je video kamera, vendar bi tak sistem zasedel preveč prostora, problematična bi bila tudi osvetlitev, saj je membrana zelo reflektiven objekt, čeprav literatura omenja uporabo raznih polarizacijskih filtrov [45]. Poleg kamere smo razmišljali tudi o uporabi laserske mikrometrske zavese, ki ne bi bila nameščena na sami napravi, ampak v obliki štirih merilnikov, ob njej. Zasnova te ideje je podana na



Slika 4.4: Merjenje raztezka membrane z laserskim mikrometrom in referenčnim objektom

sliki 4.4, kjer bi merili razdaljo med keramičnim gumbom membrane in referenčnim objektom. Za ta pristop smo detajlno preizkusili tudi dva zavesna laserska mikrometra [46] in detajlno matematično analizirali potrebne oblike referenčnih objektov. Prednost takega sistema bi bila v tem, da na polnilni napravi ne potrebujemo ničesar drugega kot vpenjalo za membrano, kar je prednost s stališča prenosa podatkov. Največja slabost pa je v tem, da bi imeli informacijo o stanju raztezka membrane le v štirih pozicijah v rotacijskem krogu naprave, kar je sicer sprejemljivo. Kaj se dogaja z membrano vmes (vibracije, slabo vpetje), pa bi bilo neznano. Poleg tega je tak sistem povsem neuporaben pri membranah brez keramičnega gumba in zelo težko bi bilo zagotoviti pravilnost meritev, saj bi bil referenčni objekt neprestano izpostavljen vplivom olja in tudi mehanskim udarcem.

Vse do sedaj predstavljene ideje so se pokazale, iz različnih vzrokov kot neustrezne, zato smo zopet posegli po optičnih merilnikih oddaljenosti. Največja težava pri iskanju ustreznega merilnika je v tem, da imajo vsi merilniki običajno zelo veliko merilno glavo. Poleg tega imajo laserski izvor svetlobe, kar v skrajnih primerih lahko povzroči nevarnost za delavce. To je še toliko pomembnejše, ker sta v stiku s polnilno napravo vedno najmanj dva delavca in bi ju bilo zelo težko zaščititi.

### 4.2.2 Sistem za merjenje raztezka membran

Po izredno dolgotrajnem iskanju smo našli triangulacijski optični merilnik, proizvajalca Keyence (Slika 4.5), ki je tako po velikosti in merilnih karakteristikah kot tudi glede varnosti, saj uporablja kot vir svetlobe običajno rdečo LED diodo, povsem ustrezal našim zahtevam. Sprejemni element ni CCD, ampak PSD, razlika med njima pa je opisana v



Slika 4.5: Merilni sistem Keyence: krmilnik PT-A160 in merilna glava PT-165

poglavju 2. Merilna glava je velika samo  $36 \times 39$  mm in ima oznako PT-165, priključena pa je na krmilnik z oznako PT-A160. Merilnik ima 4 mm merilnega območja oziroma  $\pm 2$  mm s sredino območja oddaljeno 22 mm od merilne glave. Proizvajalec navaja, da je njegova ločljivost 3 µm na beli papirnati površini. Debelina optičnega žarka je 1.5 mm, kar je sicer veliko, vendar je izredno priročna, saj delavec razločno vidi piko in morda pozicijo membrane oziroma gumba pri nameščanju celo nekoliko popravi. Paziti je bilo potrebno tudi na to, da je temperaturno delovno območje merilnika ustrezno, saj v poletnih mesecih v proizvodnih prostorih temperatura preide tudi 40°C. Čeprav proizvajalec Keyence podaja večino pomembnih podatkov, pa ne navaja nivoja zaščite merilne glave (IP - Ingress Protection) in tudi linearnosti merilnika.

Merilna glava je priključena na krmilnik, ki uporabniku, z dvema potenciometroma, omogoča nastavljanje izhodne vrednosti 0 V in tudi naklona izhodne karakteristike. Krmilnik omogoča podajanje meritev le preko napetostnega analognega izhoda, ki je v območju  $\pm 2$  V, torej povsem sorazmeren merilnemu območju. Na krmilniku je nameščeno tudi majhno stikalo, s katerim lahko spreminjamo frekvenčni odziv merilnika. Možnosti sta dve, in to 1 ms in 10 ms, sami pa uporabljamo le 1 ms. Frekvenčni odziv je mišljen v smislu hitrosti spreminjanja merjene razdalje, kar se odraža na napetostnem izhodu meritve. Proizvajalec navaja, za nastavitev 1 ms, da je slabljenje izhodnega napetostnega signala -3 dB pri frekvenci 400 Hz, kar je prikazano tudi na sliki 4.6 [17].



Slika 4.6: Frekvenčni odziv merilnika Keyence PT pri nastavljenem stikalu na 1 ms

Ker je tudi ta triangulacijski merilnik oddaljenosti podajal vrednost v analogni napetostni obliki, je potrebno to vrednost pretvoriti v digitalno obliko. V ta namen smo zgradili povsem namenski mikrokrmilniški sistem za vsako polnilno napravo (Slika 4.7), ki služi za zajem analognih vrednosti, njihovo obdelavo in nadaljnje posredovanje z vsake polnilne naprave posebej. Načrtovanje tiskanega vezja je bilo izredno skrbno, saj je bilo potrebno vpliv šuma zmanjšati na minimum. Tako smo izdelali dvoslojno tiskano vezje, kjer je večji del spodnje strani predstavljal nivo mase, zgornji pa napajalno napetost +5 V. V sklopu tega vezja so bili tudi napajalni priključki za merilnik Keyence kot tudi za brezžični vmesnik Moxa (serijsko  $\Leftrightarrow$ WLAN). Vezje je bilo načrtovano tako, da je bil en del namenjen analognemu delu, drugi pa digitalnemu, torej fizično ločen. Na analognem delu je priključek za izhodno napetost merilnika Keyence. Da pa ne obremenjujemo izhoda merilnika, smo med njega in AD pretvornik vstavili še operacijski ojačevalnik OPA27. Na digitalnem delu pa sta tako mikroprocesor kot tudi pretvornik nivojev. Literatura navaja [47], da je za zmanjševanje šuma potrebno nivo mase razdeliti na analogni in digitalni del ter ju povezati samo v eni točki, kar smo tudi storili. Zgornji, napajalni nivo, je razdeljen tako, da je napajalna napetost +5 V tudi ločena. V našem primeru smo jo ločili preko dveh ločenih regulatorjev 7805, torej na napajanje analognega in digitalnega dela vezja.



Slika 4.7: Vezje mikroprocesorskega sistema

Srce mikrokrmilniškega sistema je mikrokrmilnik Mega8, proizvajalca Atmel, v katerem teče namenski program, o čemer govori poglavje 5. Za pretvorbo analognih izmerjenih vrednosti v digitalno obliko smo uporabili AD pretvornik z oznako MAX128, proizvajalca Maxim, ki je z mikroprocesorjem povezan preko I<sup>2</sup>C vodila. Ker so največji polnilni raztezki membran do 0.5 mm, smo se odločili, da uporabimo samo polovico merilnega območja merilnika, torej od 0 mm do 2 mm (0 V do 2 V izhodne napetosti). Glede na vgrajeno notranjo referenčno napetost AD pretvornika 4.096 V in polovično merilno območje 2.048 V smo dosegli ločljivost analognega signala 0.5  $\mu$ m na bit.

Za posredovanje serijskih RS-232 podatkov smo potrebovali še pretvornik nivojev MAX232, ki je povezan naprej z brezžičnim vmesnikom Moxa NPort W2150 (Priloga 10.3). Ta pretvarja serijske podatke v TCP/IP protokol. Brezžični prenos podatkov je

potreben, saj je polnilna naprava rotacijska. WLAN povezava v industrijskem okolju ni ravno pogosta in lahko povzroča težave, npr. v izgubi paketov [48]. Za čimboljši sprejem brezžičnega prenosa podatkov smo zgradili namensko WLAN anteno tipa bi-quad, način dostopa posameznih WLAN vmesnikov do nadzornega računalnika pa je realiziran preko dostopne točke (angleško "Access Point"), ki jo predstavlja PCI brezžična WLAN kartica. Za analizo prejetih podatkov je bil napisan namenski program z glavnim oknom, razdeljenim na šest diagramov, torej toliko kot je polnilnih naprav. Več informacij o delovanju programa smo na kratko zapisali v poglavju 5.

Da sistem lahko sam določa trenutno mesto v rotacijskem krogu polnilne naprave (Priloga 10.3), smo dodali mikrokrmilniškemu sistemu dva vhoda. Na njiju sta priklopljeni dve magnetni stikali, ki ju prožijo stalni magneti, nameščeni na sami polnilni napravi. Preko teh informacij prepoznamo, kje je pričetek in konec zajema, ter tudi, kje v krogu nastopa fino vakumiranje, konec polnjenja, faza stiskanja s kleščami in faza električnega točkanja čutila.

Na sami polnilni napravi je na eni polnilni glavi nameščen poseben kovinski nosilec, ki je zgrajen iz enega kosa. Nanj so pritrjeni tako merilnik Keyence PT-165, posebno vpetje za membrane in tudi obe magnetni stikali, kar prikazuje slika 4.8. Na ta način smo minimizirali možnost vpliva vibracij na merjenje.



Slika 4.8: Vpetje merilnika Keyence in membrane na polnilni napravi Brückner
#### 4.2.3 Dinamika raztezanja membrane med polnjenjem na polnilnih napravah

Za razliko od laserskega triangulacijskega merilnika Micro-Epsilon je proizvajalec Keyence podal dinamično karakteristiko merilnika. Kljub temu smo preverili, ali je s svojo mejno frekvenco 400 Hz ustrezen.

Detajlno smo analizirali nekaj polnilnih karakteristik diastatov. Izbrali smo tip 0055.817.121, skupina B, ki se ga polni na polnilni napravi št. 4. Tip in polnilno napravo smo izbrali zato, ker je polnilno olje izredno čisto in je polnilna karakteristika najstrmejša oziroma se membrana raztegne v najkrajšem času. Na ostalih polnilnih napravah so raztezki veliko počasnejši. Nastavljeni polnilni tlak je bil 7.0 bar, temperatura polnilnega olja 27.1°C, izračunani raztezek membrane pa 0.40 mm.

Prvotno smo hoteli karakteristiko opisati s sistemom 1. reda, vendar smo opazili, da imajo vse karakteristike prevojno točko, ki pa je značilna za sisteme redov višjih od 2. Za identifikacijo sistema smo uporabili Strejcevo metodo [54]. Ta temelji na določanju značilnih parametrov: ojačenja K, časa zakasnitve  $T_{ZA}$  in čas izravnave  $T_{IZ}$  oziroma umiritveni čas. Ojačenje K dobimo že s samim odzivom na stopnico, kar v našem primeru znaša 0.06043. Ostala dva parametra pa smo določili preko tangente v prevojni točki polnilne karakteristike. S to metodo preko razmerij  $\frac{T_{ZA}}{T_{IZ}}$  in  $\frac{T_{ZA}}{T}$  in grafov iz literature določimo red sistema in tudi časovno konstanto T.

Tako smo določili naslednje parametre: red sistema je 2, ojačenje 0.06043, časovna konstanta ( $\tau$ ) 0.19819 s in mejna frekvenca ( $\omega_m = \frac{1}{\tau}$ ) približno 5 Hz. Če določene parametre



Slika 4.9: Polnilna karakteristika, opisana s sistemom 2. reda

vnesemo v prenosno funkcijo 2. reda, dobimo enačbo:

$$G(s) = \frac{0.06043}{0.03928s^2 + 0.3964s + 1}$$
(4.5)

Graf na sliki 4.9 prikazuje dejansko polnilno karakteristiko v rdeči barvi, s črno črtkano črto pa je zarisana prenosna funkcija sistema. Vidimo, da je matematični opis polnilne karakteristike s sistemom 2. reda povsem zadovoljiv. Iz določenih časovnih konstant in mejnih frekvenc smo zaključili, da uporabljeni merilnik povsem ustreza želenemu namenu, še posebej, ker so na ostalih polnilnih napravah karakteristike položnejše in imajo časovno konstanto do 3 sekund.

## 5 Potrebna in izdelana programska oprema

## 5.1 Primer A: Merjenje dimenzije rešetk

Ob nakupu robota Epson s pripadajočim krmilnikom, na osnovi industrijskega osebnega računalnika, uporabnik kupi tudi Windows razvojno okolje, imenovano Epson RC+. V tem okolju uporabnik piše programe za gibanje robota v eni izmed izpeljank BASIC programskega jezika, ki ima vgrajenih že večino funkcij za delo z robotom. Poleg programiranja omogoča uporabniku tudi ročno vođenje robota in nastavljanje parametrov robota. Omogoča tudi klic lastno razvitih funkcij v obliki DLL knjižnic. Tako lahko uporabnik razvije funkcije v drugih programskih jezikih, kot npr. C, C++ in jih vključi v BASIC programsko okolje, kar pride zelo prav v primeru izdelave funkcij, ki posegajo v jedro operacijskega sistema oziroma drugih kompleksnejših in časovno odvisnih funkcij.

Že predhodno opisani mehanski sistem je bil s strani uporabljene strojne opreme (Poglavje 4) zastavljen tako, da bi merilni sistem zajemal koordinato X in Y merilnega sistema kar iz robota Epson, koordinato Z pa preko laserskega merilnika ILD2200-10 in vzporednih vrat industrijskega osebnega računalnika. Ker okolje Epson RC+ že vsebuje mnogo uporabnih funkcij, med njimi tudi zajem koordinat robota med gibanjem, smo to možnost tudi preizkusili. Tako smo določili niz t.i. preletnih (angleško "Via") točk in njihove koordinate zajemali s funkcijo CurPos. Zatem smo prebrali še koordinato Z preko vzporednih vrat. Rezultati so pokazali, da je največja možna frekvenca zajema koordinat robota do 100 Hz, vendar ni konstantna. Taka ugotovitev je povsem razumljiva, saj program teče v uporabniškem načinu in je lahko njegovo izvajanje v vsakem trenutku prekinjeno s strani Windows operacijskega sistema [49]. Tak način delovanja v našem primeru ni sprejemljiv in tudi sama najvišja frekvenca je nekoliko prenizka. Prehodno smo namreč izračunali, da bi bilo potrebno skenirati rešetke vsaj s hitrostjo 50 mm/s, v praznem prostoru med merilnimi odseki pa bi morala biti hitrost večja. Tudi če bi bila frekvenca zajema 100 Hz konstantna, bi tako pri hitrosti 50 mm/s zajeli vzorec koordinate le vsakih 0.5 mm, kar je občutno premalo. Koordinate je potrebno zajemati vsaj vsake 0.1 mm, kar pri hitrosti gibanja 50 mm/s pomeni vzorčenje koordinat vsaj s frekvenco 500 Hz. Ti izračuni temeljijo na predhodnih ugotovitvah, da je potrebno na rešetki določiti koordinate 88 robnih točk v času, krajšem od 1 minute. Tudi zajem koordinate Z, ki sledi



zajemu X in Y koordinate, je problematično, saj zakasnitev med tema dvema dogodkoma povzroči histerezo pri merjenju istega objekta pri gibanju naprej in nazaj. Skrajna rešitev bi bila, da se robot ustavi v točki zajema, kar pomeni izredno veliko izgubo časa.

Ker originalna programska oprema ne omogoča želene frekvence vzorčenja, je bilo potrebno najti drugo rešitev. Najprej smo razmišljali, da bi z namenskim mikroprocesorjem zajemali spremembo pulzov enkoderjev direktno z njih, vendar bi bil to prevelik poseg v zgradbo robota. Zato smo iskali programsko rešitev, jo tudi našli in izpeljali, celotno shemo delovanja sistema pa prikazuje slika 5.1.

#### 5.1.1 Gonilnik za zajem koordinat robota in meritev laserskega merilnika

Ker sta zajem koordinat robota in meritev laserskega merilnika časovno problematična, je bila edina rešitev, da se časovno kritična opravila opravljajo v jedru [50] (angleško "Kernel") operacijskega sistema Windows. V našem primeru smo bili prepričani, da lahko zajem koordinat robota oziroma pulzov enkoderjev in laserskih meritev v jedru traja izredno kratek čas, zato tudi ne bi bilo občutne zakasnitve med tema dvema dogodkoma. Največja težava programov v jedru operacijskega sistema je ta, da ga lahko izredno hitro zrušimo in tudi samo razhroščevanje (angleško "Debugging") je veliko težje kot na uporabniškem nivoju. Zato je potrebno v jedru opravljati samo minimalno število operacij.

Namenski program je bil napisan v Microsoft Visual Studio 6.0 razvojnem okolju, v programskem jeziku C/C++. Sestavljen je iz dveh delov (Slika 5.1, svetlosivo področje) [51]:

- prekinitvena servisna rutina (angleško "Interrupt service routine") s shranjevanjem zajetih podatkov (angleško "Memory with logged data"), ki sta del gonilnika v jedru,
- DLL knjižnica (angleško "Acquisition dynamic link library") v uporabniškem nivoju, ki omogoča nadzor nad gonilnikom v jedru.

S to razdelitvijo smo dosegli, da zajem in shranjevanje podatkov nista nikoli prekinjena s strani operacijskega sistema pa tudi nadaljnji preračuni koordinat in analiza podatkov so na uporabniškem nivoju preprostejši.

Krmilnik robota oziroma industrijski osebni računalnik vsebuje posebno ISA kartico na istoimenskem vodilu (angleško "ISA interface board"), ki skrbi za zajem sprememb pulzov enkoderjev robota (Slika 5.1, temnosivo področje). Osveževanje registrov s spremembami pulzov se dogaja s frekvenco 500 Hz (2 ms). S to frekvenco se obnavlja tudi števec, ki nakazuje spremembo registrov. Prekinitvena servisna rutina je bila sinhronizirana s prekinitvijo na ISA kartici. Testiranja so pokazala, da je frekvenca prekinitve, na ISA kartici, nekoliko višja od 1 kHz (1 ms). To pomeni, da prekinitev ni bila klicana točno dvakrat v času osveževanja podatkov registra, kar v literaturi poznamo kot večhitrostne (angleško "Multirate") sisteme [52]. Časovni potek dogajanja je prikazan na sliki 5.2.



Slika 5.2: Časovni potek zajemanja vrednosti sprememb enkoderja

Casovni potek na sliki 5.2 prikazuje, da gonilnik shranjuje vrednosti enkoderjev oziroma njihovih sprememb, ki so lahko tudi enake prejšnjim vrednostim. S slike tudi razberemo, da je lahko prebrana vrednost stara do 1 ms, kar ob gibanju robota pomeni določeno napako, vse pa je odvisno od same hitrosti premikanja.

Poleg branja sprememb vrednosti enkoderjev prekinitvena rutina bere tudi vrednosti laserskega triangulacijskega merilnika oddaljenosti preko vzporednih vrat. Tako se v jedru, s hitrostjo prekinitve ISA kartice, shranjujejo spremembe vrednosti prvih dveh enkoderjev, vrednost števca in vrednost laserskega merilnika. Te podatke je mogoče iz jedra v uporabniški nivo prenesti šele po zaključku gibanja robota, in to preko DLL funkcij, ko je prekinitvena servisna rutina ustavljena. Ker je prejetih podatkov preveč, je prenos narejen tako, da se upoštevajo samo najnovejši zapisi, gledano na frekvenco 500 Hz oziroma vrednost števca. Ob prenosu se podatki o spremembi enkoderjev, preko kinematičnih enačb (Enačbi 4.1 in 4.2), pretvorijo v X in Y koordinate robota. Na koncu se koordinate X, Y in Z zapišejo v tekstovno datoteko s .scn končnico.

# 5.1.2 Program za popravljanje skeniranih podatkov in določanje robnih točk skeniranih objektov

Na sliki 5.1 skrajno desno spodaj je omenjen tudi program za analizo skeniranih podatkov. Napisan je bil v razvojnem okolju Borland Builder C++ 6.0, prirejen pa tako, da je v osnovi omogočal določanje robnih točk na rešetki. S spremembo vhodnih parametrov ga je mogoče uporabiti tudi v druge namene.

Program smo zastavili tako, da se analiza prične s skeniranimi točkami v smeri X glede na globalni koordinatni sistem robota, nato pa še v smeri Y, zato mora biti tudi gibanje robota temu primerno. Med skeniranjem večina poti ne pripada delom rešetke, zato je tam hitrost gibanja lahko višja, kot na merilnih odsekih. Tu mora biti hitrost ustrezna za zagotavljanje določene in želene ločljivosti koordinat.



Slika 5.3: Algoritem za določanje robnih točk iz skeniranih podatkov

Slika 5.3 prikazuje algoritem, po katerem deluje program za analizo skeniranih podatkov. Ob zagonu programa se najprej preberejo vhodni parametri uporabnika (Nivo I), npr.: pot do niza potrebnih datotek, najmanjša vrednost koeficienta ujemanja R<sup>2</sup>, največje odstopanje v X ali Y smeri med zadnjo izmerjeno in izračunano točko, največja možna razlika v višini med skeniranimi deli objekta, največji dovoljeni kot zasuka rešetke v merilni celici, izbira hitrosti aproksimacije s polinomi in razhroščevalni (angleško "Debug") ter tekoči (angleško "Run") način delovanja programa. Temu sledi branje datoteke s končnico .pnt (Nivo II). To je datoteka generirana v okolju Epson RC+ namenjena za gibanje robota Epson. Potrebna je za določitev dveh mejnih točk, ki določata, kje je potrebno dele rešetke skenirati. Na podlagi te informacije, iz datotek s končnico .scn (Nivo III), izluščimo tiste skenirane podatke, ki pripadajo mejnima točkama oziroma trenutnemu predelu rešetke. Med laserskim skeniranjem objektov se lahko pojavijo napake, ki jih je potrebno popraviti ali pa zaključiti obdelavo podatkov (Nivo IV). V našem primeru so se pojavljale napake v obliki lukenį v profilu in v obliki točk izven profila (angleško "Outliers"). Primer luknje je prikazan na sliki 5.4, kjer horizontalna os prikazuje horizontalno X os pri gibanju robota, vertikalna Z os, ki predstavlja višino, pa meritve laserskega merilnika oddaljenosti.



Slika 5.4: Primer napake pri skeniranju profila rešetke

Teutsch et al. [53] navajajo, da se največ točk izven pravega profila in lukenj pojavi zaradi nepravilnega odboja laserskega žarka. Navaja primer, ko se laserski žarek odbije od zelo odbojne površine, kot npr. kovina ali steklo, in zato pade na sprejemni element preveč svetlobe, kar povzroči t.i. "blooming" efekt. To pomeni, da nekateri deli sprejemnega elementa na laserskem senzorju ne morejo absorbirati takšne količine energije, zato jo absorbirajo sosednji elementi. Teutsch et al. ravno tako omenjajo, da je izredno pogosta napaka pri uporabi triangulacijskih merilnikov t.i. prekrivni efekt (angleško "Shadowing effect"), ki je posledica zakritja poti laserskega žarka s strani ovire. Slednjemu smo se izognili z rotacijo merilnika, tako da sta bila izstopni in vstopni laserski žarek vzporedna s stranico rešetke oziroma skeniranega objekta. Program je popravil te napake tako, da je med obema skrajnima, pravima točkama profila, linearno interpoliral vmesne točke, vendar le če jih je bilo manj od 5, v nasprotnem primeru se je izvajanje programa končalo. Kljub zelo majhnemu merilnemu območju laserskega triangulacijskega merilnika so bili določeni deli rešetk taki, da smo zajeli tudi srhe, kar je vidno tudi na slikah 5.4 in 5.5. Srhi niso del prave geometrije izdelka, zato smo bili prisiljeni te podatke odstraniti iz skeniranih podatkov (Nivo V). V ta namen smo potrebovali dodatno datoteko s končnico .dis, ki smo jo ustvarili ročno. Vsebovala je razdaljo od vrha delov rešetke do vrha srha, in to za vsak rob rešetke. Te informacije so bile dovolj, da smo, iz skeniranih podatkov, uspešno odstranili dele pripadajoče srhom.



Slika 5.5: Matematična aproksimacija levega in desnega roba rešetke

Če uspešno odpravimo in interpoliramo morebitne napake, lahko določimo ali izračunamo robne točke na rešetki. V večini skeniranih profilov je bila rešetka toliko visoka, da srhi v skeniranem profilu niso zajeti. Višina rešetke pa je lahko bila tudi takšna, da smo morali določati točke robov oziroma točk čiščenja z matematično aproksimacijo, s čimer je bilo mogoče nadomestiti profil, ki manjka v področju srhov (Nivo VI). Enako je veljalo tudi v primerih, ko smo odstranili točke, ki opisujejo srh. Za aproksimacijo roba rešetke smo uporabili polinome (Enačba 5.1) stopnje n, kjer je n enak 4, 6 ali 8. V enačbi 5.1 oznaka p označuje koeficiente polinoma, x predstavlja aktualno horizontalno koordinato robota in  $\hat{y}$  predstavlja izračunano vertikalno komponento koordinate. Robne točke smo za levi in desni rob aproksimirali z dvema polinomoma. Število vhodnih točk, za določitev polinoma, je bilo spremenljivo, torej smo skledasto obliko polinoma širili oziroma ožali, kar vidimo tudi na sliki 5.5. Za izračun koeficientov za vsak polinom smo uporabili metodo najmanjših kvadratov [54], ki jo opišemo z enačbama 5.2 and 5.3.

$$\hat{y} = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 + \dots + p_n \cdot x^n \tag{5.1}$$

$$A = [1, x, x^2, \dots, x^n]$$
(5.2)

$$p = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot y \tag{5.3}$$

Na začetku aproksimacije smo pričeli s polinomom 4. stopnje, na prvem robu rešetke. Izračunano matematično aproksimacijo v istoležnih horizontalnih točkah primerjamo s skeniranimi točkami z uporabo residuumov (angleško "Residuals") in koeficienta R<sup>2</sup>, imenovanega koeficient ujemanja (angleško "Coefficient of determination"). Vrednost tega koeficienta je med 0 ter 1, večja vrednost podaja boljše ujemanje.

$$ResidualSS = \sum (y - \hat{y})^2$$
$$TotalSS = \sum (y - \bar{y})^2$$
$$R^2 = 1 - \frac{ResidualSS}{TotalSS}$$
(5.4)

Omenjane izračune kažejo enačbe 5.4, kjer oznaka y predstavlja vertikalno vrednost laserskega merilnika,  $\bar{y}$  predstavlja aritmetično sredino izmerjenih laserskih vrednosti,  $\hat{y}$ pa predstavlja s polinomom izračunano vertikalno vrednost. Če je bilo ujemanje s koeficientom R<sup>2</sup> višje od podanega praga, smo za izračun točke čiščenja uporabili trenutno število točk in stopnjo polinoma. V nasprotnem primeru smo postopek ponovili, vendar s polinomom s stopnjo višjo za vrednost 2. V primerih, ko je bilo ujemanje s skeniranim profilom neuspešno pri vseh treh stopnjah polinoma, smo uporabili večje število aproksimacijskih točk in postopek s polinomom 4. stopnje ponovili od začetka. Če bi se vendarle zgodilo, da nobena kombinacija ne vrne zadovoljivega ujemanja polinoma, se kot točko čiščenja uporabi kar zadnja točka skeniranega profila.

Predstavljeni algoritem s slike 5.3 je bil uporabljen na vseh skeniranih odsekih rešetke. Če so bili vsi vmesni postopki uspešni, je program na koncu v datoteko s končnico .rmp (Nivo VII) zapisal točke čiščenja robov rešetke. V nasprotnem primeru je bila omenjena datoteka prazna (Nivo VIII) in je bilo potrebno postopek skeniranja ponoviti, vendar v času uporabe programa te situacije nismo nikoli izkusili.

Omenjena metoda oziroma program je uporaben na objektih različnih oblik. To smo demonstrirali na primeru določanja dimenzij referenčnega kvadra, ki sledi v nadaljevanju disertacije (Podpoglavje 6.1.3). V tem primeru nismo uporabili polinomske aproksimacije oziroma je bila v vseh primerih neuspešna in smo kot robne točke uporabili kar zadnje točke, ki so bile pravilne v skeniranem profilu.

## 5.2 Primer B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem

V poglavju 4, kjer smo opisovali izbrano opremo za izvajanje meritev raztezka membrane v fazi polnjenja diastata s posebnim oljem, je omenjena kompleksnost sistema. Zato je potrebno skrbno načrtovati ustrezno programsko opremo, ki jo na trgu ni mogoče kupiti in smo jo napisali sami.

#### 5.2.1 Program mikroprocesorskega sistema

V mikrokrmilniku Atmel Mega8 teče namenski program, ki smo ga napisali v programskem jeziku C in okolju IAR Embedded Workbench. Prenos programa v mikrokrmilnik je bil izveden preko razvojnega okolja Bascom-AVR. Napisan program predstavlja most med izvajanjem meritev in njihovim posredovanjem glavnemu nadzornemu računalniku. Med tem program opravi še nekatere matematične operacije.

Za pravilno delovanje celotnega sistema program v mikroprocesorju v grobem potrebuje tri sklope, ki so grafično prikazani na sliki 5.6 in jih bomo natančneje opisali:

- 1. zajem in povprečenje izmerjenih vrednosti,
- 2. kompenzacija nelinearnosti,
- 3. uporabniški vmesnik.







Slika 5.7: Uporaba in delovanje Timer/Counter-jev

Najpomembnejši del programa je del za vzorčenje in osnovno obdelavo meritev raztezka membran. Za njegovo razumevanje delovanja je pomembno vedeti, da smo uporabili oba, tako 8-bitni (Timer/Counter 0 ... TC0) kot tudi 16-bitni (Timer/Counter 1 ... TC1) števec oziroma njune prekinitvene rutine. Na sliki 5.7 je prikazana shema delovanja obeh števcev. TC1 ima območje štetja od 0 do 65535. Ker je frekvenca oscilatorja 3.6468 MHz in smo želeli frekvenco pošiljanja podatkov 20 Hz oziroma vsakih 50 ms, začnemo šteti pri vrednosti 65357 in z delilnikom frekvence 1024. To pomeni, da vsakih 1024 nihajev oscilatorja števec poveča vrednost za 1. Ob začetku tega intervala poženemo tudi TC0, ki pa šteje skozi svoje območje s frekvenco 1.8 kHz, prav tako z delilnikom frekvence 1024. Ob vsaki prekoračitvi območja TC0 preberemo vrednost iz AD pretvornika oziroma merilnika oddaljenosti. To počnemo polovico območja štetja TC1, torej 25 ms. Ob koncu tega polovičnega cikla povprečimo vseh cca. 22 meritev, torej meritev zajamemo skoraj vsako 1 ms.

V nadaljevanju doktorske disertacije bomo detajlno opisali tudi vsa testiranja, ki so bila potrebna, da je celoten merilni sistem zaživel. Med temi poskusi smo preverili tudi linearnost merilnikov Keyence PT-165, kajti proizvajalec le-te v specifikacijah ne podaja. Kot se je izkazalo, je lahko nelinearnost meritev pri nekaterih merilnih glavah zelo slaba. Zato smo morali v mikrokrmilniški sistem vgraditi tudi kompenzacijo nelinearnosti. Poskusi so pokazali, da je nelinearnost meritev trebušaste oblike in jo zelo lepo opišemo s polinomom 4. stopnje (Enačba 5.1), zato ga za kompenzacijo tudi uporabljamo. Nelinearnost merilnika na polnilni napravi se določi tako, da se namesto vpenjala za membrano namesti kalibriran mikrometer z nameščenim keramičnim gumbom, zatem pa ročno zapisuje vrednosti mikrometra in optičnega merilnika. Te podatke se preko ustrezne tabele arhivira, program pa vrne koeficiente polinoma, ki jih uporabnik zatem vnese v mikrokrmilnik. Tretji del programa je uporabniški vmesnik, ki uporabnikom omogoča spreminjanje določenih parametrov programa in tudi način njegovega delovanja. Ta komunikacija poteka preko serijske brezžične RS-232 povezave, uporabnik pa lahko uporablja katerikoli primeren terminalski program (npr. HyperTerminal). Na ta način lahko spreminja naslov naprave, saj se morajo naslovi vseh naprav, povezani z eno polnilno napravo ujemati. V nasprotnem primeru regulacija polnilnega tlaka na tej polnilni napravi ni možna. Poleg te nastavitve je mogoče spreminjati tudi programsko zakasnitev med proženjem magnetnih stikal, povezano z odskakovanjem stikalnih kontaktov (angleško "Debouncing"). Za uporabnika je pomembno tudi spreminjanje koeficientov kompenzacijskega polinoma, poleg tega pa lahko kompenzacijo vklopi ali izklopi. Vse uporabniške nastavitve so shranjene v EEPROMu procesorja Atmel Mega8 in se ob zagonu ponovno naložijo. Zaradi varnosti so ti podatki shranjeni na treh lokacijah znotraj EEPROMa in se med seboj primerjajo ter tudi popravljajo.

Mikrokrmilniški sistem preko vodila RS-232 pošilja podatke WLAN vmesniku, ta pa nadzornemu računalniku, ki jih zopet vidi kot podatke poslane po serijskem vodilu. Ti podatki so: številka naprave, zaporedna številka meritve, pozicija merilnika na polnilni napravi in meritev raztezka membrane, vse po 20-krat na sekundo.

## 5.2.2 Glavni nadzorni program

Ceprav delovanje glavnega nadzornega programa na nadzornem računalniku ni neposredno povezana z izvajanjem meritev raztezka membrane, je tukaj predstavljeno samo osnovno delovanje. Program je načrtovan tako, da uporabnik nastavi samo tip in skupino diastata, za polnjenje na določeni polnilni napravi. Uporabnik ima na voljo okno razdeljeno na šest delov, torej toliko kot je polnilnih naprav (Slika 5.8). Prejeti podatki se izrisujejo v realnem času neodvisno na vseh šestih grafih. Vsak graf lahko uporabnik poveča in s tem podrobneje vidi detajle. Program uporabnika tudi opozarja o raznih napakah, opozarjanju o resnejših napakah je namenjen poseben semafor.

V program je poleg mnogih drugih funkcij vgrajen tudi uporabniški vmesnik, preko katerega uporabniki sistema preverjajo merilni pogrešek posameznih merilnikov Keyence na posameznih polnilnih napravah (Slika 5.9). V namen preverjanja merilnikov so v podjetju ETA Cerkno izdelali poseben kalibracijski objekt, s keramičnim gumbom in dvema nivojema. Dimenzijsko razliko teh dveh nivojev so izmerili s certificirano mikrometrsko uro, in ta vrednost je vzeta kot prava vrednost. Pri preverjanju je potrebno kalibracijski objekt namestiti v vpetje za membrane s keramičnim gumbom. Nato se premeri razlika z merilnikom Keyence in vsemi potrebnimi spremljajočimi podsklopi. V primeru meritve znotraj toleranc, se podatek zapiše v podatkovno bazo. Sistem uporabnika tudi obvešča o potrebnem preverjanju merilnikov glede na pretečen čas od zadnjega preverjanja, nakar



Slika 5.8: Okno glavega nadzornega programa

pa ima uporabnik tri dni časa za predpisano preverjanje. V nasprotnem primeru program ne omogoča več regulacije polnilnega tlaka na tej polnilni napravi.

POLNILNA NAPRAVA BRÜCKNER
Datum zadnjega preverjanja merilnika: <u>28.2.2008</u> Prava dimenzija referenčnega objekta (mm): <u>0,500</u> Število vzorcev za povprećenje: 60
2 Zajem izhodiščne vrednosti 0.000 mm
3 Merjenje dimenzije referenčnega objekta 0.000 mm
Izmerjena dimenzija referenčnega objekta: 0.000 mm Merilni pogrešek (prava - izmerjena vrednost): 0.000 mm
5 SHRANI X ZAPRI

Slika 5.9: Okno za preverjanje merilnega pogreška merilnikov Keyence

## 6 Metodologija

## 6.1 Primer A: Merjenje dimenzije rešetk

## 6.1.1 Pravilnost kinematičnih enačb

Pravilnost kinematičnih enačb (Enačbi 4.1 in 4.1) in tudi napisanega gonilnika z vsemi potrebnimi povezavami smo preverili na dva načina in sicer z:

- 1. mikrometrom,
- 2. sistemom Optotrak.

#### Mikrometer

Sistem za preverjanje pravilnosti delovanja oziroma izračunavanja koordinat robotskega sistema je prikazan na sliki 6.1. Sestoji iz mikrometra, ki ima merilno območje 25 mm, ločljivost 1  $\mu$ m in merilno negotovost  $\pm 3 \mu$ m, priključen pa je bil na krmilnik ter prikazovalnik Iskra NP110. Ko je bila mikrometrska konica povsem iztegnjena, smo se jo dotaknili z nosilcem laserskega merilnika na robotu. Ker je ta nosilec aluminijast in zato dokaj mehak, smo namestili na mesto kontakta železno ploščico. Mikrometer je bil poravnan s koordinatnim sistemom robota, zato pravokoten na nosilec merilnika. Pozicija sistema v delovnem področju robota je bila samo ena.



Slika 6.1: Skica sistema za preverjanje preračunov koordinat z mikrometrom

Meritve smo izvajali pri različnih hitrostih gibanja robota: 10 mm/s, 20 mm/s, 50 mm/s in 100 mm/s. Pričetek meritev je bil tak, da smo z nosilcem merilnik nastavili tako, da je kazal nekaj več od 0.000 mm. Iz te pozicije smo mikrometer premaknili za cca. 24 mm. Vsi premiki so bili v smeri -X, gledano v koordinatnem sistemu robota. Začetno in končno pozicijo mikrometra smo odčitali ročno, koordinate robota pa iz datoteke .scn, ki smo jo v delu že omenjali in vsebuje koordinate premika robota, zajete z napisanim gonilnikom. Pri vsaki hitrosti smo opravili po 5 meritev, vedno tako, da smo mikrometer pritiskali, kar je na sliki 6.1 označeno s puščico v levo.

## Sistem Optotrak

Pri testiranjih z mikrometrom je bilo preizkusno področje zelo majhno, zato smo preverili pravilnost izračuna koordinat z napisanim gonilnikom tudi na večji razdalji. Uporabili smo sistem za brezkontaktno določanje točk v prostoru, imenovan Optotrak. Sistem deluje na principu aktivnih infrardečih markerjev, ki jih spremljamo vsaj z eno od dveh sistemov kamer. Proizvajalec navaja, da je merilna negotovost sistema na razdalji 2.25 m le  $\pm 0.1$  mm, resolucija pa 0.01 mm, vendar iz izkušenj vemo, da temu ni tako, ampak je merilna negotovost bližje  $\pm 0.3$  mm.



Slika 6.2: Skica sistema za preverjanje preračunov koordinat s sistemom Optotrak

Na ustrezno stranico nosilca laserskega merilnika na robotu smo namestili 5 markerjev, katerih vrednosti smo povprečili (Slika 6.2). Gibanje robota je bilo povsem iz skrajnih točk delovnega prostora, od koordinate X 570.000 mm do -570.000 mm, pri čemer je bila koordinata Y 291.473 mm. Omenjene točke so bile prepisane iz uporabniškega vmesnika za vodenje robota sistema Epson RC+. Preračun pove, da je bil gib v smeri X dolg kar 1140 mm in tako dolg gib bi, po našem mnenju, moral pokazati nepravilnost kinematičnih enačb oziroma drugih napak v merilnem sistemu. Opravili smo tri poskuse, in to samo pri hitrosti 50 mm/s.

#### 6.1.2 Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika ILD2200-10

Za laserski triangulacijski merilnik ILD2200-10 proizvajalec Micro-Epsilon ne navaja, kakšen je njegov dinamični odziv, kot npr. v primeru drugega predstavljenega merilnika Keyence PT-165 s krmilnikom PT-A160 (Poglavje 4). Zato smo poskušali dinamiko senzorja preveriti oziroma določiti sami, poleg tega pa tudi preveriti odziv merilnika na ostrih robovih. Dinamične odzive je mogoče določti z enotino stopnico, zato smo poskušali tudi sami sestaviti tak poskusni sistem.

Na sliki 6.3 je prikazana skica postavljenega sistema. Na težko železno ploščo na vrhu robotskega merilnega sistema smo položili referenčni kvader, ki smo ga uporabljali tudi pri drugih poskusih in so opisani v nadaljevanju. Kvader smo poravnali z osmi robotskega zunanjega koordinatnega sistema. Ta kvader je predstavljal stopnico, čeprav rob ni idealno oster. Laserski merilnik ILD2200-10 smo po višini postavili na sredino njegovega merilnega območja, glede na zgornji rob kvadra, torej na višino 35 mm. S tem merilnikom smo zajemali koordinato Z.

Za zajem koordinate X nismo uporabili napisanega gonilnika in ustreznih DLL knjižnic za robot Epson, ampak smo premik nosilca merilnika merili z drugim laserskim triangulacijskim merilnikom. Uporabili smo merilnik proizvajalca Keyence z oznako LB-72W in krmilnikom LB-12W. Merilnik ima  $\pm 10$  mm merilnega območja, uporablja pa nevidno infrardečo lasersko svetlobo valovne dolžine 780 nm. Tudi krmilnik LB-12W omogoča nastavljanje dinamike merjenja z mikro stikalom. Izbrali smo nastavitev 2 ms, ki določa, da je resolucija merilnika 15  $\mu$ m, mejna frekvenca pa pri 200 Hz. Izhod merilnika je analogni napetostni signal v območju  $\pm 4$  V.



Slika 6.3: Sistem za določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika ILD2200-10

Oba uporabljena merilnika imata na voljo analogen napetostni izhod, ki smo ju povezali z AD/DA PCI kartico DAS1002. Vgrajeni AD pretvornik je 12-biten. Poleg teh dveh analognih napetostnih signalov smo vzorčili tudi signala POOR\_TARGET in OUT\_OF\_RANGE, ki sta potrebna za pravilno interpretacijo merilnega signala merilnika Micro-Epsilon. Ker proizvajalec navaja, da je delovna frekvenca merilnika Micro-Epsilon 10 kHz, smo vse štiri signale vzorčili s frekvenco 25 kHz. Ta kartica je bila nameščena v drugem osebnem računalniku in ne v Epson računalniku, zajem pa je bil realiziran v razvojnem okolju Matlab.

Meritve smo opravljali pri različnih hitrostih gibanja vrha robota: 10 mm/s, 20 mm/s, 50 mm/s in 100 mm/s, v vsaki konfiguraciji po tri meritve. Pri prvem nizu meritev je bil referenčni kvader obrnjen tako, da smo skenirali nepobarvani del. Gib vrha robota v smeri X je bil dolg približno 20 mm, in to proti kvadru kot stran od njega. Vsak gib je bila samostojna meritev. Isti parametri meritev so bili upoštevani tudi pri obrnjenem kvadru in skeniranju pobarvanega dela, kjer je nameščen tudi gumijast rob. Enako tudi, ko smo vertikalno premaknili laserski merilnik Micro-Epsilon.

## 6.1.3 Določanje merilnega pogreška z referenčnim kvadrom

Za določanje merilnega pogreška robotskega merilnega sistema smo uporabili referenčni objekt v obliki pravokotnega kvadra z znanimi oziroma izmerjenimi dimenzijami. Na kvadru smo označili smeri skeniranja, ki so prikazane tudi na sliki 6.4. Predhodno smo robne točke premerili s certificiranim koordinatnim merilnim strojem. Certifikat je bil



Slika 6.4: Referenčni kvader, gumijast trak in trajektorija skeniranja

Merjena	Koordinata točke (mm)					
točka	Min.	Povpr.	Maks.	Razli.		
1A	0.005	0.007	0.009	0.004		
1B	64.734	64.735	64.736	0.002		
2A	-0.003	-0.000	0.001	0.004		
$2\mathrm{B}$	64.729	64.732	64.733	0.004		
3A	-0.003	-0.002	-0.001	0.002		
3B	64.727	64.729	64.730	0.003		
4A	0.004	0.005	0.006	0.002		
$4\mathrm{B}$	50.245	50.246	50.246	0.001		
5A	0.001	0.002	0.003	0.002		
5B	50.248	50.248	50.249	0.001		

Tabela 6.1: Koordinate merjenih točk s KMS na nepobarvani strani kvadra

podeljen po postopku preverjanja ISO10360-2 [14]. Isti koordinatni merilni stroj smo v dosedanjem tekstu že omenili v utemeljitvi potrebe po merjenju dimenzije rešetke, kjer smo planarno merilno negotovost stroja opisali z enačbo 3.1. Meritve dimenzije kvadra smo opravljali v prostoru z zelo konstantno temperaturo 20.6°C. Kvader je bil pred meritvijo na tej temperaturi nekaj ur. Nameščena kontaktna konica je imela premer 2 mm. Koordinatni sistem na referenčnem kvadru je bil postavljen tako, da smo potipali dve pravokotni stranici v več točkah. Skozi te je program koordinatnega merilnega stroja sam potegnil osi koordinatnega sistema. Temu je sledilo avtomatsko opravljanje meritev, kjer smo vsako točko potipali 10-krat. Hitrost gibanja stroja je bila 20 % največje možne, ki je 300 mm/s.

Referenčni kvader je bil na nepobarvani strani širok približno 50.3 mm, visok 51.2 mm in dolg 64.7 mm. Izmerjene koordinate točk glede na pomembno os koordinatnega sistema

Merjena	Koordinata točke (mm)					
točka	Min.	Povpr.	Maks.	Razli.		
1A	-0.005	-0.004	-0.003	0.002		
1B	64.764	64.766	64.770	0.006		
2A	-0.005	-0.003	-0.002	0.003		
$2\mathrm{B}$	64.762	64.764	64.767	0.005		
3A	-0.002	-0.001	0.000	0.002		
3B	64.764	64.766	64.771	0.007		
4A	-0.006	-0.006	-0.005	0.001		
$4\mathrm{B}$	50.280	50.281	50.288	0.008		
5A	-0.003	-0.002	0.001	0.002		
$5\mathrm{B}$	50.270	50.272	50.276	0.006		

Tabela 6.2: Koordinate merjenih točk s KMS na pobarvani strani kvadra



Slika 6.5: Uporabljen referenčni kvader, gumijast trak in trajektorija skeniranja

so podane v tabeli 6.1. Referenčni kvader je izdelan iz železa z izmerjeno trdoto 249 HV (Vickers Hardness), ostrih robov in peskan, da je bila površina difuzna, s čimer smo izboljšali odboj laserskega žarka. Taka je bila samo ena stran, saj smo drugo pobarvali s črno mat barvo. To stran smo ravno tako premerili s koordinatno merilno napravo. Izmerjene dimenzije vidimo v tabeli 6.2. Z barvanjem smo zagotovili razmere podobne rešetki, ki je tudi temnejše barve. Poleg tega je tudi odbojnost laserske svetlobe na obarvanih površinah drugačna.

Meritve dimenzij kvadra z izdelanim merilnim sistemom je potekalo tako, da smo kvader položili na težko jekleno ploščo, ki smo jo predhodno poravnali z ravnino gibanja robota. Kvader smo postavili v devet  $(3 \times 3)$  pozicij delovnega prostora robota ter tako zapolnili njegov večji del. Pozicije kvadra so bile na plošči zarisane, da smo lahko meritve morebiti ponovili, in tudi poravnane s koordinatnim sistemom robota. Na kvadru je bilo s svinčnikom narisanih pet koridorjev skeniranja (Sliki 6.4 in 6.5), širokih po 1 mm. Trije so bili v smeri X in dva v smeri Y, gledano na postavitev kvadra v koordinatnem sistemu robota. Meritve smo opravljali pri različnih hitrostih gibanja robota, ki so bile 10 mm/s, 20 mm/s, 50 mm/s in 100 mm/s. Te hitrosti pri frekvenci zajemanja koordinat robota 500 Hz pomenijo ločljivost koordinate 0.02 mm, 0.04 mm, 0.1 mm in 0.2 mm. Pospešek in pojemek sta bila v področju skeniranja nastavljena na 1000 mm/s<sup>2</sup>, zunaj pa 4000 mm/s<sup>2</sup>. Omeniti tudi velja, da se robot v nobeni točki ne ustavi, saj smo točke določali kot preletne (angleško "Via") točke.

Na vsaki poziciji postavitve kvadra v delovnem področju robota in pri vsaki hitrosti je bilo gibanje merilnika tako, da je celotno pot opravil najprej v eno smer in se nato po isti poti vrnil, kar je zarisano tudi na sliki 6.4 in označeno z različno velikostjo puščic. Kjer prihaja do spremembe smeri glede na koordinatni sistem, je bilo potrebno merilnik zasukati za 90°, s čimer smo preprečili prekinitev poti laserskega žarka. Hitrost gibanja je bila konstantna (polna črta), le v delih, kjer ni kvadra, smo hitrost nastavili nekoliko višjo (črtkana črta), torej ravno tako kot pri skeniranju rešetke. Te črte na sliki 6.4 kažejo tudi to, da je bilo področje skeniranja večje od dejanske dimenzije kvadra, kar je potrebno s stališča spreminjanja hitrosti robota. Celotno pot, tako naprej kot nazaj, smo ponovili 30-krat. Vertikalna pozicija laserskega merilnika glede na nivo kvadra je bila taka, da je zgornji nivo kvadra segal ravno do polovice merilnega območja laserskega senzorja. V tem področju je debelina laserskega žarka najmanjša in znaša 50  $\mu$ m. Krmilnik laserskega merilnika je bil nastavljen tako, da ni opravljal nobenega povprečenja. Sobna temperatura med opravljanjem meritev je znašala 22°C, kvader pa je bil na tej temperaturi več dni.

Meritve dimenzije kvadra smo najprej opravili na nepobarvani površini, nato pa še na pobarvanem delu. Pred pričetkom merjenja pobarvanega dela smo kvadru dodali črn gumijast rob (Sliki 6.4, temnosivo področje in 6.5), pritrjen 6 mm od vrhnjega roba in s širino 3 mm. Ker je bil zgornji rob kvadra na sredini merilnega področja laserskega merilnika, je bilo njegovo merilno področje malenkost nad tem robom. Namreč, ugotovili smo, da se debelina laserskega žarka znatno poveča, če žarek pade preveč izven merilnega območja (približno 2 mm), za majhna odstopanja pa tega fenomena nismo zasledili. Z uporabo gumijastega traku smo poskušali preprečiti nepravilno obnašanje žarka na ostrih robovih.

Analiza skeniranih podatkov je potekala z isto programsko opremo kot analiza skeniranih podatkov na rešetki, le da polinomska aproksimacija ni nikoli uspela in smo kot rob objekta vzeli zadnjo pravilno izmerjeno točko, gledano na stanje obeh signalov napake laserskega merilnika.

## 6.1.4 Primerjalne meritve na testnih rešetkah

Vsi dosedanji poskusi z izdelanim robotskim merilnim sistemom so bili izvajani na objektih, ki niso bili ulitki oziroma rešetke iz sive litine, za izmero katerih pa je bil sistem sploh načrtovan. V poglavju 3, kjer smo utemeljili potrebo po izmeri rešetk pred robotskim čiščenjem, smo podali rezultate dimenzijskega odstopanja rešetk. Te meritve so bile narejene s certificirano koordinatno merilno napravo, zato jih imamo lahko za referenčne. Zato smo se odločili, da meritve na rešetkah opravimo tudi z izdelanim merilnim sistemom. Tako smo lahko neposredno primerjali rezultate med seboj. Pri tem smo uporabili rešetke istega tipa, vendar pa ne istih kot pri predhodnih meritvah, saj je med tema dvema sklopoma meritev preteklo veliko časa, zato lahko rezultate primerjamo le statistično. Pri meritvah z robotskim merilnim sistemom smo uporabili 42 rešetk. Vsako smo namestili v delovno področje robota, kjer je bila težka kovinska plošča na mizi, prirejena za vpenjanje rešetk. Mehanski sistem je opisan v poglavju 4 in prikazan na sliki 4.1. Vsako rešetko smo povsem naslonili na, za to nameščene, okrogle naslone, ki so zagotavljali zadovoljivo vzporednost stranic rešetke s koordinatnimi osmi robota. Rešetke smo s posebnimi sponami tudi utrdili, njena sredina pa je bila zelo blizu sredini koordinate X zunanjega koordinatnega sistema robota.



Slika 6.6: Začrtana pot gibanja robota z merilnikom

Na vsaki rešetki smo tako skenirali 44 področij, 20 v smeri X in 24 v smeri Y, kot je prikazano na sliki 6.6, z debelimi črtami. Ta pot je bila postavljena skladno s pozicijo tipanih točk s koordinatno merilno napravo. Vertikalna pozicija laserskega merilnika je glede na najvišji del rešetke od merilnika znašala 31 mm, torej smo imeli na voljo še 9 mm merilnega območja za nižje dele rešetke oziroma za stranice robov. V področju skeniranja rešetke smo nastavili hitrost gibanja robota oziroma merilnika na 50 mm/s zunaj območja pa na 500 mm/s. Pospešek in pojemek je bil v področju skeniranja nastavljen na 1000 mm/s<sup>2</sup>, zunaj pa 4000 mm/s<sup>2</sup>. Omeniti tudi velja, da se robot v nobeni točki ne ustavi, saj smo točke določali kot preletne (angleško "Via") točke. S temi nastavitvami je bila celotna rešetka preskenirana v času dobrih 40 sekund. Nadaljnja programska analiza z napisanim namenskim programom za določanje točk robov rešetke s polinomsko aproksimacijo (Poglavje 5) pa je zahtevala še od 2 do 3 sekunde. Tako je skupna meritev trajala okrog 45 sekund oziroma skoraj 9-krat hitreje od meritev, izvajanih s koordinatnim merilnim strojem. Naj spomnimo, da je bil ta čas kar 7 minut.

## 6.2 Primer B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem

## 6.2.1 Določanje nelinearnosti merilnika Keyence PT-165

Izbrani brezkontaktni triangulacijski merilnik Keyence PT-165 je s svojimi značilnostmi, navedenimi s strani proizvajalca, povsem ustrezal našim potrebam. Vendar proizvajalec v svojem katalogu in na internet strani ne navaja zelo pomembnega parametra, to je linearnosti merilnika. Linearnost merilnika je običajno standardni podatek takih merilnikov, ki ga od proizvajalca nismo dobili niti s posebnim posredovanjem.

Ker je naročnik postavil zelo ozko dovoljeno območje pogreška, smo podatek o linearnosti merilnika potrebovali in ga zato določili sami. V merilni verigi pa ni samo merilnik, ampak tudi mikrokrmilniški sistem z operacijskim ojačevalnikom in AD pretvornikom. Tako smo določali linearnost merilnika skupaj z mikrokrmilniškim sistemom v določenem delovnem področju od 0 mm do 2 mm. V ta namen smo uporabili poseben sistem, predstavljen na sliki 6.7. Na sliki, gledano z leve, je pritrjena merilna glava Keyence PT-165, na desni pa je viden certificiran referenčni cevni mikrometer Mitutoyo MHD-164-161. Ta ima merilno negotovost  $\pm 2 \ \mu$ m in ločljivost 1  $\mu$ m. Med tema dvema merilnikoma je viden poseben mehanski sistem, ki deluje tako, da je njegov sredinski del premičen v liniji med obema merilnikoma. Sistem je povsem brez vodil in brez posebnega mazanja. Na premični sistem je z desne strani naslonjena konica referenčnega mikrometra. Tako smo lahko premični sistem premikali le s potiskanjem proti brezkontaktnemu merilniku. Na tej sliki na levi strani premičnega dela vidimo tudi prilepljen keramični gumb. Ta je enak kot tisti na membranah diastata.



Slika 6.7: Mehanski sistem za določanje nelinearnosti merilnega sistema membrane s keramičnim gumbom

Postopek določanja nelinearnosti smo pričeli tako, da smo premični mehanski sistem z merilnikom Mitutoyo premikali toliko časa, da je merilnik Keyence s pripadajočo elektroniko vračal 0 V oziroma 0.000 mm. V tem trenutku smo na 0.000 mm nastavili tudi mehanski mikrometer, nato pa ga odvili za nekaj več kot 2 mm in ročno naslonili premični sistem na konico mikrometra. Ker je bil v tem trenutku mehanski sistem preveč odmaknjen, smo ga s privijanjem vrtljivega gumba referenčnega mikrometra premaknili za toliko, da je mikrometer kazal 2.000 mm. V tem trenutku smo opazovali izhod merilnega sistema, ki običajno ni kazal 2.000 mm. Da je merilni sistem kazal pravo vrednost, smo s priloženim plastičnim izvijačem vrteli potenciometer na krmilniku PT-A160. S tem smo karakteristiko merilnega sistema vpeli med 0.000 mm in 2.000 mm. Da smo določili karakteristiko linearnosti merilnega sistema med tema dvema točkama, smo z referenčnim mikrometrom premikali premični sistem s keramičnim gumbom. Premiki so bili po korakih približno 0.100 mm. Pri vsakem koraku smo odčitali vrednost referenčnega mikrometra in vrednost, ki ga vrača merilni sistem s Keyence merilnikom. Postopek smo večkrat ponovili, brez nastavljanja potenciometrov krmilnika, tudi z daljšimi časovnimi premori.

#### 6.2.2 Stabilnost merjenja fiksne razdalje z merilnikom Keyence PT-165

Pri izbranem brezkontaktnem merilniku je proizvajalec navajal, da je temperaturno delovno okolje med 0°C in 50°C ter pri relativni vlažnosti med 35 % in 85 %. Poleg teh podatkov podaja tudi temperaturno odvisnost tako za merilno glavo kot za krmilnik. Proizvajalec definira temperaturno odvisnost kot spremembo analognega napetostnega izhoda glede na spremembo temperature okolice za 1°. Za merilno glavo je temperaturna odvisnost na celotnem merilnem območju  $0.1\%/\circ$  (4 µm), za krmilnik pa  $0.05\%/\circ$  (2 µm). Kljub tem podatkom smo vseeno preverili temperaturno stabilnost merjenja fiksne razdalje v laboratoriju in tudi stabilnost merjenja fiksne razdalje v industrijskem okolju. Zanimala nas je predvsem kratkotrajna stabilnost, saj je opravljanje meritev raztezka membrane relativna, zato je nadvse pomembna kratkotrajna stabilnost merjenja. V prvem nizu testiranj smo preverili stabilnost merjenja samega brezkontaktnega merilnika, brez mikrokrmilnika za zajemanje, saj ga takrat še nismo imeli izdelanega. Tako smo analogen izhod merilnika  $\pm 2$  mm vzorčili z AD pretvornikom, proizvajalca Maxim, tip MAX197. Ločljivost digitalnega signala je bila tako  $\pm 2.4$  mV oz.  $\pm 2.4 \mu$ m, zajemali pa smo ga vsako sekundo. Ta pretvornik je bil isti kot tisti, s katerim smo vzorčili laserske brezkontaktne meritve v robotski celici za izmero dimenzij rešetk.

Merilna priprava je bila zelo preprosta, njen izgled in skico pa vidimo na sliki 6.8. Na ogrodje iz aluminija smo pritrdili brezkontaktni merilnik in dodatno aluminijasto ploščo. Na njej je bil prilepljen keramični gumb, ki je od merilnika oddaljen za razdaljo d, katere dejanska vrednost pa ni bila pomembna. Dodatna aluminijasta plošča je bila pritrjena na



Slika 6.8: Sistem za merjenje stabilnosti razdalje

rob glavne plošče, s čimer smo hoteli izničiti vpliv temperaturnega raztezanja aluminija. Meritve stabilnosti razdalje smo opravljali tako v laboratoriju kot tudi v industrijskem okolju, kjer so nameščene polnilne naprave Brückner. Meritve smo zajemali vsako sekundo, trajale pa so od 1 do 4 ur. Temperature okolice nismo posebej zajemali, ampak smo odčitali samo temperaturo ob pričetku meritev in ob koncu.

## 6.2.3 Stabilnost merjenja fiksne razdalje s celotnim merilnim sistemom

Ravnokar omenjene meritve so bile potrebne s stališča poznavanja brezkontaktnega merilnika oddaljenosti Keyence, predvsem glede vpliva spremembe temperature na merilni rezultat.

Zato, da bi upoštevali morebitne vplive različnih komponent merilnega sistema, smo podobne meritve stabilnosti ponovili, vendar le v proizvodnih prostorih, torej med obratovanjem. S tem smo v meritve hoteli zajeti tudi vse vplivne parametre iz proizvodnje: spremembe temperature, vibracije, morebitne elektromagnetne motnje itn. Meritve smo opravljali z vsemi komponentami, ki sestavljajo merilni sistem na polnilni napravi:

- triangulacijski merilnik oddaljenosti Keyence, nameščen na sistem za določanje nelinearnosti,
- mikroprocesorski sistem,
- brezžični oddajnik Moxa NPort W2150.



Slika 6.9: Merjenje stabilnosti meritev razdalje z vsemi komponentami, nameščenimi na polnilni napravi

Komponente smo postavili na rotirajočo polnilno napravo, kakor kaže slika 6.9. Ta naprava je bila v delovanju, torej je na njej potekalo polnjenje diastatov. Podatke smo prejemali in shranjevali na prenosnem računalniku, kjer smo jih analizirali s programom Matlab. Merilni sistem smo, s predhodnim vnosom potrebnih parametrov v mikrokrmilniški sistem, linearizirali ter tako dosegli območje pogreška  $\pm 2 \mu m$ . Meritve so trajale več ur in več dni, s čimer smo resnično zajeli vpliv dejanskega stanja v proizvodnji na stabilnost merjenja fiksne razdalje. Temperature nismo zajemali.

# 6.2.4 Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami sprotne kontrole in preverjanje pravilnosti enačb

V poglavju 3 je že bilo omenjeno, da se statistično in rutinsko preverja pravilnost napolnjenosti diastatov v t.i. končni kontroli. Tam se izmeri tako hod naprej kot tudi hod nazaj, in to pod obremenitvijo 2 kg, kar je stanje, podobno tistemu v termostatu. Ker so te meritve najbolj pomembne in edine merodajne, smo opravili tudi primerjavo diastatov, napolnjenih s sprotnim merjenjem raztezkov. Podoben sistem testiranja ima podjetje tudi neposredno zraven polnilnih naprav in se je uporabljal do sedaj za sprotno preverjanje pravilnosti napolnjenosti in korekcije polnilnega tlaka. Preko teh primerjalnih meritev smo preverili tudi ustreznost enačb oziroma odvisnosti 3.3 in 3.5.

Za testiranje smo uporabili povsem isti sklop komponent kot pri predhodno omenjenem testiranju stabilnosti celotnega sistema, le da smo meritve neposredno izrisovali v namensko napisanem programu, ki je bil osnova kasnejšemu regulacijskemu programu na nadzornem računalniku. Na polnilno napravo smo pritrdili poseben nosilec, namenjen pritrditvi merilnika Keyence in membrani diastata (Slika 6.10). Poleg primerjave s končno kontrolo smo hoteli tudi preveriti vpliv rotiranja polnilne naprave na same meritve. Potrebno je še enkrat omeniti, da se polnilna naprava ciklično ustavlja in zaganja, ker le tako lahko zagotovimo nemoteno stiskanje čutila in njegovo morebitno rezanje.

Pri testiranju smo uporabljali tip diastata 715-622, varjen z vrha, membrane pa so spadale v skupino C, polnilna naprava je označena s številko 6. Ker v tem trenutku še nismo imeli zgrajenega regulacijskega kroga (regulator tlaka ter senzorja tlaka in temperature), smo temperaturo olja merili z ločenim merilnikom, nameščenim tik pred vstopom olja v polnilno napravo. To mesto je sicer povsem zadnje možno, čeprav bi bilo idealno merjenje temperature olja v sami polnilni glavi. Polnilni tlak smo odčitavali preko igelnega indikatorja tlaka, ki so ga uporabljali med proizvodnjo do sedaj. Nastavljanje polnilnega tlaka je ravno tako potekalo preko do tedaj uporabljenega membranskega ventila.

Pri teh meritvah smo izmerili samo 16 diastatov, kar je enako številu prostih mest v eni seriji meritev v končni kontroli. Postopek smo pričeli z odčitavanjem temperature olja in s parametri diastata preko odvisnosti 3.3 izračunali polnilni tlak. Prvih 6 napolnjenih diastatov je bilo polnjenih pri izračunanem in nastavljenem tlaku 3.3 bar.



Slika 6.10: Nosilec za merilnik in membrano, vpet na polnilno napravo

Pri preverjanju (omenjeni tip diastata) operater vstavi čutila v banjico s temperaturo medija 30°C in poravna skalo mikrometra na 0.00 mm. Nato čutila prestavi v banjico s temperaturo -25°C in odčita vrednost mikrometra, kar predstavlja t.i. hod nazaj. Želene vrednosti so med 0.02 mm in 0.08 mm. Za hod naprej pa vstavi čutilo najprej v začetno banjico, kjer mora kazati mikrometer 0.000 mm, nato pa še na višjo temperaturo in zopet odčita raztezek.

Sprotna kontrola je pokazala nekoliko prevelike hode, zato je bilo potrebno korigirati polnilni tlak na 3.10 bar. Pri tem tlaku smo nato poskusno napolnili in izmerili polnilne karakteristike še za preostale testne diastate. Nato smo jih oddali v končno kontrolo, kjer so po svojem postopku preverili tako hod naprej kot hod nazaj.

Potrebno pa se je zavedati, da diastati med polnjenjem in meritvami niso bili na temperaturi 30°C, zato izmerjena razlika med fazo vakumiranja in hodom v fazi točkanja diastata ni prava. Potrebno ji je prišteti vrednost za katero se olje raztegne pri temperaturni razliki okrog 5.5°C, saj je bila temperatura okolice 24.5°C, specifični hod pa je 0.0036 mm/°C. Poleg tega je to vrednost potrebno zmanjšati za vrednost, ki jo povzroča obremenitev s težo 20 N, kar imenujemo poves membrane. Naročnik nam je dal podatek, da je pri raztezku membrane 0.150 mm poves le-te pri obremenitvi 20 N izračunljiv po formuli:  $0.00154 \times \text{obremenitev}(N)$ . To pri hodu 0.150 mm znaša 0.031 mm. Vendar pa v našem primeru začetni hodi niso znašali 0.150 mm, bili so manjši. Poves membrane v odvisnosti od hoda membrane je tudi podal naročnik in odvisnost je kar linearna. Tako smo izračunali, da moramo izmerjene raztezke zmanjšati za 0.01 mm, kar omogoča primerjavo s kontrolo pod obremenitvijo.

## 6.2.5 Vpliv zaščitnega stekla na meritve s triangulacijskim merilnikom oddaljenosti

Ko je bil celoten merilni sistem na eni polnilni napravi že nameščen, je bil merilnik povsem nezaščiten pred zunanjimi vplivi tekočin, predvsem polnilnega olja (Slika 6.10). Poleg že omenjenih parametrov, ki jih proizvajalec ne podaja, ne podaja tudi stopnje zaščite merilnika (angleško "Ingress Protection - IP"). Zato v začetku uporabe nismo poznali vpliva okolice na merilnik.

Ker je bil merilnik povsem nezaščiten pred oljem, je prišlo do uničenja leč v merilni glavi, kar vidimo na sliki 6.11. Opazimo, da so na obeh lečah nastali t.i. mlečni deli oziroma lise. Po odprtju merilnika smo tudi potrdili prisotnost olja v njegovi notranjosti. Da je razlog za uničenje leč olje, je potrdil tudi proizvajalec. Zato je bilo potrebno merilnik dodatno zaščititi pred vplivi olja. To je možno edino z montažo v dodatno kovinsko ohišje z ustreznim steklom v področju leč.



Slika 6.11: Uničeni leči merilnika Keyence zaradi vpliva polnilnega olja

Iz fizike je znano, da svetloba, ko preide v drug medij pod nekim kotom, spremeni hitrost in smer. Ob njenem izhodu v predhodni medij pa se ji parametri povrnejo. Vendar pa je v tem primeru žarek premaknjen, kar smo srečali tudi v našem primeru. Na velikost premika žarka neposredno vpliva debelina stekla. S povečanjem debeline stekla je žarek bolj premaknjen. Vpliv stekla v našem primeru demonstrira slika 6.12. Želja je bila po čim debelejšem steklu, saj nemalokrat delavec po nesreči lahko z diastatom udari nekje v bližini merilnika oziroma stekla. Preizkusili smo kar nekaj tipov stekel različnih debelin: 0.3 mm, 0.5 mm, 1.0 mm in 1.5 mm. Poskuse smo opravljali z že znano pripravo



Slika 6.12: Sprememba poti žarka zaradi vpliva loma svetlobe skozi steklo



Slika 6.13: Sistem za določanje nelinearnosti z dodanim steklom

za določanje nelinearnosti merilnika, ki vsebuje referenčni mikrometer, pri čemer smo ustrezno namestili steklo (Slika 6.13). Merilnik Keyence je bil priklopljen na mikroprocesorski sistem, ki je posredoval rezultate meritev. Cilj poskusov je bila določitev najbolj ugodne debeline stekla, določiti morebitno nelinearnost sistema, definirati kompenzacijski polinom in meritve z vplivom vseh parametrov ponoviti ter določiti merilni pogrešek sistema z dodanim steklom. Ti postopki so bili enaki tistim pri določanju predhodnih nelinearnosti merilnega sistema brez stekla, zato jih ne navajamo ponovno.

# 6.2.6 Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami končne kontrole

Po nizu osnovnih testiranj v prvi polovici leta 2007 smo v roku enega leta dokončali opremljanje vseh šestih polnilnih naprav, kjer smo realizirali sprotno merjenje raztezkov membran s keramičnimi gumbi. V vsem tem času proizvodnja nemoteno teče, za vsak tip diastatov se še vedno opravlja statistična končna kontrola meritev hoda naprej in nazaj. Tako lahko za daljše obdobje uporabe tukaj podanega sistema primerjamo rezultate sedanje končne kontrole s prejšnjimi leti.

Tako smo izbrali tri najbolj tipične primere diastatov (715-601, 715-680 in 715-612), ki so se v preteklosti tudi polnili na polnilnih napravah, in s tem pokazali ustreznost delovanja izdelanega sistema. V poglavju rezultatov pri tipu 715-601 podajamo najprej statistične

rezultate za leto 2006, kjer sploh še ni bilo vpeljanega grupiranja membran, nadalje za obdobje polnjenja na polnilnih napravah z vpeljanim grupiranjem membran in končno za obdobje polnjenja s pomočjo izdelanega sistema. Enake rezultate podajamo za tip 715-680, kjer pa ni bilo prehodnega obdobja polnjenja z grupiranjem membran. Enako velja za tip 715-612, vendar se je pri tem tipu v času polnjenja s pomočjo izdelanega sistema spremenil način polnjenja iz t.i. v glavi v t.i. iz glave. Tako podajamo primerjalne rezultate statistične kontrole tudi za te spremembe.

Poleg teh treh tipov kot primerjavo podajamo tudi tip diastata 715-697, ki se ga v preteklosti, zaradi izredne temperaturne občutljivosti in pomena pravega hoda nazaj (ne sme nikoli biti večji od 0.12 mm), ni polnilo na polnilnih napravah, ampak ročno. Zahteva po največjem dovoljenem hodu nazaj izvira s strani kupca, saj s tem zagotovi pogoju varnosti pri izklopu termostata in s tem privarčuje dodaten strošek za varnostni element. Kljub tem ostrim zahtevam se je po zagonu našega sistema tudi ta tip diastata pričelo polniti na polnilnih napravah, saj sistem zagotavlja ustreznost napolnjenosti oziroma hode nazaj pod 0.12 mm. Rezultate podajamo za obdobje ročnega polnjenja in za obdobje polnjenja na polnilnih napravah.

## 6.2.7 Meritve raztezka membran s kovinsko ploščico

V poglavju 3 na sliki 3.12 sta prikazana tipa membran, kjer ima desna membrana nameščeno kovinsko ploščico in ne keramičnega gumba. Ker se diastatov z membranami s kovinsko ploščico izdela veliko manj, smo tem membranam posvečali manj pozornosti. Vendar pa smo tudi za te poskušali ugotoviti ustreznost merilnika za uporabo na teh ploščicah. Iz preteklih izkušenj smo vedeli, da zelo refleksivni oziroma zrcalni predmeti lahko povzročajo težave.

Prva testiranja so potekala povsem enako kot pri membranah s keramičnim gumbom, kjer smo v sistem s slike 6.7 namestili kovinsko ploščico (glej sliko 6.14). Ker je membran s keramiko številčno več, smo karakteristiko merilnika določili na keramičnem gumbu ter na njem tudi kompenzirali nelinearnost. Merilni sistem je zajemal merilnik Keyence in mikrokrmilniški sistem, priklopljen na osebni računalnik. Uporabili smo štiri kovinske ploščice premera 4 mm, ki smo jih, vsako posebej, prilepili na keramični gumb. Nato smo mikrometer vrteli toliko časa, da je celoten merilni sistem posredoval 0.000 mm in zatem nastavili mikrometer na enako vrednost. Sledil je odmik mikrometra za nekaj več kot 2.000 mm, premik premičnega dela sistema in premik mikrometra na vrednost 2.000 mm. V tem trenutku smo odčitali vrednost merilnega sistema. Nato smo z vrtenjem mikrometra nastavili vrednost 2.000 mm in odčitali mikrometer. Izkazalo se je, da je merilni sistem vedno vračal večjo razdaljo od dejanske. Enako smo storili pri mikrometru nastavljenem na 1.000 mm.



Slika 6.14: Mehanski sistem za določanje nelinearnosti merilnega sistema membrane s kovinsko ploščico

Poleg teh meritev smo opravili tudi preizkus, ki naj bi, po nasvetih proizvajalcev triangulacijskih merilnikov oddaljenosti, izboljšal merilne karakteristike merilnikov na zrcalnih površinah. Ker na obstoječem testnem sistemu nismo mogli nagniti merilnika, smo nagnili ploščico (Slika 6.15), kar je bila edina hitra možnost za testiranje. Z nagnjeno ploščico smo meritve iz prejšnjega odstavka ponovili, vendar s korakom 0.1 mm in ne samo z dvema vmesnima stanjema. Ravno tako smo uporabili 4 ploščice.

Ker raztezki membran s kovinsko ploščico v fazi polnjenja običajno ne presežejo 0.2 mm, smo kljub nezadovoljivim rezultatom prejšnjih laboratorijskih meritev na kovinski ploščici meritve opravili tudi v proizvodnji. Te so bile opravljene ob delovanju celotnega merilnega in regulacijskega sistema na vseh šestih polnilnih napravah, merilniki so bili umerjeni in kompenzirani na keramične gumbe. Razlika pri teh meritvah z meritvami na keramiki je bila le v zamenjavi nastavka za vpetje membrane. Med postopkom testiranja smo na nadzornem računalniku oziroma v nadzornem programu izbrali tip in skupino diastata na ustrezni polnilni napravi, nato pa pričeli z vstavljanjem membran in spremljanjem karakteristik polnjenja.



Slika 6.15: Mehanski sistem za določanje nelinearnosti merilnega sistema membrane z nagnjeno kovinsko ploščico

## 7 Rezultati meritev

## 7.1 Primer A: Merjenje dimenzije rešetk

## 7.1.1 Pravilnost kinematičnih enačb

## Mikrometer

Pravilnost kinematičnih enačb v izračunu koordinat robota z napisanim gonilnikom in funkcijami smo opravljali pri hitrostih gibanja robota 10 mm/s, 20 mm/s, 50 mm/s in 100 mm/s ter jih primerjali z vrednostmi kontaktnega mikrometra z merilnim območjem 25 mm. Zavedali smo se pa, da višjih hitrosti na kratki razdalji ni mogoče doseči.

				Epson			Absolutni
Ν	Mikrometer			gonilnik			pogrešek
	(mm)			(mm)			(mm)
	X1	X <sub>2</sub>	$D_1 = (X_2 - X_1)$	X <sub>3</sub>	$X_4$	$D_2 = (X_4 - X_3)$	$ D_2 - D_1 $
1	0.789	24.800	24.011	-197.801	-221.802	24.001	0.010
2	0.789	24.801	24.012	-197.801	-221.802	24.001	0.011
3	0.790	24.801	24.011	-197.801	-221.802	24.001	0.010
4	0.792	24.800	24.008	-197.801	-221.802	24.001	0.007
5	0.791	24.798	24.007	-197.801	-221.802	24.001	0.006

Tabela 7.1: Preverjanje kinematičnih enačb z mikrometrom pri hitrosti 50 mm/s

Rezultati v tabeli 7.1 kažejo rezultate pri hitrosti 50 mm/s, to je bila tudi hitrost pri gibanju robota med skeniranjem rešetke. Na razdalji 24 mm, kolikršna je bila pot robota, smo izmerili največji pogrešek med obema merilnima sistemoma 0.011 mm. V prilogi 10.4 se nahajajo še tabele 10.2, 10.3 in 10.4, kjer so podani rezultati pri drugih hitrostih. Pri teh so pogreški manjši, do 0.008 mm, kar pomeni okrog 0.04 % gledano na celotno merilno območje. Opazimo tudi, da je vrednost, izračunana z robotom, vedno enaka 24.001 mm, ter vedno daljša od razdalje, določene z mikrometrom. Od nastavljene odstopa zanemarljivo malo.

Iz teh rezultatov smo zaključili, da na razdalji 24 mm ni opaziti znatne napake v izračunu koordinat robota, ki bi bile posledica napake pri določanju kinematičnih enačb 4.1 in 4.2 oziroma naključne izgube spremembe enkoderjev ali napačnega delovanja gonilnika.

## Sistem Optotrak

Meritve na veliko večji razdalji smo opravljali samo pri hitrosti 50 mm/s, število ponovitev pa je bilo enako 3. Te meritve so bile potrebne zato, ker je pri prej navedenih rezultatih na razdalji 24 mm vseeno prihajalo do minimalnih razlik. Določiti smo hoteli, ali razlike morda niso vseeno posledica napačnih parametrov kinematičnih enačb. Tabela 7.2 podaja rezultate meritev. Absolutni pogrešek je precej velik, saj znaša več kot 0.5 mm, kar na razdalji 1140 mm zopet pomeni približno 0.04 % glede na dolžino merjenja.

				Epson			Absolutni
Ν	Optotrak			gonilnik			pogrešek
	(mm)			(mm)			(mm)
	X1	$X_2$	$D_1 = (X_2 - X_1)$	X <sub>3</sub>	$X_4$	$D_2 = (X_4 - X_3)$	$ D_2 - D_1 $
1	677.05	-462.45	1139.50	570.003	-570.018	1140.021	0.521
2	677.05	-462.44	1139.49	570.003	-570.018	1140.021	0.531
3	677.06	-462.44	1139.50	570.003	-570.018	1140.021	0.521

Tabela 7.2: Preverjanje kinematičnih enačb s sistemom Optotrak pri hitrosti 50 mm/s

Vidimo, da je razdalja, izračunana z robotom, zopet daljša za 0.021 mm, kar pa je zelo blizu podanemu področju ponovljivosti  $\pm 0.015$  mm, ki ga podaja proizvajalec robota. Vseeno je odstopanje manjše od vrednosti meritve s sistemom Optotrak, kjer je odstopanje kar 0.5 mm.

Dolžina poti je bila določena v okolju Epson RC+, ki se ga za manipulacijo z robotom uporablja tudi v drugih projektih. Ker pri drugih nalogah ni bilo opaziti slabše ponovljivosti robota od predpisane, smo sklepali, da pogrešek vseeno izvira iz sistema Optotrak, kar potrjujejo tudi predhodne izkušnje.

#### 7.1.2 Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika ILD2200-10

Glavni cilj meritev je določitev dinamičnega odziva merilnika Micro-Epsilon ILD2200-10, kot odziv na stopničasto spremembo nivoja kvadra. S kvadrom smo to lahko storili le na pobarvanem delu, opremljenim z gumijastim robom in z zgornjo ploskvijo kvadra, oddaljeno 31 mm od merilnika. To pomeni tako vertikalno pozicijo Micro-Epsilon merilnika, da smo v merilnem območju zajeli tudi nivo gumijastega roba. Na sliki 7.1 vidimo posneto stopničasto spremembo nivoja pri hitrosti gibanja robota 50 mm/s, ko je merilnik potoval v smeri od leve proti desni.

Na abscisni osi je prikazana koordinata X, zajeta z drugim laserskim merilnikom Keyence, na ordinatni osi Z pa je vrednost testiranega merilnika Micro-Epsilon. Meritev laserskega triangulacijskega merilnika ILD2200-10 je označena z rdečo črto. Oba signala napake sta v visokem stanju, saj ni bilo nobene napake, označena pa sta z modro in črno črto.



Slika 7.1: Odziv laserskega merilnika ILD2200-10 na stopničast rob kvadra

Iz prikazanega poteka stopničaste spremembe smo ugotovili, da merilnik spremeni izhodno vrednost v trenutku in ni opaziti vmesnih vrednosti oz. lezenja proti novemu nivoju. To potrjuje navedbe proizvajalca, da merilnik osvežuje vrednosti s frekvenco 10 kHz in ne manj, saj med obema nivojema ni prav nobenega vmesnega vzorca.

Vendar so meritve razkrile druge pomanjkljivosti triangulacijskih merilnikov, navedene tudi v literaturi. Curless et.al. [18] navajajo težavo teh merilnikov na ostrih robovih, kar smo s temi poskusi potrdili tudi sami.

Slika 7.2 prikazuje primer s hitrostjo gibanja robota enako 10 mm/s, skenirali smo nepobarvan del kvadra, njegov zgornji rob je bil na sredini merilnega področja. Na abscisni osi je prikazana koordinata X, zajeta z drugim laserskim merilnikom Keyence z oznako LB-72W, na ordinatni osi Z pa je vrednost testiranega merilnika.

Podatki vertikalnih meritev so narisani z rdečo črto, modra barva prikazuje signal napake oziroma stanje signala POOR TARGET, ravno pri spremembi nivoja. Na sliki 7.2 je lepo vidna napaka v obliki luknje pri robu. Luknja je široka približno 0.01 mm, do spremembe stanja signala POOR TARGET oziroma do pravega roba pa je skoraj še celih 0.03 mm. Zaskrbljujoče je tudi dejstvo, da ni opaziti sprememb nivoja signalov napak ob nastopu luknje v meritvi. Na tej sliki se tudi lepo vidi namen signala napake, saj se izmerjena vrednost skoraj ne spremeni, ko je merilnik izven območja merjenja. Omeniti velja, da smo pri teh meritvah ta pojav zasledili tako z vrhnjim robom kvadra na sredini kot tudi na robu merilnega področja, samo pri hitrosti 10 mm/s ter samo na nepobarvani strani kvadra. To pa še ne pomeni, da pojava pri drugih hitrostih ni.


Slika 7.2: Napaka v obliki luknje laserskega merilnika ILD2200-10 v bližini roba kvadra

Te meritve so pokazale tudi to, da se nivoja obeh signalov napake ne spremenita trenutno, kar pa je zaradi analognih vrednosti tudi pričakovati. Izkazalo se je, da je prehod signala napake v nekaterih primerih opisan tudi z 8 vzorci, vendar pa je teh vzorcev včasih tudi manj, kar kaže tudi slika 7.3, kjer je teh vzorcev 7. To pomeni, da merilnik potrebuje približno 0.35 ms, potreben za signal POOR TARGET kot OUT OF RANGE za spremembo enega stanja v drugo stanje. Ta dva izhoda merilnika nimata idealnega razpona od 0 V



Slika 7.3: Hitrost spremembe nivoja signalov napake

do 5 V, ampak od 0.6 V do 4.6 V. V robotskem merilnem sistemu sta bila signala napake povezana na LPT vrata, ki v osnovi delujejo v TTL logiki, kjer je nizek nivo določen z 0 V do 0.8 V, visok pa med 2 V in 5 V. Če predpostavimo, da se digitalni nivo spremeni pri vrednosti 2.5 V, potem lahko določimo, da signala napake lahko ustvarita do 0.2 ms zakasnitve, kar pri hitrosti 100 mm/s pomeni napako v določanju koordinate roba 0.02 mm. To pomeni, da je lahko objekt, katerega rob je oster, tako predolg kot prekratek, le v idealnem ujemanju zakasnitev na obeh robovih (npr. pri merjenju dimenzije kvadra) je dimenzija prava.

Kvadra med meritvijo na enem tipu površine (pobarvana in nepobarvana) nismo premikali, zato smo lahko med seboj primerjali tudi rezultate določanja koordinate roba pri različnih hitrostih. Rob kvadra je določen glede na prehod signala napake nad oziroma pod 2.5 V. Meritve smo lahko opravljali samo pri zgornjem nivoju kvadra na sredini merilnega območja vertikalnega laserskega merilnika, kajti le v tem primeru je na pobarvani strani kvadra z gumijastim robom prišlo do spremembe nivoja signalov napake. Če bi merilnik bolj približali, bi zaznali tudi nivo gumijastega roba, zato ne bi prišlo do spremembe nivojev kateregakoli signala napake. Primer brez spremembe kateregakoli signala napake ponazarja slika 7.1.

Rezultati določanja robnih točk so podani v tabelah 10.6 in 10.7 v prilogi 10.6 ter slikah 7.4 in 7.5, kjer so prikazani tako rezultati za gibanje vertikalnega merilnika na zgornji nivo kvadra kot tudi z njega.



Slika 7.4: Koordinata roba kvadra na nepobarvani strani

Povprečna vrednost koordinate roba je 0.651 mm, izmerjene vrednosti pa segajo od 0.638 mm do 0.670 mm. Največje odstopanje med obema smerema skeniranja je pri hitrosti 100 mm/s in znaša 0.026 mm, pri hitrosti 50 mm/s razlika oziroma histereza znaša 0.021 mm, pri obeh nižjih hitrostih pa okrog 0.010 mm. Če primerjamo rezultate glede na smer gibanja, so razlike manjše, saj je pri hitrosti 100 mm/s območje meritev široko le 0.011 mm. Omeniti velja, da je ločljivost merilnika Keyence, po navedbah proizvajalca, enaka 0.015 mm, kar se odraža tudi na teh meritvah.



Slika 7.5: Koordinata roba kvadra na pobarvani strani

Pri pobarvanem kvadru so rezultati zelo podobni, s povprečno vrednostjo koordinate določenega robu 0.327 mm. Spomnimo se, da je vrednost koordinate druga zato, ker smo kvader ročno obrnili in tako ni povsem enako pozicioniran. Pri hitrosti gibanja 10 mm/s sta bili skrajni izmerjeni koordinati roba kvadra enaki 0.319 mm in 0.325 mm, z razliko 0.006 mm. Pri hitrosti 20 mm/s sta ti skrajni koordinati 0.314 mm in 0.326 mm, pri 50 mm/s pa 0.323 mm in 0.340 mm, kar predstavlja histerezo 0.012 mm in 0.017 mm. Pri najvišji hitrosti 100 mm/s je histereza zopet največja in znaša kar 0.033 mm, pri skrajnih točkah 0.319 mm in 0.352 mm. Če primerjamo rezultate za drugo smer gibanja, so razlike zopet manjše in predvsem v ožjem območju, saj je pri hitrosti 100 mm/s območje meritev široko 0.020 mm.

Podane vrednosti kažejo na zaznavo roba povsem znotraj pričakovanih mej, saj je največje odstopanje oziroma histereza 0.033 mm. To odstopanje bi pojasnili s samo ločljivostjo horizontalnega laserskega triangulacijskega merilnika Keyence enako 0.015 mm in z ugo-

tovitvami iz prejšnjih meritev. Tam smo pokazali, da je čas spremembe nivoja ustreznega signala napake določljiv in pri hitrosti 100 mm/s lahko povzroči napako 0.020 mm. Ta pogrešek skupaj s samo ločljivostjo horizontalnega merilnika lahko povzroča merilni pogrešek določanja roba velikosti 0.03 mm oziroma  $\pm 0.015$  mm.

### 7.1.3 Določanje merilnega pogreška sistema z referenčnim kvadrom

Sliki 7.6 in 7.7 kažeta pogrešek med meritvami dimenzij s koordinatno merilno napravo in izdelanim robotskim merilnim sistemom pri hitrosti gibanja robota 20 mm/s. Podajamo rezultate za dve poziciji v delovnem področju robota, označeni s 4 in 5 v sredini delovnega področja robota. Slika 7.6 kaže razliko nastalo na nepobarvani strani kvadra, slika 7.7 pa na pobarvanem delu kvadra. Na poziciji 5 delovnega prostora robota je bila smer skeniranja robota od 4A do 4B (Slika 6.4) v smeri Y, na poziciji 4 pa od 3B do 3A v smeri X. Horizontalna os diagramov na slikah predstavlja zaporedno številko meritve, torej od 1 do 30, vertikalna os pa napako v milimetrih glede na referenčne meritve s kontaktnim koordinatnim strojem. Če je izračunana vrednost negativna, potem je lasersko izmerjena dimenzija odseka kvadra manjša od prave.

Na diagramih, ki opisujeta razmere na nepobarvanem delu kvadra, vidimo, da največji pogrešek znaša od 0.13 mm do 0.26 mm, s srednjo vrednostjo 0.08 mm in 0.19 mm. V



Slika 7.6: Pogrešek izdelanega sistema na nepobarvani strani kvadra pri hitrosti 20 mm/s



Slika 7.7: Pogrešek izdelanega sistema na pobarvani strani kvadra pri hitrosti 20 mm/s

drugih pozicijah kvadra v delovnem področju robota pa se pojavljajo tako večja kot manjša odstopanja. Razpon vrednosti posameznih pogreškov sega od -0.06 mm do 0.30 mm. Rezultati na prikazanem diagramu pobarvanega dela kvadra kažejo, da je razpon vrednosti pogreška med -0.12 mm in 0.13 mm, s srednjima vrednostma -0.07 mm in 0.09 mm. V drugih pozicijah kvadra znotraj delovnega področja robota pa vrednosti posameznih pogreškov variirajo med -0.17 mm in 0.15 mm.

Grafično rezultate merilnega pogreška med izdelanim sistemom in pravimi vrednostmi na kvadru kažeta tudi sliki 7.8 in 7.9, za višjo hitrost enako 50 mm/s. Ta hitrost je uporabljena tudi pri merjenju dimenzij rešetk. Na prvi sliki so podani rezultati odstopanj meritev na nepobarvani površini, na zadnji sliki pa na pobarvani. Podajamo rezultate za pozicijo kvadra v delovnem prostoru robota s številko 2, kjer je bila smer skeniranja od 2A do 2B v smeri X. Poleg te pozicije podajamo rezultate tudi za pozicijo 9, smer gibanja od 4B do 4A v smeri Y. Horizontalna os grafov predstavlja zaporedno številko meritve med 1 do 30, na vertikalni osi pa je pogrešek v milimetrih glede na prave vrednosti dimenzije. Pri pozitivnem pogrešku je prava vrednost večja od izmerjene z robotskim sistemom.

Če primerjamo pogreške pri različnih hitrostih, takoj opazimo večji pogrešek pri višji hitrosti. Na nepobarvani strani kvadra je pogrešek pri višji hitrosti med -0.13 mm in 0.23 mm, vendar pa srednja vrednost samo malenkostno odstopa od prej predstavljenih rezultatov. Srednji vrednosti sta -0.11 mm in 0.08 mm. V drugih pozicijah kvadra je



Slika 7.8: Pogrešek izdelanega sistema na nepobarvani strani kvadra pri hitrosti 50 mm/s



Slika 7.9: Pogrešek izdelanega sistema na pobarvani strani kvadra pri hitrosti 50 mm/s

pogrešek med -0.17 mm in 0.31 mm. Iz diagrama na pobarvani strani kvadra je opaziti vrednosti pogreška med -0.28 mm in -0.22 mm, s srednjima vrednostma -0.08 mm in -0.19 mm. V preostalih pozicijah je območje pogreškov med -0.30 mm in 0.13 mm. Skrajne vrednosti pogreškov pri drugih hitrostih so zbrane v tabeli 7.3.

Površina				
kvadra	Nepobarvana		Pobarvana	
Hitrost	Pogrešek (mm)		Pogrešek (mm)	
gibanja (mm/s)	Min	Max	Min	Max
10	-0.01	0.33	-0.16	0.19
20	-0.06	0.30	-0.17	0.15
50	-0.17	0.31	-0.30	0.13
100	-0.31	0.29	-0.54	0.12

Tabela 7.3: Skrajna območja pogreškov pri drugih hitrostih in površinah kvadra

Ti rezultati meritev dolžine kvadra z izdelanim sistemom so pokazali vrednosti merilnega pogreška v območju  $\pm 0.3$  mm. Če pogreške izrazimo relativno in upoštevamo povprečno dolžino kvadra 57 mm, potem je relativni pogrešek enak  $\pm 0.5$  %.

Pogreške lahko razdelimo na sistematske in naključne. Sistematski pogrešek povzroča odmik vseh izmerjenih vrednosti od središča, naključni pa razpršenost meritev. Opravljene meritve so pokazale, da je izredno težko določiti sistematski pogrešek, saj rezultati v nobenem primeru ne povzročajo samo odmika v eno smer od prave vrednosti. Tako smo celotni pogrešek upoštevali kot naključni, saj bi pri velikem številu meritev povprečna vrednost limitirala proti vrednost 0.

Čeprav se naključnemu pogrešku ni mogoče izogniti, smo ga, glede na opravljene meritve in analize, poskušali vsaj delno ovrednotiti pri hitrostih 10 mm/s in 50 mm/s. Pri meritvah pozicije roba merjenega z dvema laserskima merilnikoma oddaljenosti, smo zaključili, da je pogrešek koordinate roba pri najnižji hitrosti v območju  $\pm 0.005$  mm, pri višji pa  $\pm 0.01$  mm. Pri določanju delnih prispevkov pogreškov smo upoštevali tudi meritve pravilnosti izračuna kinematike, čeprav je v tem primeru pogrešek takorekoč zanemarljiv, pri nizki hitrosti je v območju  $\pm 0.003$  mm, pri višji pa  $\pm 0.01$  mm. Te vrednosti so močno zaokrožene navzgor. Ta dva vira izredno malo prispevata k skupnemu pogrešku, zato smo nadalje detajlno analizirali vpliv delovanja programskega gonilnika. Predhodno je že omenjeno delovanje na t.i. večhitrostnem (angleško "Multirate") principu. V prilogi 10.7 so grafično ponazorjeni časovni dogodki določanja robu kvadra v različnih situacijah roba glede na delovanje gonilnika. Ta analiza prikazuje, da lahko način delovanja gonilnika povzroči tako premajhno kot preveliko dolžino kvadra. Pri upoštevanju dveh robov kvadra je potrebno te vrednosti upoštevati dvakrat. Glede na delovanje gonilnika je čas lahko predolg za 0.7 ms, vendar ne doseže 1 ms. Lahko je tudi prekratek, in to celo

<u> </u>				
Hitrost	Rob	Kinematika	Gonilnik	Pogrešek
(mm/s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	-0.005	-0.003	-0.050	-0.060
10	+0.005	+0.003	+0.015	+0.030
	-0.005	-0.004	-0.100	-0.110
20	+0.005	+0.004	+0.030	+0.040
	-0.010	-0.010	-0.200	-0.220
50	+0.010	+0.010	+0.070	+0.100
	-0.015	-0.010	-0.400	-0.430
100	+0.015	+0.010	+0.150	+0.180

za 2 ms. Te vrednosti preračunane glede na hitrost gibanja pomenijo pri nižji hitrosti pogrešek določanja dimenzije odsekov kvadra od -0.05 mm do 0.015 mm, pri višji pa od -0.20 mm do 0.07 mm.

Tabela 7.4: Ovrednotenje vplivov pogreška glede na opravljene meritve in analize

V tabeli 7.4 so podani ovrednoteni pogreški na osnovi opravljenih meritev in analiz na kvadru. Skupen seštevek v skrajnem desnem stolpcu smo zaokrožili navzgor, kar je običajna praksa. Če gledamo rezultate pri obeh višjih hitrostih, potem so ti pogreški povsem pričakovani, nepričakovani pa so pri nižjih dveh hitrostih. Nadalje je v tabeli 7.5 določena velikost pogreška za obe površini kvadra, ki ga ne moremo ovrednotiti z meritvami. Na nepobarvanem delu kvadra je del tega pogreška v povprečju od -0.07 mm do

Nepobarvan kvader						
Rezultati	testiranj	Ovrednotenje pogreška		Razlika		
(mm) - t	abela 7.3	(mm) - tabela 7.4		(mm)		
-0.01	0.33	-0.06	0.03	-0.05	0.30	
-0.06	0.30	-0.11	0.04	-0.05	0.26	
-0.17	0.31	-0.22	0.10	-0.05	0.21	
-0.31	0.29	-0.43	0.18	-0.12	0.11	
Povprečje: -0.07 0.22					0.22	
Pobarvan kvader						
Rezultati testiranj Ovrednotenje pogreška Razlika				lika		
(mm) - t	abela 7.3	(mm) - tabela 7.4		(mm)		
-0.16	0.19	-0.06	0.03	0.10	-0.16	
-0.17	0.15	-0.11	0.04	0.06	-0.11	
-0.30	0.13	-0.22	0.10	0.08	-0.03	
-0.54	0.12	-0.43	0.18	0.11	0.06	
		·	Povprečje:	0.09	-0.06	

Tabela 7.5: Določitev neovrednotenega pogreška glede na testirane hitrosti

0.22 mm, območje je tako enako 0.30 mm. Pri pobarvanem delu kvadra rezultati meritev kažejo, da je očitno prišlo do premika območja z območjem neovrednotenega pogreška od -0.06 mm do 0.09 mm, kar bi lahko zaokrožili na skupaj 0.20 mm.

Glede na podano je pri hitrosti 50 mm/s in 100 mm/s glavni vir pogreška način delovanja napisanega gonilnika, kar je pričakovano in tudi pokazano. Odstopanja pri nižjih hitrostih so veliko večja od pričakovanih vrednosti. Glede na opravljene meritve in navajanje literature smo sklepali na druge potencialne vire pogreškov, razvrstili smo jih po velikosti vpliva od najvplivnejšega navzdol:

- način delovanja napisanega gonilnika,
- ostri robovi kvadra in nepravilne meritve na robovih,
- povečevanje premera laserskega žarka, če le-ta pade preveč izven merilnega območja,
- zračnost sklepov in dimenzijsko odstopanje dimenzij robota od navedenih,
- uporaba kinematičnih enačb za izračun planarnih koordinat robota,
- neznana vrednost zakasnitve med zajemom enkoderjev, vrednostjo laserskega merilnika ter časom preskoka nivoja obeh signalov napak.

Rezultati testiranj na referenčnem kvadru so razkrili težave izdelanega merilnega sistema na objektu z ostrimi robovi. V merilne namene bi bilo bolje uporabiti objekt z rahlo zaobljenimi robovi, kjer bi se izognili težavam v povezavi z načinom delovanja napisanega gonilnika in tudi težavam takih merilnikov na ostrih robovih.

## 7.1.4 Primerjalne meritve na testnih rešetkah

Meritve dimenzij z robotom oziroma koordinat robnih točk smo opravili tudi na samih objektih iz sive litine, na 42 rešetkah. Dobljene rezultate smo lahko neposredno primerjali s tistimi s koordinatnega merilnega stroja. Te (30 rešetk) smo kot utemeljitev razvoja merilnega sistema navedli v poglavju 3.

Slika 7.10 kaže največji absolutni pogrešek med srednjo vrednost koordinate v posamezni točki na vseh rešetkah in največjim odstopanjem v isti točki. Horizontalna os predstavlja številko merjene točke. Zaporedje točk je povsem enako tistemu pri kontaktnih meritvah. Vertikalna os predstavlja največji absolutni pogrešek glede na srednjo vrednost v milimetrih. Nadalje je podan tudi standardni odklon glede na srednje vrednosti (Slika 7.11). Horizontalna os enako predstavlja zaporedno številko merjene točke, vertikalna pa predstavlja standardno deviacijo v milimetrih. Povprečna vrednost standardnega odklona je 0.17 mm, kar je le malo več od vrednosti 0.13 mm pri kontaktnih meritvah. Zelo je podoben tudi največji standardni odklon 0.32 mm, pri kontaktnih meritvah ima vrednost 0.31 mm. Tudi absolutni pogreški glede na srednje vrednosti koordinat robov rešetke so



Slika 7.10: Absolutni pogrešek med mejnimi vrednostmi koordinate v posamezni točki



Slika 7.11: Standardni odklon vse<br/>h42kontaktno izmerjenih rešetk ${\bf v}$ posamezni točki

podobni kontaktnim meritvam, saj je srednja vrednost 0.8 mm. To je za 0.3 mm več kot pri kontaktnih meritvah, največje odstopanje je bilo kar 1.94 mm.

Na sliki 7.12 je izrisana porazdelitev pogreškov. Horizontalna os predstavlja pogrešek glede na srednjo vrednost določenih koordinat robnih točk, vertikalna pa normirano porazdelitev teh pogreškov s korakom 0.05 mm. Polna modra linija predstavlja idealno Gaussovo porazdelitveno krivuljo, ki se izredno lepo prilega ugotovljeni porazdelitvi pogreškov, kar demonstrira normalno porazdelitev dimenzij rešetk.



Slika 7.12: Porazdelitev pogreškov glede na povprečno vrednost koordinate točk

Ne glede na to, da nismo merili istih rešetk, se, gledano statistično, predstavljeni rezultati povsem ujemajo z referenčnimi kontaktnimi meritvami, saj so odstopanja minimalna. S tem je potrjena primernost sistema za opravljanje zahtevanih meritev koordinat robnih točk oziroma točk čiščenja z drugim obdelovalnim robotom. Potrjena je tudi hipoteza, da je referenčni kvader manj primeren za določanje merilnega pogreška izdelanega merilnega sistema z robotom in laserskim triangulacijskim merilnikom oddaljenosti. Rezultati na rešetki so pravzaprav potrdili kot primernejše objekte tiste z zaobljenimi robovi, nadalje še aproksimirane s polinomi, ki predstavljajo nekakšen filter in tako izboljšujejo rezultat.

## 7.2 Primer B: Spremljanje polnjenja diastata s polnilnim oljem

#### 7.2.1 Določanje nelinearnosti merilnika Keyence PT-165

Slika 7.13 prikazuje merilno karakteristiko merilnika Keyence PT-165, merjeno skupaj z mikrokrmilniškim sistemom v primerjavi s certificiranim mikrometrom. Na abscisni osi je vrednost mikrometra Mitutoyo, na ordinatni osi pa pogrešek merilnega sistema glede na mikrometer. Izrisane so štiri meritve, čeprav smo jih opravili več. Največji pogrešek znaša 17  $\mu$ m, meritve pa so izredno ponovljive, tudi v časovnem obdobju nekaj dni. Na sliki opazimo tudi črto črne barve, ki predstavlja polinomsko aproksimacijo navedenih štirih karakteristik. Uporabili smo polinom 4. stopnje z enačbo:



$$f(x) = 5 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0.0204 \cdot x + 0.000$$
(7.1)

Slika 7.13: Nekompenzirana merilna karakteristika merilnika Keyence PT-165

Omeniti velja, da je prikazana karakteristika določena na enem kompletu merilnega sistema in ni popolnoma enaka pri drugih kompletih merilnega sistema, zato omenjeni polinom ne opiše stanja merilne karakteristike vseh izdelanih kompletov. Skupno vsem kompletom je, da je mogoče vse merilne karakteristike dokaj dobro opisati s polinomom 4. stopnje. V predhodnih poglavjih smo omenili največji raztezek membrane v fazi polnjenja v območju 0.5 mm. Zato je potrebno pri ugotavljanju pogreška upoštevati merilno okno 0.5 mm in ne celotnega merilnega območja merilnika oddaljenosti. Glede na obliko karakteristike in okno 0.5 mm je pomembno kje v karakteristiki se to merilno okno nahaja. Če upoštevamo okno od 0.0 mm do 0.5 mm je pogrešek 11  $\mu$ m, pri oknu od 0.8 mm do 1.3 mm pa je pogrešek le 3  $\mu$ m. Ker so ti pogreški večji od želenih in zaradi ponovljivosti karakteristik, smo se odločili, za kompenzacijo nelinearnosti merilnika s polinomi.

S polinomom iz enačbe 7.1 smo kompenzirali izmerjene merilne karakteristike s slike 7.13 in rezultat kompenzacije narisali na sliki 7.14. Na abscisni osi so nanešene vrednosti mikrometra, na ordinatni pa pogrešek merilnega sistema glede na referenčni mikrometer. Rezultat kompenzacije z omenjenim polinomom je zelo dober, saj se pogrešek omeji znotraj območja 4  $\mu$ m, na celotnem merilnem področju 2 mm. Pri opazovanju pogreška znotraj okna 0.5 mm je pogrešek izredno majhen in znaša 2  $\mu$ m ali celo manj, kar povsem zadosti začetnim pogojem.

S temi meritvami smo pokazali zelo nelinearno merilno karakteristiko celotnega merilnega sistema in zato so merilni pogreški znatni ter preveliki. Tako je bilo potrebno pri vsakem nameščenem merilnem sistemu izmeriti karakteristiko in pri pogrešku večjem od 10  $\mu$ m, v mikrokrmilniški sistem vnesti koeficiente aproksimiranega polinoma ter karakteristiko



Slika 7.14: Kompenzirana merilna karakteristika merilnika Keyence PT-165

tako linearizirati. Kompenzacija je bila vključena na dveh polnilnih napravah, pri ostalih kompenzacije nelinearnosti ne uporabljamo.

## 7.2.2 Stabilnost merjenja fiksne razdalje z merilnikom Keyence PT-165

Meritve stabilnosti merjenja fiksne razdalje smo opravljali tako v laboratorijskih razmerah kot tudi v industrijskih prostorih, kjer smo testni merilni sistem namestili na eno izmed polnilnih naprav. Ker so razmere oziroma značilnosti merilnika pomembne le v industrijskih pogojih, podajamo samo rezultate iz teh prostorov.

Na sliki 7.15 je prikazana ena izmed pomerjenih karakteristik. Na abscisni osi je podan čas v urah, na vertikalni osi pa merjena fiksna razdalja v milimetrih. Meritve so v tem primeru trajale 4 ure. Temperatura se je spremenila od 22°C do 26°C. Pričeli smo jih zjutraj ob pričetku proizvodnje, kar razloži dvig temperature v prostoru.

Merjena fiksna razdalja se je zaradi vpliva temperature spremenila za 17  $\mu$ m, v času približno 1 ure. Ker je čas polnjenja enega diastata v povprečju pod 2 minutami, smo sklepali, da taka temperaturna odvisnost ne vpliva na kvaliteto merjenja. Poleg temperaturne stabilnosti smo s temi meritvami zajeli tudi morebiten vpliv drugih možnih vplivnih veličin. Kljub temu, da smo s konstrukcijo merilnega sistema hoteli vsaj delno



Slika 7.15: Stabilnost merjenja fiksne razdalje v proizvodnih prostorih

kompenzirati temperaturno odvisnost aluminija, je k spremembam fiksne razdalje prispevala tudi temperaturna odvisnost aluminija, ki ima linearni temperaturni koeficient  $\alpha$  enak 23·10<sup>-6</sup>/K, kar pri dolžini nosilca 147 mm predstavlja raztezek okrog 13  $\mu$ m.

### 7.2.3 Stabilnost merjenja fiksne razdalje s celotnim merilnim sistemom

Ker merilni sistem ne sestavlja le triangulacijski merilnik, smo stabilnost celotnega sistema morali preveriti predvsem v proizvodnih prostorih. Testiranja merjenja fiksne razdalje so trajala več dni, z vmesnimi prekinitvami.

Dve značilni karakteristiki sta zajeti na slikah 7.16 in 7.17. Na horizontalni osi je podan čas v urah, merjena razdalja v milimetrih pa na vertikalni osi. Meritve na sliki 7.16, v skupnem trajanju dobrih 10 ur kažejo, da obstaja lezenje merjenja fiksne razdalje. Najnižja vrednost je 1.795 mm, najvišja 1.813 mm, kar znaša 18  $\mu$ m razlike. Opaziti je tudi izrazito stopničasto spremembo merjene razdalje, ki pa je po vsej verjetnosti posledica vibracij in znaša 8  $\mu$ m.

Na sliki 7.17 je čas merjenja dobrih 8 ur, vendar pa je ta karakteristika veliko bolj zanimiva, saj je opaziti ne samo naraščanje merjene razdalje, ampak tudi zmanjševanje.



Slika 7.16: Stabilnost merjenja fiksne razdalje v proizvodnji s celotnim sistemom



Slika 7.17: Stabilnost merjenja fiksne razdalje v proizvodnji s celotnim sistemom

Prvotna merjena razdalja je znašala 0.790 mm, nato pa narasla na 0.810 mm. Ta sprememba znaša 20  $\mu$ m. Vendar se je v prostoru zaradi odprtja okna temperatura zelo hitro znižala, meritve so bile namreč opravljene v mesecu januarju. Pravila v podjetju sicer ne dovoljujejo odpiranja oken v prostoru s polnilnimi napravami, saj to neposredno vpliva na kvaliteto polnjenja. Ker smo poznali čas začetka meritev smo lahko tudi določili, da se je dogodek z odprtim oknom zgodil malce pred menjavo dopoldanske in popoldanske izmene. Tako se je merjena razdalja spremenila z 0.806 mm na 0.791 mm, razlika je 15  $\mu$ m. Sprememba se je zgodila v 20 minutah, nato so delavci okno zaprli in temperatura ter s tem tudi razdalja se je povrnila na prejšnjo vrednost.

Te meritve so nazorno pokazale, da je merilni sistem temperaturno občutljiv, vendar v veliko daljših časovnih intervalih, kot sta omenjeni 2 minuti. Meritve so demonstrirale možne velike težave zaradi odpiranja oken, kar vpliva na temperaturo polnilnih olj in še bolj utemeljuje potrebo po izdelavi avtomatskega merilno-regulacijskega sistema za nadzor polnjenja diastatov.

# 7.2.4 Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami sprotne kontrole in preverjanje pravilnosti enačb

Predhodne meritve so potrdile ustreznost začrtanega in izdelanega merilnega sistema. S tem sistemom pa še ni bila posneta niti ena polnilna karakteristika, kaj šele, da bi meritve primerjali z rezultati končne kontrole. V nadaljevanju smo opravili serijo meritev, kjer smo ob predhodno izračunanem polnilnem tlaku zajemali polnilno karakteristiko. Na sliki 7.18 je podana ena posneta polnilna karakteristika za tip diastata 715-622. Na sliki vidimo izredno lep primer zapiranja izven glave, kjer po zaprtju ventilov, ko karakteristika močno poskoči, sledi puščanje olja, do faze stiskanja s kleščami. Na abscisni osi ni prikazan čas, ampak zaporedni vzorec, pri frekvenci zajema 5 Hz, ki se je izkazala kot premajhna in je bila naknadno povečana na 20 Hz. Raztezek membrane v milimetrih je na vertikalni osi. Polnilni tlak je bil 3.1 bar in temperatura polnilnega olja 24.3°C. Raztezek membrane po točkanju je bil 0.121 mm. To vrednost je potrebno spremeniti oziroma zmanjšati za 0.01 mm, zaradi povesa membrane in neposredne primerjave, s hodom nazaj, izmerjenim v končni kontroli. Torej je raztezek 0.111 mm. Isti diastat je bil pomerjen tudi v končni kontroli, kjer je bil izmerjen hod nazaj 0.100 mm. Ta nakazuje na preveliko vrednost izračunanega tlaka, vendar smo s tem pokazali, da so pravilni tako merilni sistem kot tudi enačbe za izračun polnilnega tlaka.



Slika 7.18: Meritev številka 7 - celotna polnilna karakteristika diastata



Slika 7.19: Meritev številka 13 - celotna polnilna karakteristika diastata



Slika 7.20: Primerjava meritev hoda nazaj med izdelanim sistemom in končno kontrolo

Za primerjavo podajamo na sliki 7.19 rezultat teh testiranj še za diastat številka 13 s polnilno karakteristiko. Temperatura polnilnega olja je bila 24.7°C. Izmerjen raztezek je bil 0.098 mm, po preračunu torej 0.088 mm. V končni kontroli izmerjen hod nazaj je bil 0.080 mm, kar je zopet potrdilo ustreznost pristopa. Iz slednje karakteristike smo prepoznali tudi druge učinke sistema. Lepo se npr. vidi slabo mehansko zapiranje, saj pred električnim točkanjem prihaja do puščanja olja iz diastata.

Na sliki 7.20 podajamo primerjavo med meritvami hoda nazaj z našim izdelanim sistemom in končno kontrolo. Razlog za podajanje rezultata za samo 8 napolnjenih diastatov od skupno 16 v tej seriji je v puščanju 8 diastatov, kot posledica slabega mehanskega stiskanja s kleščami. Primerjava ekstremnih izmerjenih vrednosti končne kontrole pove, da je območje hodov od 0.05 mm do 0.10 mm. Območje izmerjenih vrednosti hoda nazaj z izdelanim sistemom pa sega od 0.07 mm do 0.11 mm, kar je praktično identičen rezultat.

## 7.2.5 Vpliv zaščitnega stekla na meritve s triangulacijskim merilnikom oddaljenosti

V ohišje za zaščito merilne glave PT-165, torej pred obe leči, je potrebno namestiti ustrezno steklo. Le tako lahko merilnik zaščitimo pred vplivom polnilnega olja. Da bi preverili vpliv stekla na meritve, smo naredili povsem identične poskuse in postopke tistim pri ugotavljanju nelinearnosti merilnika, vendar z dodanim steklom. Za definiranje prave debeline stekla smo testirali stekla debelin 0.3 mm, 0.5 mm, 1.0 mm in 1.5 mm.

Steklo vsake debeline vpliva na žarek svetlobe. Prej nastavljena razdalja 0 mm se spremeni, zato jo je bilo potrebno nastaviti z ustreznim potenciometrom na krmilniku, v tem primeru 0-ADJ. Želja, da bi uporabili najdebelejše steklo, ki bi bilo mehansko najodpornejše na vplive okolja, ni bila uresničena, saj pri debelini stekla 1.5 mm ni bilo več mogoče nastaviti želenega merilnega območja 2.000 mm. Pri ostalih treh steklih je nastavitev območja možna, zato smo se odločili za uporabo stekla debeline 1.0 mm. To steklo je namenjeno za uporabo v medicinskih laboratorijih (analiza krvi) in je hitro dobavljivo. Analiza nelinearnosti je pokazala, da se merilna karakteristika po obliki prav nič ne razlikuje od predhodno navedenih in lahko za njeno kompenzacijo še vedno uporabljamo že opisano metodo s polinomom 4. stopnje. Potrebno se je zavedati, da je fiksna razdalja med merilnikom in steklom odločilnega pomena za čim manjši merilni pogrešek, saj ta razdalja neposredno vpliva na položaj pike na sprejemnem elementu. Zato je potrebno periodično preverjanje in kompenzacija merilne karakteristike merilnikov, kar smo na kratko opisali na koncu poglavja 5.

Na sliki 7.21 vidimo na polnilno napravo nameščen merilnik zaprt v kovinsko ohišje z dodanim steklom. Na tej sliki se tudi izredno lepo vidi nastavek za mehansko vpetje membrane in tudi dve magnetni stikali, na sliki skrajno desno.



Slika 7.21: V kovinsko ohišje s steklom zaprta merilna glava merilnika Keyence

# 7.2.6 Posredno preverjanje meritev raztezka s statističnimi meritvami končne kontrole

Kot smo že v prejšnjih poglavjih omenili, se je v preteklosti, zaradi nadzora kvalitete napolnjenosti diastatov, statistično preverjalo tako hode nazaj kot hode naprej v končni kontroli. Kljub avtomatskemu sistemu za merjenje raztezkov membrane in spreminjanju polnilnega tlaka v fazi polnjenja na rotirajočih polnilnih napravah ta nadzor še vedno ostaja in je edini referenčni način za preverjanje kvalitete polnjenja. Ker je sistem preverjanja končne kontrole računalniško podprt in se vse meritve beležijo v podatkovno bazo, je mogoče za nekaj let nazaj pregledovati merjene parametre. Uporabili smo to bazo ter tako v nadaljevanju primerjamo rezultate kvalitete napolnjenosti diastatov glede na časovna obdobje, v katerih so se, za izboljšanje kvalitete, vpeljevala različna sredstva in mehanizmi.

Prvi diastat v primerjavi je tip 715-601. Na sliki 7.22 vidimo izmerjeni hod nazaj za obdobje od 1.1.2006 do 31.12.2006, ko ni bilo ne grupiranja membran ne predstavljenega merilnega sistema. Abscisna os predstavlja izmerjeni hod nazaj v milimetrih, ordinatna pa število vzorcev. Pri vseh nadaljnjih diagramih je pomen osi enak. Število vzorcev je 7067, s srednjo vrednostjo 0.084 mm in standardnim odklonom 0.027 mm. Potrebno je



Slika 7.22: Diastat 715-601, od 1.1.2006 do 31.12.2006, izven glave



Slika 7.23: Diastat 715-601, od 1.2.2007 do 31.8.2007, izven glave, grupiranje membran

pojasniti, da so dejanske vrednosti slabše, saj meritve končne kontrole ne predvidevajo hodov višjih, od 0.12 mm, čeprav bi se ob nižji kontrolni temperaturi nekatere membrane še bolj stisnile.

Iz slike 7.22 za leto 2006 je očitno, da so raje nastavljali višje polnilne tlake, saj so tako imeli manjše število premalo napolnjenih diastatov. Zato je celotna porazdelitev zelo pomaknjena v desno. Največje število izmerjenih diastatov je imelo hod nazaj 0.10 mm, je pa tudi veliko število tistih premalo napolnjenih, zato so neuporabni.

Zaradi slabše kvalitete napolnjenosti so v proizvodnji na prehodu v leto 2007 vpeljali t.i. grupiranje membran. Izboljšanje kvalitete napolnjenosti diastatov kaže tudi slika 7.23, za obdobje od 1.2.2007 do 31.8.2007. Testiranih je bilo skupno 5531 diastatov, srednja vrednost hoda nazaj je 0.068 mm s standardnim odklonom 0.024 mm. Opazen je pomik karakteristike proti želeni vrednosti 0.05 mm, vendar je njena širina še vedno prevelika. Na sliki 7.24 so prikazani rezultati meritev končne kontrole za obdobje od 1.11.2007 do 30.4.2008, ko je bil skupaj z grupiranjem membran že vpeljan tukaj opisan merilni sistem. Izmerjenih je bilo skupno 7458 diastatov, srednja vrednost meritev pa je 0.064 mm s standardnim odklonom 0.020 mm. Karakteristika je tako dobila obliko normalne porazdelitve,

kar je bila tudi želja ob pričetku projekta. Pojasniti moramo tudi obstoj vzorcev diastatov



Slika 7.24: Diastat 715-601, od 1.2.2007 do 31.8.2007, izven glave, grupiranje membran, merilno/regulacijski sistem

povsem na levi strani slike 7.24. Njihovo število je dovolj majhno, da ne zahteva 100 % kontrole izdelkov. Pojavljajo se tudi povsem prazni diastati, kot posledica popolnega spuščanja v nekaterih situacijah na polnilni napravi ali kot posledica slabega mehanskega zapiranja diastatov. Potrebno je tudi še enkrat povedati, da se meritev opravlja na samo eni polnilni glavi in ne na vseh. Vsi predstavljeni rezultati meritev na diastatu 715-601 so za način polnjenja izven glave. Zato so ti rezultati, tudi po besedah naročnika sistema, izredno zadovoljivi in povsem ustrezajo na začetku zastavljenemu cilju.

Ker se izdelujejo različni tipi diastatov z različnimi tipi polnilnih olj, podajamo še druge rezultate končne kontrole hoda nazaj. V zelo velikih količinah se izdeluje tudi tip diastata 715-680. Na sliki 7.25 je izrisan izmerjeni hod nazaj za obdobje od 1.1.2006 do 31.12.2006. Način polnjenja je v glavi, ki pomeni boljšo kvaliteto polnjenja, vendar je način tudi dražji od načina izven glave. Premerjenih je bilo skupno 8827 diastatov, srednja vrednost hoda nazaj je 0.082 mm s standardno deviacijo 0.026 mm. Ti rezultati so zelo podobni kot pri tipu 715-601 v istem obdobju.

Za razliko od tipa 715-601, ki se jih je polnilo v letu 2007 z upoštevanjem grupiranja membran, tega obdobja za tip 715-680 ni bilo. Tako slika 7.26 kaže kar rezultate z grupiranjem in vpeljanim merilno/regulacijskim sistemom. V obdobju od 12.6.2007 do 10.10.2007 je bilo preverjenih skupno 4938 diastatov. Srednja vrednost meritev je 0.05 mm s standard-



Slika 7.25: Diastat 715-680, od 1.1.2006 do 31.12.2006, v glavi



Slika 7.26: Diastat 715-680, od 12.6.2007 do 10.10.2007, v glavi, grupiranje membran



Slika 7.27: Diastat 715-680, od 1.12.2007 do 30.4.2008, izven glave, grupiranje membran skupaj, merilno/regulacijski sistem

nim odklonom 0.018 mm. Ti rezultati zopet kažejo omogočene pravilne napolnjenosti diastatov z merilno/regulacijskim sistemom. Karakteristika je sicer za 0.01 mm preveč pomaknjena v levo, vendar je kljub temu povsem praznih zelo malo.

Vsi dosedaj predstavljeni rezultati za tip 715-680 so za način polnjenja v glavi. Ta način je dražji od načina izven glave, zato so se v podjetju odločili, da bi spremenili način polnjenja in tako privarčevali na strošku materiala. Rezultate za ta način polnjenja, skupaj z grupiranjem in vpeljanim sistemom kaže slika 7.27 za obdobje od 1.12.2007 do 30.4.2008 s skupnim številom 8553 premerjenih diastatov. Doseženi srednja vrednost 0.053 mm in standardna deviacija 0.017 mm nista prav nič slabši od polnjenja v glavi. Večje je le število tistih premalo napolnjenih ali celo praznih, vendar so v podjetju ocenili, da je dodatni strošek zaradi teh nižji od stroška privarčevanega na račun materiala.

Da je mogoče tudi pri drugih tipih diastata preiti na polnjenje izven glave, kaže nadaljnji primer za tip 715-612. Na sliki 7.28 so podani rezultati za leto 2006 z načinom polnjenja v glavi. Premerjenih je bilo skupno 3119 diastatov, srednja vrednost meritev je enaka 0.093 mm in standardni odklon 0.018 mm. Tudi ti rezultati potrjujejo, da so bile porazdelitve na vseh do sedaj predstavljenih tipih skoraj identične in močno pomaknjene na desno.



Slika 7.28: Diastat 715-612, od 1.1.2006 do 31.12.2006, v glavi



Slika 7.29: Diastat 715-612, od 1.2.2007 do 30.9.2007, v glavi, grupiranje membran



Slika 7.30: Diastat 715-612, od 1.12.2007 do 1.3.2008, izven glave, grupiranje membran skupaj, merilno/regulacijski sistem

Da je grupiranje membran rezultate malenkostno izboljšalo, vendar ne v zadovoljivem obsegu, kaže slika 7.29. Ti rezultati so dobljeni s 6385 pomerjenimi diastati. Srednja vrednost je 0.075 mm in standardni odklon 0.023 mm in veljata za obdobje od 1.2.2007 do 30.9.2007.

Izboljšanje kvalitete napolnjenosti diastatov z vpeljavo merilnega in regulacijskega sistema zopet kaže slika 7.30, z rezultati končne kontrole hoda nazaj za obdobje od 1.12.2007 do 1.3.2008. V tem obdobju je bilo pomerjenih 1171 diastatov, srednja vrednost je bila enaka 0.057 mm, standardni odklon pa 0.013 mm. Poleg izrednega izboljšanja statističnih podatkov je potrebno omeniti, da so predstavljeni rezultati za način polnjenja izven glave. Tako smo še enkrat pokazali ob uporabi sistema ne samo dvig kvalitete, ampak tudi velik prihranek, kar po ocenah proizvajalca pomeni nekaj tisoč evrov letno pri materialu na tip diastata.

Ker je naročnik ugotovil, da je z izdelanim sistemom mogoče tudi veliko privarčevati, je poskusil z enim tipom diastata iz ročnega polnjenja preiti na polnjenje na polnilnih napravah. To so vpeljali za tip diastata 715-697, ki se ga tudi izdeluje v zelo velikih količinah. Pri njem hod nazaj ne sme biti nikoli višji od 0.12 mm, poleg tega pa je tudi zelo temperaturno občutljiv. Pomembna informacija je tudi sama temperatura zapiranja 40°C. To pomeni izredno majhne polnilne hode pri nižjih temperaturah. Ti hodi se gibljejo okrog 0.05 mm pri temperaturi polnilnega olja 27°C. Ti parametri do sedaj niso omogočali



Slika 7.31: Diastat 715-697, od 1.1.2006 do 31.12.2006, ročno polnjenje



Slika 7.32: Diastat 715-697, od 4.2.2008 do 23.5.2008, izven glave, grupiranje membran skupaj, merilno/regulacijski sistem

polnjenja na rotirajočih polnilnih napravah, zato je naročnik uporabljal veliko dražji in počasnejši ročni način polnjenja. Na sliki 7.31 vidimo porazdelitev merjenega hoda nazaj za leto 2006 še z ročnim polnjenjem. Karakteristika je za 0.01 mm celo prenizka, vendar ni nobenih povsem praznih, tudi največja vrednost je le 0.09 mm, torej daleč od zgornje dovoljene meje 0.12 mm. Pomerjenih je bilo 12457 diastatov, srednja vrednost je enaka 0.040 mm, standardni odklon pa 0.013 mm.

Slika 7.32 prikazuje rezultate končne kontrole za omenjeni tip diastata polnjen izven glave, za obdobje od 4.2.2008 do 23.5.2008 in število pomerjenih 3514 diastatov. Srednja vrednost je enaka 0.058 mm, standardni odklon pa 0.020 mm. Karakteristika je širša od karakteristike pri ročnem polnjenju, vendar je srednja vrednost blizu želeni vrednosti. Ta način polnjenja povsem po pričakovanjih povzroča tudi prazne in manj napolnjene diastate ter tudi nekaj preveč napolnjenih. Ti rezultati so slabši od ročnega zapiranja, vendar je strošek polnjenja veliko nižji, zato se je naročnik odločil, da bo ta tip diastata tudi v prihodnje polnil na rotirajočih polnilnih napravah, opremljenih z merilnim in regulacijskim sistemom.

#### 7.2.7 Meritve raztezka membran s kovinsko ploščico

Prve testne meritve merjenja razdalje med merilnikom Keyence in testnim mehanskim premičnim sistemom z nameščeno kovinsko ploščico smo opravljali povsem enako kot s keramičnim gumbom. Te meritve niso bile opravljene z dodanim steklom. Na keramični gumb smo prilepili kovinsko ploščico in tako simulirali drug tip membrane. Tako smo pomerili merilno karakteristiko merilnega sistema na štirih kovinskih ploščicah. Rezultati so podani na sliki 7.33 in v tabeli 7.6. Odvisnost je na prvi pogled zelo linearna, čeprav temu ni čisto tako. Pogrešek se namreč z odmikom od merilnika veča. Izračun je pokazal, da je merilni pogrešek na območju merjenja izdelanega merilnega sistema 2.000 mm znašal 0.254 mm. Če smo spremljali le polovico tega področja, torej samo 1.000 mm, je ta pogrešek manjši in znaša 0.090 mm.



Slika 7.33: Primerjava meritev na kovinski ploščici brez njenega naklona

Testiranja so potrdila navajanja literature, da triangulacijski merilniki ne merijo razdalje pravilno na objektih z visoko zrcalno oziroma zelo sijočo površino. Kljub temu bi bilo mogoče uporabiti samo področje merjenja merilnika, kjer je pogrešek najmanjši, čeprav bi s tem dosegli večje področje pogreška od želenega. Definirano področje bi bilo mogoče zagotoviti z ustrezno namestitvijo mehanskega vpetja za membrano na sami polnilni napravi. Na tem mestu bi še enkrat omenili vrednost teoretičnih raztezkov membran med polnjenjem do 0.5 mm, dejansko pa so ti nižji in običajno ne presežejo 0.2 mm.

Po navodilih proizvajalca smo poskušali izboljšati merjenje tudi z naklonom merilnika, kar naj bi popravilo merilne karakteristike triangulacijskih merilnikov pri merjenju razdalje

Kovinska ploščica št. 1		Kovinska ploščica št. 2		
Mikrometer (mm)	Merilni sistem (mm)	Mikrometer (mm)	Merilni sistem (mm)	
0.000	0.000	0.000	0.000	
2.000	-	2.000	2.022	
1.811	2.000	1.882	2.000	
0.910	1.000	0.916	1.000	

Kovinska ploščica št. 3		Kovinska ploščica št. 4		
Mikrometer (mm)	Merilni sistem (mm)	Mikrometer (mm)	Merilni sistem (mm)	
0.000	0.000	0.000	0.000	
2.000	-	2.000	-	
1.746	2.000	1.826	2.000	
0.947	1.000	0.919	1.000	

Tabela 7.6: Primerjava meritev na kovinski ploščici brez njenega naklona

do zrcalnih objektov. Ker obstoječi mehanski sistem ni omogočal naklona merilne glave, smo nagnili ploščico. Naklon je znašal okrog 15°, saj je kot med oddanim in sprejetim žarkom 30°. Proizvajalec ne navaja točno, kakšen bi moral biti ta naklon. Tega podatka ravno tako nismo zasledili nikjer v literaturi ali pri drugih proizvajalcih triangulacijskih merilnikov.

Slika 7.34 kaže izmerjene vrednosti ob nagibu. Takoj prepoznamo, da ni opazne nobene razlike glede na predhodno omenjene meritve, kjer kovinska ploščica ni bila nagnjena. De-



Slika 7.34: Primerjava meritev na kovinski ploščici z njenim naklonom

loma so bile meritve vseeno bolj ponovljive kot tiste brez naklona. Na območju merjenja izdelanega merilnega sistema 2 mm je bil merilni pogrešek okrog 0.2 mm, če pa primerjamo polovico merilnega območja, torej 1 mm, je pogrešek okrog 0.1 mm.

Tudi nagnjena ploščica ni dala zadovoljivih rezultatov v smislu merilnega pogreška glede na referenčni mikrometer, čeprav so bila nihanja izmerjenih vrednosti manjša. Takoj se takoj nudi možnost, da bi izmerili karakteristiko s kovinsko ploščico in jo kompenzirali s polinomom, vendar je trenutno zaradi zasnove mikrokrmilniškega sistema povsem neizvedljivo, da bi imeli dve različni kompenzacijski karakteristiki. Temu dejstvu govori v prid tudi to, da je ponovljivost meritev na kovinski ploščici veliko slabša kot na keramičnem gumbu in tudi kompenzacija merilnega pogreška ne bi imela zadostnega učinka.

Kot smo zgoraj že omenili, je običajen raztezek membran s kovinsko ploščico do 0.2 mm, kar bi predstavljalo merilni pogrešek pri ploščici brez naklona okrog 0.02 mm. Zato je bil izdelan poseben nastavek za membrane s kovinsko ploščico. Sledilo je poskusno polnjenje, s čimer bi preko končne kontrole dejansko ocenili nastali pogrešek. Rezultati teh meritev so presenetljivi, saj glavni regulacijski program večino meritev zavrne kot neveljavne. Takoj ob pričetku raztezka membrane namreč pri večini testiranih diastatov prihaja do negativnega prenihaja. Primer je viden na sliki 7.35, kjer je prikazana krivulja črne barve z nihajem okrog 0.015 mm. Možno je, da se ob pričetku raztezanja membrana nekoliko nagne v eno stran, kar vpliva na premik zrcalne komponente svetlobe. Primerjava raztezkov takih diastatov s tistimi brez prenihaja pokaže, da so bili hodi prenizki približno za velikost prenihaja. To potrjuje nagib membrane v eno stran in nadaljnje raztezanje s



Slika 7.35: Polnilne karakteristike diastatov z membranami s kovinsko ploščico z izrazitim prenihajem

tem naklonom tudi naprej. Število takih membran je v testirani skupini tolikšno, da ni bilo mogoče opraviti niti testiranja hoda naprej in nazaj v končni kontroli. Situacija na sliki, kjer je med tremi diastati le ena meritev napačna, je izredno redka. Pri karakteristikah brez nihajev je raztezek znotraj ustreznega dimenzijskega območja. Tak nihaj se, vendar izredno redko, pojavi tudi pri membranah s keramičnim gumbom, kjer pa difuzna razpršitev žarka na keramiki očitno kompenzira rahel naklon gumba.

Vsa testiranja, predvsem pa slednja na polnilnih napravah, so pokazala, da s trenutnim merilno/regulacijskim sistemom ni mogoče dobro meriti raztezkov membran s kovinsko ploščico. Tako se je naročnik odločil za začasno dodatno nameščanje keramičnih gumbov z magnetom na merjene membrane s kovinsko ploščico (Slika 7.36). V trenutku pisanja tega dela je ta način že preizkušen, vendar se zaradi ugotovljene neprimernosti razmišlja tudi o drugih rešitvah. Ta potekajo v smeri sprotnega barvanja ploščice z rdečo barvo, kar je že bilo potrjeno kot zadovoljivo, kot tudi v smeri izbire drugega merilnika, ki bi ustrezal zahtevam ter hkrati povzročil čim manjše spremembe celotnega merilno/regulacijskega sistema.



Slika 7.36: Keramični gumb z magnetom kot nastavek za membrane s kovinsko ploščico

## 8 Sklepi in ugotovitve

Zahteve pri izvedbi obeh nalog so bile podane s strani naročnika projektov zelo striktno, saj neposredno vplivajo na kvaliteto izdelkov, izmet v proizvodnji in posledično na stroške proizvodnje. Kljub temu nam je uspelo v obeh opisanih primerih definirati ustrezne pristope, najti pravo strojno opremo, napisati ustrezno programsko opremo in s primernimi testiranji sklopov povezati dele v celovit in delujoč sistem.

Kot primer hitrega brezkontaktnega merilnega sistema dimenzij v zelo zahtevnem industrijskem okolju livarne smo izdelali merilni sistem z uporabo laserskega triangulacijskega merilnika oddaljenosti in štiriosnega industrijskega robota. S tem smo povečali merilno področje merilnika na celoten delovni prostor robota. Neustrezno in nekonstantno frekvenco zajema koordinat robota in laserskega merilnika oddaljenosti v okolju Windows smo s 100 Hz povečali na 500 Hz. S tem smo omogočili hitrejše izvajanje meritev dimenzije rešetke iz sive litine, končno je bilo potrebnih samo 45 sekund za celotno izmero dimenzije, s kontaktnim merilnim strojem pa je bil čas enak 7 minut. Tako smo dosegli zastavljeni cilj, ki je narekoval zgornjo časovno mejo 1 minute, to je bilo pogojeno z ekonomskimi izračuni s strani naročnika. Za pohitritev sistema je bilo potrebno napisati poseben programski gonilnik, ki teče v jedru operacijskega sistema Windows, in tudi ustrezne komunikacijske knjižnice. Za čim točnejšo določitev točk čiščenja rešetke in tudi zaradi merilne nedosegljivosti teh področij smo vsak rob rešetke aproksimirali s polinomi. Uporabili smo polinome 4., 6. ali 8. stopnje, kjer je bilo število aproksimacijskih točk variabilno. Ta metoda se je izkazala kot izredno učinkovita, saj so primerjalni rezultati določanja dimenzij rešetk med izdelanim sistemom in kontaktnimi meritvami pokazali izredno majhna odstopanja. Povprečni standardni odklon se je razlikoval le za 0.04 mm. Ustreznost sistema se je pokazala tudi med testiranji čiščenja rešetk, kar potrjuje tudi 93 izredno lepo očiščenih rešetk. Z rezultatom je bil prav tako izredno zadovoljen tudi naročnik.

Najbolj nazorno smo učinkovitost merilnega sistema demonstrirali s samim čiščenjem rešetk, vendar smo opravili tudi testiranja za določanje merilnega pogreška s posebnim referenčnim kvadrom z ostrimi pravokotnimi robovi. Ta je bil predhodno premerjen s koordinatnim strojem, zato smo te meritve obravnavali kot prave vrednosti dimenzije. Testiranja na kvadru so pokazala, da je bilo območje pogreška pri hitrosti skeniranja rešetke 50 mm/s enako  $\pm 0.3$  mm, kar je bilo več od zastavljene meje pogreška  $\pm 0.2$  mm.

Natančnejša analiza je pokazala, da je glavni vir pogreška sam način delovanja napisanega gonilnika, kar pa se edino kaže na ostrih robovih, na rešetkah pa tega vpliva ni. Zato je zaključek testiranj tudi manjša primernost referenčnega objekta z ostrimi robovi, bolj primerno bi bilo uporabiti objekt z zaobljenimi robovi. Ob tem bi lahko uporabili polinomsko aproksimacijo robnih točk, s čimer bi bilo možno izračunati robno točko na poljubni vertikalni razdalji od vrhnjega nivoja. Tak referenčni objekt bi po našem mnenju zagotovil veliko ožje območje merilnega pogreška, vendar pa ga povsem odpravil ne bi.

Predstavljeni sistem je bil izdelan kot podsistem večjega projekta za čiščenje rešetk iz sive litine. Celoten projekt je bil izveden do prototipnega testiranja, ki bi ga lahko neposredno vpeljali v proizvodnjo. Načrtovan je bil za vpeljavo v zahtevno industrijsko okolje, pri čemer pa bi bilo potrebno določene sklope še dodatno zaščitit pred vplivi okolja, predvsem prahu. Naročnik se, kljub delovanju sistema, ni odločil za proizvodnjo testiranih rešetk. Pristop merjenja bi bil lahko uspešno uporabljen tudi v drugih industrijskih aplikacijah, npr. v dimenzijskih meritvah drugih objektov ali preverjanju pravilnosti sestavljanja delov izdelkov. V takšnem primeru bi bilo smiselno vpeljati tudi način za samodejno preverjanje merilnih karakteristik robotskega merilnega sistema. Za to bi lahko uporabili že predlagano obliko referenčnega objekta z znanimi dimenzijami in z zaobljenimi robovi. Objekt bi moral biti postavljen v delovnem področju robota trajno. Le tako bi lahko zagotovili periodično avtomatsko preverjanje merilnega sistema.

Kot drugi primer brezkontaktnih meritev v zahtevnem industrijskem okolju, ki pa so morale biti izredno točne, navajamo merjenje raztezka membrane diastata s keramičnim gumbom v fazi njegovega polnjenja s polnilnim oljem na obstoječih polnilnih napravah. Naročnik je podal mejni pogrešek le  $\pm 5 \ \mu$ m. Današnji brezkontaktni merilniki omogočajo veliko točnejše meritve, vendar je bilo potrebno najti ustrezno strojno merilno opremo, ustrezne velikosti, točnosti in tudi varnosti za delavce. Tako smo uporabili triangulacijski optični merilnik oddaljenosti, ustrezen po dimenzijskih in merilnih karakteristikah, ki namesto laserske svetlobe uporablja človeku nenevarno navadno LED tehnologijo.

Meritve je bilo potrebno prenesti tudi na osrednji nadzorni računalnik, zato je bil izdelan povsem namenski mikrokrmilniški sistem za zajem in digitalizacijo analognega izhoda merilnika. Načrtovanje mikrokrmilniškega sistema je bilo izredno skrbno, saj je v verigi izvajanja meritev in ga je potrebno obravnavati skupaj z merilnikom. V ta sklop spada tudi namensko napisana programska oprema, ki teče v mikroprocesorju in skrbi za pravilen zajem meritev, njihovo obdelavo ter tudi za pravilno posredovanje le-teh. V merilni verigi je kot naslednji pomemben člen namenska programska oprema na centralnem nadzornem računalniku, kjer smo med drugim vgradili tudi nujno možnost za periodično preverjanje merilnega pogreška s posebnim kalibracijskim objektom. Opravili smo niz testiranj, ki so pokazala, da je karakteristika merilnika, skupaj z mikroprocesorskim sistemom, izredno nelinearna in na želenem merilnem področju 0.5 mm lahko znatno vpliva na merilni pogrešek, in sicer kar 5  $\mu$ m. Zato je v mikroprocesorski sistem vgrajena možnost kompenzacije nelinearnosti s polinomom 4. stopnje. Temu je predhodno potrebno, s posebnim postopkom, določiti koeficiente in jih vnesti v kompenzacijski sistem. Tak pristop se je izkazal kot izredno učinkovit, saj smo na področju 2 mm dosegli mejo pogreška  $\pm 2 \ \mu$ m in tako izredno izboljšali merilno karakteristiko kupljenega merilnika ter le tako lahko zagotovili želene mejne pogreške.

Ker proizvajalec ni podajal še drugih parametrov, je bilo nadalje potrebno merilni sistem preveriti glede stabilnosti na vplivne veličine, predvsem temperature, v proizvodnih prostorih. Že v poskusnem delovanju je bilo potrebno merilnik zaščititi pred vplivi polnilnega olja. Način zaščite s strani proizvajalca ni bil podan, zato smo opravili niz testiranj z uporabo različnih zaščitnih stekel in tako primerno zaščitili merilno glavo.

Pravilnost meritev raztezka membrane s keramičnim gumbom in celotne verige merilno/regulacijskega sistema ponazarjajo tudi rezultati končne kontrole kot edino referenčno merilo kvalitete polnjenja. Z merili v metrološki verigi je bilo pokazano, da so statistični rezultati povsem v zastavljenih mejah oziroma vidno je izredno izboljšanje glede na stanje v proizvodnji pred vpeljavo sistema. Merilni sistem je izredno izboljšal kvaliteto napolnjenosti diastatov, zato so se pokazale tudi druge prednosti:

- zmanjšanje izmeta diastatov ter zmanjšanje potrebnega obsega kontrole hodov diastatov,
- možnost prehoda polnjenja nekaterih tipov diastatov iz ročnega polnjenja na bolj ekonomično polnjenje na rotirajočih polnilnih napravah,
- možnost prehoda na polnjenje nekaterih tipov diastatov na način izven glave, kar se odraža pri prihranku materiala in manjšem izmetu termostatov na justiranju ter posledično manjšem obsegu popravil.

Po ocenah naročnika je trenutni skupni prihranek iz naslova zgornjih doprinosov na letnem nivoju v najslabšem primeru 133.000 EUR. Ti rezultati se vsi nanašajo na membrane diastata s keramičnim gumbom iz družine 55.17. V proizvodnji pa so tudi membrane z zelo sijočo kovinsko ploščico kot površino, na katero pada žarek merilnika. Poskusi so odkrili kar nekaj resnih težav pri merjenju takih membran, vendar v času pisanja dela poteka nadaljnja analiza in testiranja novih pristopov za morebitno zmanjšanje težav.

## 9 Viri in literatura

- Bergelj, F., "Meritve 1. del", 3. izdaja, Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1997.
- [2] Rejc, J., "Robotizirano raziglenje odlitka rešetke za plinski štedilnik", magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Julij 2005.
- [3] "Time, Weights, And Measures: How Did The Yard As A Unit Of Measurement Originate?", Science Fact Finder, Ed. Phillis Engelbert, UXL-Gale, 1998.
- [4] Alder, K., "The measure of all things: The Seven-Year Odyssey and Hidden Error That Transformed the World", 2002, ISBN:074321675X, Free Press, New York, USA.
- [5] Urad RS za meroslovje (MIRS), "Mednarodne meroslovne organizacije; Metrska konvencija (Convention du Metre)", http://www.mirs.gov.si/, 2008.
- [6] Strnad, J., "Fizika 3, Posebna teorija relativnosti, kvantna fizika, atomi", 2. natis, Državna založba Slovenije, Ljubljana, 1982.
- [7] M. C. Lu, Wei-Yen Wang, C. Y. Chu, "Image-Based Distance and Area Measuring Systems", IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 2, pp. 495-503, April 2006.
- [8] Shen, T. S., Huang J. and Menq, C. H., "Multiple-Sensor Integration for Rapid and High-Precision Coordinate Metrology," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, no. 2, pp. 110-121, June 2000.
- [9] Sansoni, G., Carocci, M., Rodella, R., "Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 49, no. 3, pp. 628-636, June 2000.
- [10] Gapinski, B. Rucki, M., "Uncertainty in CMM Measurement of Roundness", AMUEM 2007 - International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement Sardagna, Trento, Italy, 16-18 July 2007.
- [11] Haitjema, H., Pril, W., Schellekens, P.H.J., "A silicon-etched probe for 3-D coordinate measurements with an uncertainty below 0.1 μm", IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 50, no. 6, December 2001.
- [12] Sato, O., Ishikawa, H., Hiraki, M., Takamasu, K., "The Calibration of Parallel-CMM: Parallel-Coordinate Measuring Machine", Proceedings of the 3rd euspen International Conference, pp. 573-576, Eindhoven, Holland, May 2002.
- [13] "Manufacturing Engineering", June 2003, vol. 130, no. 6.
- [14] International Standard ISO 10360-2, "Geometrical Product Specifications (GPS)
   Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) Part 2: CMMs used for measuring size", International Organization for Standard ization, Geneva, 2001.
- [15] Bradshaw, G., "Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques", Image Synthesis Group, Trinity College Dublin, 1998-1999.
- [16] Nguyen, Hoa G., "A Simple Method for Range Finding via Laser Triangulation," Technical Document 2734. San Diego, CA: Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, RDT&E Division, January 1995.
- [17] "2007 Sensors; Vision, Measurement & Microscope", Keyence 2006.
- [18] Curless, B., Levoy, M., "Better optical triangulation through spacetime analysis", Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 987-994, Cambridge, MA, USA, 20-23 June 1995.
- [19] El-Hakim, S.F., Beraldin, J.-A., Blais, F., "A Comparative Evaluation of the Performance of Passive and Active 3-D Vision Systems", SPIE Proceedings, Conference on Digital Photogrammetry, vol. 2646, pp. 14-25, St.Petersburg, Russia, 25-30 June 1995.
- [20] Häusler, G., Kreipl, S., Lampalzer, R., Schielzeth, A., Spellenberg, B., "New Range Sensors at the Physical Limit of Measuring Uncertainty", Proceedings of the EOS Topical Meeting on Optoelectronics Distance Measurements and Applications, Nantes, France, 8-10 July 1997.
- [21] Goodman, J.W., "Laser Speckle and Related Phenomena", Chapter 1 Statistical properties of laser speckle patterns, Springer-Verlag, pp. 9–76, 1984.
- [22] Sirat, G.Y., Vecht, J., Malet, Y., "Conoscopic systems", Electrical and Electronics Engineers in Israel, pp. 549-552, 1996.

- [23] Rejc, J., "Robotsko vstavljanje čepov v grelec", diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2002.
- [24] G. Schirripa Spagnolo, "Potentiality of 3D laser profilometry to determine the sequence of homogenous crossing lines on questioned document", Forensic Science International, vol. 164, issue 2-3, pp. 102-109, 2005.
- [25] J., Borenstein, H.R., Everett, L., Feng, D., Wehe, "Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques", Journal of Robotics Systems, vol. 14, no. 4, pp. 231-249, 1997.
- [26] Lin, C.S., "Airborne lidar remote sensing of terrain and ocean", Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS 2005, vol. 3, pp. 2316-2318, 1995.
- [27] Chen, Y.D., Ni, J.,"Dynamic calibration and compensation of a 3D laser radar scanning system", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 3, pp. 318-323, June 1993.
- [28] Ming-Chih, Lu, Wei-Yen, Wang, "Image-Based Distance and Area Measuring Systems", IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 2, April 2006.
- [29] S. Sukumar, D. Page, A. Gribok, A. Koschan, M. Abidi, D. Gorsich, and G. Gerhart, "Surface Shape Description of 3D Data from Under Vehicle Inspection Robot," Proc. SPIE Unmanned Ground Vehicle Technology VII, vol. 5804, pp. 621-629, Orlando, USA, March 2005.
- [30] Homh, K., Ersü, E., Wienand, S., Lambert, G., "Robots as carrier for vision-sensors – Chances and restrictions", Proceedings of the Joint Conference on Robotics : ISR 2006, 37th International Symposium on Robotics and Robotik 2006, 4th German Conference on Robotics, Munich, May 15-17, 2006.
- [31] Gilbert R. Kent, "Laser measurement takes hold", Quality Magazine, pp. 18–22, August 2002.
- [32] Niel, A., Burgstaller, M. "Robotic Three-Dimensional Measurement System for Complex Metal Parts Using Structured Light" 7. ABW-Workshop 3D Bildverarbeitung, TAE, Technische Akademie Esslingen, Esslingen-Ostfildern, Germany, Februar 2002.
- [33] Chen, Z., Song, Y., Zhang J., Zhang, W., Jiang, L., Xia, X., "Laser vision sensing based on adaptive welding for aluminum alloy", Frontiers of Mechanical Engineering in China, vol. 2, no. 2, pp. 218-223, April 2007.

- [34] Lee, J.I., Um, K.W., "A prediction of welding process parameters by prediction of back-bead geometry", Elsevier, Journal of Materials Processing Technology, vol. 108, no. 1, pp. 106-113, December 2000.
- [35] Xu, P., Xu, G., Tang, X., Yao, S., "A visual seam tracking system for robotic arc welding", Springer London, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 37, no. 1-2, pp. 70-75, April 2008.
- [36] Chang, S. F., Bone, G. -M., "Burr Size Reduction in Drilling by Ultrasonic Assistance", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 21, pp. 442-450, 2005.
- [37] European standard EN 60335-1, "Household and similar electrical appliances -Safety, Part 1: General requirements (IEC 60335-1:2001, modified)", poglavje 4: General requirements.
- [38] European standard EN 60335-1, "Household and similar electrical appliances -Safety, Part 1: General requirements (IEC 60335-1:2001, modified)", poglavje 24: Components.
- [39] European standard EN 14597, "Temperature control devices and temperature limiters for heat generating systems", poglavje 15: Manufacturing deviation and drifts, 15.201.
- [40] European standard EN 14597, "Temperature control devices and temperature limiters for heat generating systems", poglavje 14: Heating, 14.202.
- [41] European standard EN 60947, "Low-voltage switch gear and control gear, Part 5-1: Control circuit devices and switching elements - Electromechanical control circuit devices (IEC 60947-5-1:2003)", poglavje 4: Characteristics, 4.2.1.
- [42] European standard EN 60335, "Household and similar electrical appliances Safety, Part 2-21: Particular requirements for storage water heaters (IEC 60335-2-21:2002, modified)", poglavje 22: Construction, 22.111.
- [43] Ling, D.S.H., Hsu, H.Y., Lin, G.C.I and Lee, S.H.L. "Enhanced image-based coordinate measurement using a super-resolution method", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 21, pp. 579-588, 2005.
- [44] Micro-Epsilon, "Instruction Manual optoNCDT2200", Internet: http://www.microepsilon.com/en/Sensors/Optical—Laser/optoNCDT-2200/.

- [45] Fujikake, H., Takiuwa, K., Ada, T., Negishi, T., Kobayashi, M., "Video Camera System Using Liquid-Crystal Polarizing Filter to 'Reduce Reflected Light", IEEE Transactions on broadcastings, vol. 44, no. 4, December 1998.
- [46] Rejc, J., Munih, M., "Using an optical micrometer for mechanical thermostat membrane expansion measurements", revija Ventil, ISSN 1318-7279, vol. 13, no. 5, pp. 318-323, 2007.
- [47] Lattice Semiconductor Corporation, "Analog Layout and Grounding Techniques", September 1999, Internet: www.latticesemi.com/dynamic/ view\_document.cfm?document\_id=1116.
- [48] Willig, A., Kubisch, M., Hoene, C., Wolisz, A., "Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 6, pp. 1265-1282, December 2002.
- [49] Lin, C.-H., Chu, H.-H., Nahrstedt, K., "A Soft Real-time Scheduling Server on the Windows NT", Proceedings of the 2nd USENIX Windows NT Symposium, pp. 149–156, Seattle, Washington, August 1998.
- [50] Liu, J. W. S., "Real-Time Systems", Prentice–Hall Inc., 1st edition, New Jersey, USA, 2000.
- [51] Cinkelj, J., Rejc, J., Munih, M., "Profile measurement using robot and distance sensor", Proceedings of the Joint Conference on Robotics : ISR 2006, 37th International Symposium on Robotics and Robotik 2006, 4th German Conference on Robotics, Munich, 15-17 May 2006.
- [52] "IA-32 Intel® Architecture Software Developer's Manual", Internet: http://developer.intel.com/design/pentium4/manuals/index\_new.htm.
- [53] Teutsch, C., Trostmann, E., Weber, M., Isenberg, T., "Evaluation and Optimization of Laser Scan Data", SimVis, pp. 311-322, 2004.
- [54] Kocjan, J., "Praktikum identifikacij dinamičnih sistemov", 1. izd, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1998.

## 10 Priloge

## 10.1 Triangulacijski laserski merilnik oddaljenosti Micro-Epsilon ILD2200

Model	ILD 2200-2	ILD 2200-10	ILD 2200-20	ILD 2200-40	ILD 2200-50	ILD 2200-100	ILD 2200-200		
Measuring range	2 mm (.08 ")	10 mm (.4 ")	20 mm (.8 ")	40 mm (1.57 ")	50 mm (2 ")	100 mm (4 ")	200 mm (8 ")		
Start measuring range (SMR)	24 mm (0.94 ")	30 mm (1.18 ")	40 mm (1.57 ")	175 mm (6.89 ")	45 mm (1.76")	70 mm (2.72 ")	130 mm (5.06 ")		
Reference distance midrange	25 mm (0.98 ")	35 mm (1.38 ")	50 mm (1.97 ")	195 (7.67")	70 mm (2.76")	120 mm (4.72 ")	230 mm (9.06 ")		
End measuring range (EMR)	26 mm (1.02 ")	40 mm (1.58 ")	60 mm (2.37 ")	215 (8.46")	95 mm (3.76")	170 mm (6.72 ")	330 mm (13.06 ")		
Linearity	1 <i>µ</i> m	3 <i>µ</i> m	6µm	12 <i>µ</i> m	15 <i>µ</i> m	30 µm	60 <i>µ</i> m		
uneanty	$\pm$ 0.05 % FSO		5	±0.0	03 % FSO				
Desclution 10 kl/m	0.1 <i>µ</i> m	0.5 <i>µ</i> m	1 <i>µ</i> m	2µm	2.5 μm	5 <i>µ</i> m	10 <i>µ</i> m		
Resolution 10 KHz				0.005 % FS O	6.				
Measuring rate				10 kHz					
Permissible ambient light		3		30,000 k	~				
Spot diameter (start m.range)	80 <i>µ</i> m	110 <i>µ</i> m	160 <i>µ</i> m	230 <i>µ</i> m	215 <i>µ</i> m	350 <i>µ</i> m	1300 µm		
Spot diameter (midrange)	35 <i>µ</i> m	50 <i>µ</i> m	60 µ m	210 <i>µ</i> m	80 <i>µ</i> m	130 <i>µ</i> m	1300 µm		
Spot diameter (end m. range)	80 <i>µ</i> m	110 <i>µ</i> m	160 <i>µ</i> m	230 <i>µ</i> m	215 <i>µ</i> m	350 <i>µ</i> m	1300 µm		
Light source			1 mW laser,	wavelength: 670	nm (visible/red)	nm (visible/red)			
Laser safety class 2		DI	N EN 60825-1/A	112.99 / IEC 82	25-1/A112.99 /	FDA			
Protection class			Sensor:	IP 65 Contr	oller: IP 50				
Temperature stability				0.01 % d.M./K					
Operating temperature			0 t	o 50 °C (32 to 12	22°F)				
Storage temperature			-20	to 70 °C (-4 to 1	58 °F)				
Output			Analog: ±5 V	Digital: RS 4	85 / 691.2 kBau	d			
Supply			24 VD	C (±15 %), max.	. 500 mA				
Sensor cable			2 5/10 m (16.5 ½	m (6.5 ') - integra 33 ') - without add	ated ditional calibratic	'n			
Controller		143 x	auto 145 x 52 mm (5	zero / signal ave 5.6 " x 5.6 " x 2 ")	eraging - without mount	ingclips			
Electromagnetic compability (EMC)		EN 50081-1 und EN 50082-2							
Vibration				2 g/20 500 H	Hz				
Shock				15 g / 6 ms / 3 A	xis				

FSO = Full Scale Output

All specifications apply for a diffusely reflecting matt white ceramic target

Slika 10.1: Značilnosti laserskega triangulacijskega merilnika oddaljenosti Micro-Epsilon





## 10.2 Robot Epson E2S651

Model robota	L	E2S651			
Oblika Maksimalna obromonitov		SCARA 4 osi AC Servo			
Maksimalna o	obremenitev	5 kg			
	T1+T2 (skupna)	650 mm			
Doseg osi	Ζ	170 mm			
	U	$\pm 360^{\circ}$			
	T1+T2 (skupna)	6300 mm/s			
Hitrost	Ζ	1100  mm/s			
	U	1870°/s			
	T1+T2 (skupna)	$\pm 0.015 \text{ mm}$			
Ponovljivost	Ζ	$\pm 0.010 \text{ mm}$			
	U	$\pm 0.020^{\circ}$			
Čas cikla		0.477 s			
Vztrajnostni moment (U os 5 kg)		$0.120 \text{ kgm}^2$			
Masa		20 kg			
Uporabniška	vodila	15 električnih, 3 pnevmatska, votli segmenti			

Tabela 10.1: Značilnosti robota EPSON E2S651



Slika 10.3: Delovni prostor robota EPSON E2S651











### 10.4 Pravilnost kinematičnih enačb

$\mathbf{Z}$	mikrometrom
--------------	-------------

					1	Absolutni			
Ν		Mikro	ometer		gonilnik				
		(m	m)	(mm)			(mm)		
	X <sub>1</sub>	$X_2$	$D_1 = (X_2 - X_1)$	$X_3$	$X_4$	$D_2 = (X_4 - X_3)$	$ D_2 - D_1 $		
1	0.789	24.788	23.999	-197.801	-221.802	24.001	0.002		
2	0.788	24.790	23.999	-197.801	-221.802	24.001	0.001		
3	0.788	24.790	23.999	-197.801	-221.802	24.001	0.001		
4	0.788	24.794	23.999	-197.801	-221.802	24.001	0.005		
5	0.795	24.792	23.999	-197.801	-221.802	24.001	0.004		

Tabela 10.2: Preverjanje kinematičnih enačb z mikrometrom pri hitrosti 10 mm/s

					Epson				
Ν		Mikro	ometer		gonilnik				
	(mm)				(mm)				
	X1	$X_2$	$D_1 = (X_2 - X_1)$	X <sub>3</sub>	$X_4$	$D_2 = (X_4 - X_3)$	$ D_2 - D_1 $		
1	0.791	24.798	24.007	-197.801	-221.802	24.001	0.006		
2	0.789	24.798	24.009	-197.801	-221.802	24.001	0.008		
3	0.795	24.798	24.003	-197.801	-221.802	24.001	0.002		
4	0.794	24.797	24.003	-197.801	-221.802	24.001	0.002		
5	0.797	24.799	24.002	-197.801	-221.802	24.001	0.001		

Tabela 10.3: Preverjanje kinematičnih enačb z mikrometrom pri hitrosti 20 mm/s

					Absolutni				
Ν	Mikrometer				gonilnik				
		(m	m)		(mm)				
	X <sub>1</sub>	$X_2$	$D_1 = (X_2 - X_1)$	$X_3$	$X_4$	$D_2 = (X_4 - X_3)$	$ D_2 - D_1 $		
1	0.790	24.796	24.006	-197.801	-221.802	24.001	0.005		
2	0.794	24.797	24.003	-197.801	-221.802	24.001	0.002		
3	0.791	24.796	24.005	-197.801	-221.802	24.001	0.004		
4	0.790	24.796	24.006	-197.801	-221.802	24.001	0.005		
5	0.789	24.798	24.009	-197.801	-221.802	24.001	0.008		

Tabela 10.4: Preverjanje kinematičnih enač<br/>b ${\rm z}$ mikrometrom pri hitrosti 100 mm/s

## 10.5 IEC 60825-1 varnostni standard za laserje

Laser Class	Class Evaluation
Class 1	Lasers that are safe under reasonably foreseeable conditions of opera-
	tion, including the use of optional instruments for intrabeam viewing.
Class 1M	Lasers that emit in the wavelength range of 302.5 nm to 4,000 nm which
	are safe under reasonably foreseeable conditions of operation, but may
	be hazardous if the user employs optics within the beam. Laser emission
	level is equal to Class 1.
Class 2	Lasers that emit visible radiation in the wavelength range from 400
	nm to 700 nm where eye protection is normally afforded by aversion
	responses, including the blink reflex.
Class 2M	Lasers that emit visible radiation in the wavelength range from 400 nm
	to 700 nm, the same as Class 2, where eye protection is normally afforded
	by aversion responses including the blink reflex. However, viewing of
	the output may be more hazardous if the user employs optics within
	the beam.
Class 3R	Lasers that emit in the wavelength range from $302.5 \text{ nm}$ to $10^6 \text{ nm}$
	where direct intrabeam viewing is potentially hazardous.
Class 3B	Lasers that are normally hazardous where direct intrabeam exposure
	occurs. Viewing diffuse reflections is normally safe.
Class 4	Lasers that are also capable of producing hazardous diffuse reflections.
	They may cause skin injuries and could also constitute a fire hazard.
	Their use requires extreme caution.

Tabela 10.5: Klasifikacija laserskih izdelkov po standardu IEC 60825-1

VISIBLE A	VISIBLE AND INVISIBLE LASER RADIATION AVOID EYE OR SKIN EXPOSURE TO DIRECT OR SCATTERED RADIATION					
Max. outpu Wavelengt	ıt : 150 kW h : 1.064 nm	Max. output: 1.0 kW Wavelength: 650 nm				
CLASS 4 LASER PRODUCT IEC60825-1 : 2001						
	AVOID EXPOSURE VISIBLE AND INVISIBLE LASER IS EMITTED FROM THIS APERTURE					

Slika 10.7: Opozorilne označbe po standardu IEC60825-1

# 10.6 Dinamični odziv merilnika ILD2200-10 - določanje pozicije roba kvadra

	Na kvadru (NK)			S kvadra (SK)		
Hitrost	Rob 1	Rob 2	Rob 3	Rob 1	Rob 2	Rob 3
(mm/s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	0.648	0.645	0.650	0.651	0.648	0.655
20	0.642	0.642	0.644	0.651	0.652	0.652
50	0.652	0.638	0.644	0.659	0.655	0.651
100	0.654	0.644	0.652	0.666	0.659	0.670

Tabela 10.6: Koordinata roba kvadra na nepobarvani strani

	Na kvader (NK)			S kvadra (SK)		
Hitrost	Rob 1	Rob 2	Rob 3	Rob 1	Rob 2	Rob 3
(mm/s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	0.320	0.325	0.320	0.320	0.319	0.320
20	0.326	0.326	0.326	0.320	0.314	0.314
50	0.331	0.323	0.323	0.340	0.328	0.329
100	0.323	0.339	0.319	0.333	0.352	0.344

Tabela 10.7: Koordinata roba kvadra na pobarvani strani

10.7 Pogrešek določanja dimenzij zaradi načina delovanja gonilnika v primeru A



Slika 10.8: Idealno časovno ujemanje in idealno določen rob kvadra



Slika 10.9: Idealno časovno ujemanje, vendar je kvader prekratek za približno 1.5 ms



Slika 10.10: Višina in pozicija sta zamaknjeni, zato je kvader predolg za približno 0.2 ms



Slika 10.11: Kvader je prekratek za približno 1.3 ms







Slika 10.13: Kvader je prekratek za približno 2 ms

## 10.8 Clanek sprejet v reviji Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007



## Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor

Jure Rejc\*, Justin Činkelj, Marko Munih

Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenia Received 6 December 2006; received in revised form 24 October 2007; accepted 9 November 2007

#### Abstract

This paper presents a system for noncontact dimensional measurement of a gray-iron grate by use of a laser dot triangulation displacement sensor and an industrial SCARA robot. A special kernel driver and an associated dynamic link library were written for this system, enabling a higher sampling rate of the robot world coordinate positions and of the laser measurements. For repair of the scan data and calculation of the coordinates of deburring points, another program was written, where a unique approach of polynomial approximation to the profile was developed. To determine the accuracy of the robot measurement system, a number of comparative measurements were performed on a reference cube with a coordinate-measuring machine. Comparative measurements on real gray-iron grates were also done. The results show that dimensional measurements on a grate, at 88 points, can be performed within 45 s and with  $\pm 0.3$  mm accuracy, which proved to be sufficient for robot deburring of gray-iron grates.

Keywords: Gray-iron deburring; Industrial robot; High-speed sampling; Laser triangulation; Noncontact robot dimensional measurement

#### 1. Introduction

The work described here covers one part of the application of a robot for deburring gray-iron castings. The task is challenging owing to the very complex workpiece, called a grate or a mesh, which is used to carry pots on a cooking stove. Gray-iron grates, after cooling, have burrs of variable size. These must be removed to obtain a neat, smooth appearance. This paper describes the measurement robot system for a unique robot deburring approach based on a standard industrial robot carrying a stiff deburring tool. The ideal deburring trajectory, based on ideal CAD model, is adapted from dimensional measurements performed with a second robot in an earlier stage.

Foundries play an important role today in the manufacturing of various products around the world. This technology enables production of geometrically complex products in high quantity, leading to cheap castings. The process of casting, however, has a number of disadvantages. The most inconvenient are undesired projections of material, also called burrs. Burrs appear in the places where cast iron spills between the bottom and top of the casting mould or as a leftover of the gray-iron input flow channel. Burrs reduce the dimensional accuracy of parts, may complicate the subsequent assembly process, and also affect the appearance and geometry of the product. This means that all undesired material must be removed. Today, most frequently, the deburring task is done manually, accounting for up to 25% or even more of total production costs [1]. One of the biggest problems in the automation of burr removal appears to be the dimensional dispersion of castings, which is a consequence of irregular cooling conditions.

Many different approaches have been proposed in the past for automation of the deburring process. The following approaches are usually used for robotic deburring [2]: the compliant, the sensor-driven, and the force feedback approach. The first two methods are suitable for objects that do not need to be dimensionally precise. A few promising robotic laboratory experiments have been performed in the past, employing the force feedback

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

<sup>\*</sup>Corresponding author. Tel.: +38614768379; fax: +38614768239. *E-mail address*: jure.rejc@robo.fe.uni-lj.si (J. Rejc). *URL*: http://robo.fe.uni-lj.si/staff-20.html (J. Rejc).

<sup>0736-5845/\$ -</sup> see front matter  $\textcircled{}{}$  2007 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

J. Rejc et al. / Robotics and Computer-Integrated Manufacturing & (\*\*\*\*)

deburring principle, mainly in the field of fuzzy control algorithms [3,4] for trajectory adaptation. Murphy et al. [5] proposed automatic generation of the trajectory of the robot based on a CAD model and force feedback for correction of the path of the robot.

2

The most important issue in this work, accurate dimensional or coordinate measurements, can be separated into two types [6]: contact and noncontact. Shen et al. [7] have classified coordinate-measuring machines (CMMs) with a touch-trigger probe sensor as contact solutions, while the noncontact solutions include laser scanners and vision systems based on video cameras. Sansoni et al. [8] have reported that noncontact sensors can be used in conjunction with CMMs to extend their capabilities, i.e. combinations of contact and noncontact measurement systems can be implemented.

The most accurate contact system is a CMM with a touch-trigger probe with an accuracy of under  $1 \mu m$ , based on a serial or parallel mechanism. Better-performance CMMs are large and heavy, and therefore not capable of performing fast measurements [9]. Touch-trigger probes also slow down the measurements, because information is read one point at a time.

Frequently used noncontact measurement devices are laser distance sensors using a laser beam that can be projected onto a surface as a dot, a line, a group of parallel or perpendicular lines, or a circle. Common principle of operation of today's laser displacement sensors is based on the principle of optical triangulation [10], but it has some measurement limitations. More accurate measurement results are obtained by conoscopic holography. This is based on a simple implementation of a particular type of interference process of polarized light using crystal optics [11], which makes measurements possible where the triangulation principle fails. These two methods are suitable for very accurate measurements.

Video camera systems with three-dimensional (3D) coordinate acquisition are used in many applications. A typical example is the dimensional control of workpieces and the digitization of complex, free-form surfaces in reverse engineering. Two very important factors in camera vision systems are accuracy and field of view (FOV). The accuracy of the system needs to be sufficient to satisfy the purpose of the measurement, and the object needs to be within the FOV. Unfortunately, better accuracy can usually be obtained only with a smaller FOV. In addition, camera systems have other problems, including issues with lighting conditions and shadowing.

There are other aspects, linked to the shape and size of our workpieces, that need to be considered. To obtain satisfactory dimensional information for describing a whole grate, a minimum number of 88 points is needed. The desired measurement accuracy was set at  $\pm 0.2$  mm in the work area, and the measurements were required to take less than 1 min for one workpiece. The number of points and the requirement on the time exclude methods based on contact principles. A number of reasons prevented us from buying or developing a camera system: the unpredictable visible shape of burrs would make mathematical analysis very complex, the contrast of the object would be poor, and the large dimensions of the grate limit the measurement accuracy, even when using several cameras. In contrast, the measurement principle of triangulation using a laser dot sensor has a high resolution, in the range of micrometers, and could enable fast acquisition of neighboring points and shapes.

The laser sensor may be fixed and the scanned part moved, or the laser sensor may be moved; nowadays, this is done mostly by use of ordinary industrial robots [12]. The approach of moving the laser has many advantages, allowing flexible, programmable systems, and also small stand-off distances. Homh et al. [13] state that the main drawbacks of these systems are problems of long-term stability, vibration as a consequence of high accelerations and decelerations, the impact of temperature variations on the robot, and a very high price.

In the work described in this article, we have taken the pool of published knowledge, utilized high-accuracy sensors and a moving robot, developed specific software for accurate acquisition, and performed shape modeling of the grate in order to increase the accuracy and robustness. To check the validity of the measuring method, 42 grates were measured first using this technology and then checked with a calibrated CMM. The results are provided, with a basic statistical analysis, along with a discussion and final conclusions.

#### 2. Hardware

The system that we used for dimensional measurements of grates is shown in Fig. 1. It is made by combining an Epson industrial robot used for carrying a Micro-Epsilon laser dot triangulation sensor with an A/D converter for acquisition of the analog output signal from the laser, and a table to which the grate was fastened.

#### 2.1. Epson E2S651 robot

The SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm) Epson E2S651 robot with 4 DOF (degrees of freedom; RRTR—rotation, rotation, translation, rotation) is mainly used for automation of assembly in industrial processes. It has a cylindrical working range from 280 to 650 mm. The repeatability specifications are very good:  $15 \mu m$  for the first and second axes,  $10 \mu m$  for Z-axis and  $0.02^{\circ}$  for U-axis.

The Epson robot was used as an X and Y world coordinate measurement tool, and as a carrier for the laser dot distance sensor for acquisition of the Z coordinate. This application required a higher sampling frequency from the robot than was possible with standard software. For this purpose, a kinematic model for the first and second axes was needed (Eqs. (1) and (2)). The value of the

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

3

140



Fig. 1. Measuring system, table and gray-iron grate.

constant  $d_1$ , as a length of the first robot segment, was 415 mm and that of  $d_2$ , as a length of the second robot segment, was 235 mm. The variable  $\vartheta_1$  stands for the angle of the first axis and  $\vartheta_2$  for that of the second axis.

$$X = d_1 \cdot \cos \vartheta_1 + d_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2), \tag{1}$$

$$Y = d_1 \cdot \sin \vartheta_1 + d_2 \cdot \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2). \tag{2}$$

The relationships between the encoder reading  $(N_1)$  for the encoder value at joint 1 and  $N_2$  for the encoder value at joint 2, and the joint angles in the following equation are

$$\vartheta_1(^{\circ}) = \frac{1}{910^2} \cdot N_1, \quad \vartheta_2(^{\circ}) = \frac{1}{5689} \cdot N_2.$$
 (3)

The robot controller of type RC420 was based on an industrial PC platform with Microsoft Windows 2000 Professional operating system.

#### 2.2. Laser triangulation distance sensor

For the noncontact measurement of the vertical coordinate, a Micro-Epsilon ILD2200-10 laser dot triangulation system was used. This combined a laser head with a laser beam source, a CCD camera and an appropriate controller. The measurement range of this laser system was 10 mm, the stand-off or reference distance was 35 mm from the laser head, the resolution was  $0.5 \,\mu$ m, and the linearity was  $\pm 0.03\%$  of full-scale output. The beam size at the middle of the measurement range was 50  $\mu$ m, and at the edge of the measurement range  $110 \,\mu$ m. All of these data apply to a diffusely reflecting matt white ceramic surface. In the present system, the analog voltage output of  $\pm 5 \,$ V was used. The controller also had two special digitaloutput status pins: POOR TARGET indicated that the object was not in the measurement range, and OUT OF RANGE that the object was at the edge of the measurement range. Both of these signals were exploited in the present measurement system.

#### 2.3. Analog-to-digital converter

In the system, the analog voltage output from the laser controller was converted by an analog-to-digital converter, connected directly to the LPT port of the industrial PC platform of the Epson robot. The free pins of the parallel cable connected the two additional special signals from the laser sensor (left side of Fig. 2). The analog-to-digital converter was of type MAX197BCNI, 12-bit, a  $6\mu$ s conversion time and a 100 ksps sampling rate.

#### 2.4. Robot and grate fastenings

The robot was fixed 870 mm from the floor on a massive vertical circular tube, which was then fixed to a heavy concrete pedestal lying on the floor. The world coordinate system of the robot and the work table were set as parallel as possible and were not connected, to avoid transfer of



Fig. 2. Connection scheme and operating principle of the Epson robot measuring cell.

vibrations. On the top of 650 mm wide, 850 mm high, and 600 mm long work table was placed a special heavy steel plate, which could be leveled vertically by three screws to set a horizontal plane parallel to the horizontal moving plane of motion of the Epson robot. The steel plate was 800 mm wide, 30 mm thick, and 480 mm long. On the top of the plate, three circular barriers were fixed, meant for positioning a grate parallel to the world coordinate axes of the robot. This steel plate also had four clamps for fastening the grate and preventing any movement during laser scanning. The test grate was approximately 265 mm wide, 20 mm high, and 550 mm long. Gray-iron material was an alloy of carbon (3–4%) and iron (97–96%); the grain size of the mold was 0.2 mm.

#### 3. Software

#### 3.1. User environment

To increase the positional sampling rate of the robot, to enable faster scanning, from 100 to 500 Hz, customdesigned software was used. The Epson RC+ development environment uses Windows and a variant of the BASIC language. The environment can call the standard Epson robot functions, as well as new functions implemented in external dynamic link libraries (DLLs).

The programs written in BASIC communicate with a SPEL+ runtime driver using ActiveX technology. The SPEL+ runtime driver communicates with an ISA interface board, containing its own processor for real-time control of the power amplifiers and for passing the positional information to the circuits operating with the interface (dark gray area in Fig. 2).

For dimensional measurements using a robot and laser, a high, constant sampling rate of the position coordinates of the robot and of the analog output of the laser is needed. The Windows-based operating system and its associated software enabled sampling frequencies of only up to 100 Hz and the inter-interval time was not constant. A new dedicated driver and DLL functions were needed to overcome these shortcomings.

#### 3.2. Robot encoder and laser data acquisition software

The new robot software was written in the Microsoft Visual Studio 6.0 development environment utilizing the C/C + + programming language. It has two sections: first, an interrupt service routine and memory for temporary data storage, which were part of a driver in the kernel space, and second, an acquisition DLL that was part of the user space, enabling control over the driver in the kernel space (Fig. 2, light gray area).

The registers of the ISA interface board for containing the encoder positions were not updated instantly, but at a rate of 500 Hz, with a counter indicating the changes of the values of the registers. The new software (the interrupt service routine) synchronized the reading of encoder positions by connecting to a synchronous interrupt that was triggered by the ISA interface board. The starting and stopping of triggering were supervised by appropriate functions from the acquisition DLL. Tests showed that the interrupt ran at a frequency slightly faster than 1 kHz. This meant that the interrupt was not called exactly twice as fast as the encoder position registers were updated. For this reason, the age of the encoder position data of the robot could be anywhere between 0 and 1 ms, meaning that the system was multirate [14]. Apart from reading the encoder registers, the interrupt service routine also reads the value of the laser triangulation sensor, via the parallel port.

The interrupt service routine log included changes of the encoder position, the values of the ISA register counter and the laser data, all saved into memory at the rate of the ISA interrupt. These data could be read from memory into the user development space by the acquisition DLL function, but only after the interrupt service routine was stopped. Before writing the data into a text file with a .scn extension, the encoder changes were converted into X and Y coordinate positions by the kinematic model of the robot, described by Eqs. (1) and (2).

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

J. Rejc et al. / Robotics and Computer-Integrated Manufacturing & (\*\*\*\*)

#### 3.3. Laser scanning errors and laser data analysis software

The software for analysis of the robotic laser measurement was developed especially for dimensional scanning of grates. It was written in the Borland Builder C + + 6.0development environment. Scanning of the grate was performed first in the X direction of the robot world coordinate frame and then in the Y direction. During scanning, most of the path, in between the bars of the grate, does not belong to the object area. In these regions the speed of movement can be high, in contrast to other areas, where the full accuracy is needed. For this reason, a reduction of the speed of movement was needed to avoid having too large distance between two samples, which would be dependent on the sample acquisition rate and the speed of movement of the robot.

An algorithm that summarizes the processing of positional and laser data is shown in Fig. 3. It starts with userdefined input parameters (Level I) and the reading of .pnt file (Level II) for the movement trajectory of the Epson robot in the area surrounding where the object is lying.



With this information, a corresponding path sequence is extracted from a .scn file (Level III) and further analyzed.

During laser scanning, errors can occur, and this erroneous data must be repaired or program execution must be stopped (Level IV). In our case, errors such as holes in the profile and outliers occurred. A hole phenomenon can be seen on the right-hand side of the profile in Fig. 4, where the horizontal axis displays the horizontal X coordinate of the robot and the vertical axis shows the laser distance readings. Teutsch et al. [15] mentioned that a very common error in laser scanning is caused by a shadowing effect, when the path of the laser beam is broken by an obstacle. In our case, shadowing was avoided by an appropriate orientation of the laser during scanning. The program repaired holes and outliers by ordinary linear interpolation if fewer than five points were erroneous.

The measurement range of 10 mm also allowed burrs to be seen in some scanned areas. Burrs are not part of the end product, and therefore burr data was removed from further analysis (Level V). To be able to set the boundaries for removing the burr data, an additional file with a .dis extension was included. This file was manually filled with distances from the top of a burr to the top of a bar of the grate for every scanned point. Using this information, the scan points representing burrs could be excluded from further analysis.

In the following step, deburring coordinates had to be set or calculated. In the majority of scanned profiles, the burrs were not visible or data on the burrs had been removed, meaning that a method for obtaining a mathematical approximation to the missing data was needed (Level VI). To approximate the slope of the grate, a polynomial function of degree n, where n was equal to 4, 6, and 8 (Eq. (4)), was used. In the polynomial equation (4), p stands for the polynomial coefficients, x is the horizontal



Fig. 4. Grate profile, scanning error, and polynomial approximation.

Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor - page 5

J. Rejc et al. / Robotics and Computer-Integrated Manufacturing I (IIII) III-III

robot coordinate, and  $\hat{y}$  is the calculated vertical value. With single polynomial one sloping side could be approximated, so two polynomials were needed to cover left-hand and right-hand slopes of the profile. Number of scan points used for polynomial approximation was also changeable, meaning that the width of the dish-shaped series of points could be increased or decreased. This procedure gave a variable width dish-shaped series of points, which can be clearly seen in Fig. 4, for both the left and the right approximation areas. Using a least-squares method (Eqs. (5) and (6)) and this dish-shaped data, all polynomial coefficients were calculated for each measured column of the grate

6

$$\hat{y} = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 + \dots + p_n \cdot x^n,$$
 (4)

$$A = [1, x, x^2, \dots, x^n],$$
(5)

$$p = [A^{\mathrm{T}} \cdot A]^{-1} \cdot A^{\mathrm{T}} \cdot y.$$
(6)

The approximation procedure was started with a polynomial of degree 4. The calculated mathematical approximation was compared with the laser measurements by using the residuals and the factor  $R^2$ , called the coefficient of determination. This coefficient had a value between 0 and 1.

$$ResidualSS = \sum (y - \hat{y})^{2},$$

$$TotalSS = \sum (y - \bar{y})^{2},$$

$$R^{2} = 1 - \frac{ResidualSS}{TotalSS}.$$
(7)

 $R^2$  was calculated using Eq. (7), where y is the value measured with the laser,  $\bar{y}$  is the mean of the measured values, and  $\hat{y}$  is the calculated value at a certain horizontal robot coordinate. If  $R^2$  was greater than or equal to a value specified as an input parameter of the program, then the current degree of the polynomial was used. In other cases, the degree of the polynomial was increased by 2 and the calculation was repeated. In cases when even the higher polynomial failed, the width of the dish-shaped series of points was changed and approximation with an use of the polynomial with degree 4 was started again. If all variations failed the last measured point from the left and right parts of the profile was used for deburring. This method could be used universally for estimating the dimensions of objects of other shapes. The dimensional measurements of a cube that are presented later in this article exploited the same principle, only that the polynomial approximation always failed and uses only the laser scan points.

The algorithm in Fig. 3 was performed over all scan areas of the object. All points of the deburring profile were then saved into a .rmp file (Level VII). In the case of an error during analysis, the .rmp file had a length of 0 bytes (Level VIII).

#### 4. Measurement methodology

#### 4.1. Dimensional measurements of the calibration object

To check the measurement accuracy of the robot equipped with the laser, a reference object in the form of a perpendicular cube with known, verified dimensions was used. The dimensions of the cube were acquired between measured points on its surface, as can be seen in Fig. 5. To get the most accurate reference point coordinates, a CMM was used, periodically maintained and calibrated to fulfill the ISO 10360-2 standard [16]. The CMM had a planar length-measuring performance of  $U2 = 3 + 4 \cdot L/1000$ (L is length of the measured object) in units of micrometers, and a volumetric repeatability of  $R3 = 4 \,\mu\text{m}$ . The measurements were performed at a temperature of 20.6 °C with a touch-trigger probe of diameter 2mm. The cube coordinate system for reference measurements was fixed by touching two perpendicular sides of the cube at a few points. The coordinate system through these points was set automatically by the CMM software. The subsequent measurements of all points, repeated 10 times, were also automated.

The reference object was approximately 50.3 mm wide, 51.2 mm high, and 64.7 mm long, made out of steel with a hardness of 249 HV (Vickers Hardness), with sharp edges, and ground and sanded surfaces. The high reflectivity for the laser beam was reduced by surface sanding. Additionally, one side of the cube was painted with black matte black paint and measured using the same methodology. The reason for painting one side of the cube was work by El-Hakim et al. [17], where laser measurement errors were presented for cases where sudden changes in surface height occur, large variations in the reflectance or color of the surface exist, or the surface is rough.



Fig. 5. Reference cube, rubber strip, and scanning trajectory.

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

J. Rejc et al. / Robotics and Computer-Integrated Manufacturing & (\*\*\*\*)

During the robot measurements, the test cube was laid on the top of a heavy steel plate, previously leveled according to the plane of motion of the robot. The cube was placed in nine  $(3 \times 3)$  positions in the robot work area, filling most of the cylindrical working range. Robot measurements were performed at different measurement speeds; the scanning speeds were 10, 20, 50, and 100 mm/s. At a sampling rate of 500 Hz this represents horizontal linear resolutions of 0.02, 0.04, 0.1, and 0.2 mm.

Five scanning lines were drawn on the cube, three in the X direction and two in the Y direction of the coordinate system of the cube (Fig. 5). Each of the scan cycles included moving the laser first in the forward and then in the backward direction. In all paths, the laser head was oriented in the same way relative to the direction of progression in order to prevent shadowing effect. The number of repetitions of the scan was 30 in both directions; each direction is marked in Fig. 5 by larger and smaller arrows. The top surface of the cube was placed in the middle of the measurement range of the laser, where the spot size of the laser beam was smallest. The environmental temperature during the measurements was  $22 \,^{\circ}C$ .

The first batch of measurements was on the unpainted side, followed by the painted side. On the painted side, a black rubber strip was also attached, 6 mm from the top and 3 mm in width, shown in Fig. 5 as a dark gray area. This prevented enlargement of the laser beam diameter if the measured surface was more than 2 mm out of the laser range. The reason for attaching the strip only to the painted side originated from the grate surface, which was nearly black and not completely vertical at the edges.

The scan data from the test cube was analyzed using the same software as applied for analysis of the scanning of grates to give edge point coordinates.

## 4.2. Dimensional measurements of gray-iron grates with CMM and robot

The most realistic test objects were gray-iron grates themselves, dimensionally checked with the same CMM as described in the case of the cube measurements. The other measurement conditions and other equipment were also the same. The grates used in the measurements with the CMM and, later, with the robot system were not the same, owing to the measurement and deburring sequence, preventing an exact direct comparison. A statistical dimensional analysis will be shown instead.

The CMM coordinate origin was set at the middle of the grate by touching the outside edges at several points. The CMM program scanned 30 grates by touching 88 points, 40 in the X direction, and 48 in the Y direction on every grate. To equalize the conditions and avoid burrs, all points were touched 1 mm above the position of burrs. The total time consumed for one grate was approximately 7 min.

Forty-two grates were measured using the robot and laser measurement system. Each grate was positioned into



Fig. 6. Robot scanning path for gray-iron grate.

the robot workspace, laid on the leveled steel plate and pushed to the three circular barriers (Fig. 1), so that it was parallel to the robot world coordinate system. Forty-four areas were scanned, 20 in the X direction and 24 in the Y direction, as can be seen in Fig. 6, marked with thick short lines. The scanning path was set as near to the CMM points as possible. The speed of the laser head was 50 mm/s inside the scan area of the grate (thick short line) and 500 mm/s otherwise. The distance between the laser head and the top of the grate was 31 mm, having 9 mm of measuring range of the laser available. The total time required for measurement of all 88 points was approximately 45 s. The deburring coordinates were later calculated using custom software for analysis of the scans.

#### 5. Robot measurement results

#### 5.1. Dimensional measurements of the calibration object

Fig. 7 shows the dimensional error between the CMM measurements and the laser measurements for a speed of movement of the laser 20 mm/s. The results are for two different positions in the working range of the robot, marked as 5 and 4. The top two charts are for the unpainted surface, and the bottom two for the black-painted cube surface. In position 5, the scanning direction was from 3A to 4B, while in position 4, the direction was from 3B to 3A (Fig. 5). The horizontal axis represents the measurement number and the vertical axis the dimensional error in millimeters. If the CMM dimension is larger than the dimension measured with the robot laser system then the result is negative.

The charts for the unpainted surface (top two) show maximal dimensional errors of 0.13 and 0.26 mm, with mean errors of 0.08 and 0.19 mm. In other cube positions in the robot work area, both smaller and larger dimensional differences occurred, from -0.06 to 0.30 mm. The maximal errors for the painted surface, shown in the bottom two charts, are -0.12 and 0.13 mm, with mean values of -0.07

Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor - page 7



Fig. 7. Error between laser and CMM measurements at scanning speed of 20 mm/s.

and 0.09 mm. In other cube positions within the robot working area, the dimensions varied from -0.17 to 0.15 mm. Fig. 8 also shows the error, as calculated, between the

CMM and laser measurements, when the speed of move-

ment of the laser head was set to 50 mm/s, the same as when the grates were inspected dimensionally before deburring. The top two charts show results for the unpainted surface, and the bottom two charts for the

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001





painted surface. In position 2, the scanning direction was from 2A to 2B, while in position 9, the direction was from 4B to 4A. The horizontal axis represents the measurement number and the vertical axis displays the

dimensional error in millimeters, where a positive value stands for the case when the real cube (as measured with the CMM) was larger than the result of measurement by the robot laser system.

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

J. Rejc et al. / Robotics and Computer-Integrated Manufacturing I (IIII) III-III

An immediate comparison between Figs. 7 and 8 shows larger measurement errors when a higher scanning speed was used. For the unpainted surface, the top two charts show maximal errors of 0.23 and -0.13 mm, but the mean error differs only slightly from the results at lower speeds. The mean values are 0.08 mm and -0.11 mm. In other cube positions in the robot work area, the results show dimensional errors between -0.17 and 0.31 mm. For the painted surface, the bottom charts show maximal errors of -0.22 and -0.28 mm, with mean values of -0.08 and -0.19 mm. The whole series of measurements show that the error on the painted surface can be from -0.30 to 0.13 mm. The minimal and maximal error results for all end-effector speeds tested and for both cube surfaces are shown in Table 1.

10

## 5.2. Dimensional measurements of gray-iron grates with CMM and robot

The chart in Fig. 9 shows the standard deviation over 30 grate samples for each of the 88 points measured with the

 Table 1

 Extreme error values between CMM and robot laser measurements

Cube surface	Unpainte	d	Painted		
Scanning speed (mm/s)	Error (m	m)	Error (mm)		
	min	max	min	max	
10	-0.01	0.33	-0.16	0.19	
20	-0.06	0.30	-0.17	0.15	
50	-0.17	0.31	-0.30	0.13	
100	-0.31	0.29	-0.54	0.12	

CMM. The horizontal axis represents the number of the measured point on the grate and the vertical axis shows the standard deviation for all measured points in millimeters. The first observation is that the real grates differ dimensionally. The mean standard deviation for all 88 points on 30 grates is 0.13 mm, and the maximal standard deviation is 0.31 mm. The maximal error at one point was larger than the statistically calculated value and was determined to be 1.47 mm. A few areas of the grate where larger errors occurred can be clearly seen in Fig. 9. Positions on the grate showing such errors are expected, since these areas of the grate have one of their ends free and can be more easily bent in the process of cooling. These results also confirmed the necessity to measure all grates prior to their deburring.

The bars in Fig. 10 show the normalized error of all measurement points according to a mean point value, quantized in steps of 0.05 mm. The solid line represents the ideal Gaussian distribution for the current data. The measured data fit very well to the ideal Gaussian distribution. On the right-hand side of the figure, however, a few outliers occur, and these can cause serious problems in the robotic deburring process.

A similar analysis was performed on data obtained using the robot and laser noncontact measurement system. Fig. 11 shows the standard deviation for 88 points on 42 grates. The horizontal axis represents the number of the measured point, and the vertical axis the standard deviation for all measured points in millimeters. The common standard deviation is 0.17 mm, a little larger than that in the CMM measurements. The maximal standard deviation is 0.32 mm, and the maximal deviation at one point is 1.91 mm. As can be seen in Figs. 9 and 11, the



Fig. 9. Standard deviation with CMM measured coordinates of 88 grate points

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

11



Fig. 10. Ideal Gaussian distribution and distribution with CMM measured grate points.



Fig. 11. Standard deviation with robot and laser measured coordinates of 88 grate points.

differences between the results for the CMM and the system described here are small. This confirms the suitability of the dimensional measurements of the grates made with the robot and the laser.

The distribution of grate dimensions measured with the robot can be seen, as bars in Fig. 12. The solid line represents the ideal Gaussian distribution. When one compares the bars and the solid line agreement can be noted with a few examples of more deviation in the values at the edges.

#### 6. Discussion

From the measurement results acquired from the reference cube, it can be concluded that the dimensional error between the contact approach and the approach



Fig. 12. Ideal Gaussian distribution and distribution with robot and laser measured grate points.

using a robot with a laser (Figs. 7 and 8) is higher than expected. One source of the error is the sampling frequency of the robot encoder, set at 500 Hz. This gives a coordinate resolution of 0.04 mm at an end-effector speed of 20 mm/s and 0.1 mm at an end-effector speed of 50 mm/s. As mentioned before, the sampling of the encoder does not give a constant sampling rate, but instead the sampling time varies between 0 and 1 ms, which causes the object dimensions to be shorter by twice the position resolution. At a robot end-effector speed of 50 mm/s, this causes a dimensional reduction of -0.2 mm.

12

The errors in laser measurement are important. Curless et al. [18] have described how, in optical triangulation systems, the accuracy of the range data depends on the proper interpretation of the light reflections imaged. Sensors based on the triangulation principle can give irregular measurements if the laser beam hits the edge of the object or if a reflectance discontinuity is present on the surface of the object.

The majority of the measurements in this study showed that the dimensional differences between the CMM and the robot measuring system were smaller on the black-painted surface, which was also equipped with a black rubber edge. This confirms the statement about enlargement of the laser beam when it hits a surface more than 2 mm out of the measurement range of the laser.

Also, the choice of a reference object with a highreflectance surface and sharp edges was suboptimal. A better choice would be an object with slightly rounded edges and surfaces painted with a matte black coating, similar to the case of grate edges. But even with these improvements, it has been reported that triangulation sensors may return false measurement results. Häusler et al. [19] learned from experiments that laser illumination is not the best choice for triangulation. As stated there, coherent noise is the major source of measurement uncertainty in triangulation on rough surfaces.

Kinematic equations (Eqs. (1) and (2)) were used for calculation of the robot world coordinates. In the case of poor matching of these equations to the right parameters, the dimensional errors could be significant. That is why a series of measurements were performed beforehand. The motion coordinates of the robot acquired via kinematics in the world coordinate system were compared with readings from a micrometer with 1 µm resolution and 25 mm working range. Additional tests were performed by using an OPTOTRAK noncontact 3D positioning system. This had a 0.01 mm 3D resolution, an X and Y accuracy of  $0.1 \,\mathrm{mm}$  and a Z accuracy of  $0.15 \,\mathrm{mm}$ . The measurement range of these tests was 1140 mm with an end-effector speed of 50 mm/s. The results showed that the differences were within the range of the robot parameters, were initially known and could not be prevented. This means that the kinematic equations did not contribute significantly to the measurement error.

The dimensional results on real grates (Figs. 11 and 12) show noticeable dimensional differences among the grate samples. This suggests that one deburring trajectory will not fit several grates. More detailed verification of the CMM and robot measurement results, based on graphs for numerous points, which we have omitted from this paper for reasons of space, confirmed even more strongly that there was nonlinear shrinkage in both of the observed coordinates. For deburring purposes, the robot trajectory must be adapted to fit the measured coordinate values of the current grate. Comparison between the results of measurements made with the CMM and those made with the robot and laser shows that when the polynomial

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

13

#### ARTICLE IN PRESS

approximation is used, the robot and laser system works very well, giving same class of accuracy for both measurement methods. This was the case when there were no sharp edges on the grates.

At the beginning of study, two requirements were specified. The first targeted the total time needed for completion of the dimensional measurements of one grate at 88 points. The target was set at 60 s, whereas the task was performed in 45 s. The second requirement targeted the measurement accuracy, with the hypothetical benchmark set at  $\pm 0.2$  mm. Unfortunately, this requirement was not reached completely, but we managed to be accurate to  $\pm 0.3$  mm.

In the final step, in a real deburring operation with a larger robot, 93 grates were very successfully cleaned completely. A robot complemented with a laser measuring system is now serving as a measuring device in a process for deburring of gray-iron grates. All this is also thanks to adaptive-order polynomial fitting, which increases the accuracy of the measurements and the robustness of the coordinate determination.

#### 7. Conclusions

A system for noncontact dimensional measurement of gray-iron grates using a laser and an industrial robot has been developed. The original sampling rate of the robot was increased from 100 to 500 Hz for the robot world coordinates and the laser distance measurement signal. This enabled higher speeds of movement of the robot and laser without loss of coordinate resolution. The accuracy and robustness of the coordinate acquisition were assured by fitting the slope of the grate by a polynomial.

In comparison with the ultimate CMM approach, this noncontact system is faster, but less accurate. The system might be also well used for dimensional inspection of other objects, for inspection of the mounting of parts of assemblies, and for other types of industrial control of part dimensions.

#### Acknowledgment

This work was financially supported by ETA Cerkno factory.

#### References

 Chang SF, Bone G-M. Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance. Robotics Comput-Integrated Manuf 2005;21:442–50.

- [2] Gillspie LK. Deburring and edge finishing handbook. Society of Manufacturing Engineers. New York: American Society of Mechanical Engineers, Corp; 1999.
- [3] Hsu FY, Fu LC. Intelligent robot deburring using adaptive fuzzy hybrid position/force control. IEEE Trans Robotics Autom 2000; 16:325–35.
- [4] Kiguchi K, Fukuda T. Position/force control of robot manipulators for geometrically unknown objects using fuzzy neural networks. IEEE Trans Ind Electron 2000;47(3):641–9.
- [5] Murphy K, Norcross R, Proctor F. CAD directed robotic deburring. In: Proceedings of the second international symposium on robotics and manufacturing research, education, and applications, Albuquerque, NM; November 1988.
- [6] Lu MC, Wang W-Y, Chu CY. Image-based distance and area measuring systems. IEEE Sensors J 2006;6(2):495–503.
- [7] Shen TS, Huang J, Menq CH. Multiple-sensor integration for rapid and high-precision coordinate metrology. IEEE/ASME Trans Mechatron 2000;5(2):110–21.
- [8] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light. IEEE Trans Instrum Meas 2000;49(3):628–36.
- [9] Sato O, Ishikawa H, Hiraki M, Takamasu K. The calibration of parallel-CMM: parallel-coordinate measuring machine, euspen 2002. Eindhoven, Holland. p. 573–76.
- [10] Nguyen HG. A simple method for range finding via laser triangulation. Technical Document 2734. San Diego, CA: Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, RDT&E Division; January 1995.
- [11] Schirripa Spagnolo G. Potentiality of 3D laser profilometry to determine the sequence of homogenous crossing lines on questioned document. Forensic Sci Int 2005.
- [12] Niel A, Kölpl SH, Burgstaller M. Robotic three-dimensional measurement system for complex metal parts using structured light. PCV02(B: 190).
- [13] Homh K, Ersü E, Wienand S, Lambert G. Robots as carrier for vision-sensors—chances and restrictions. In: Proceedings of the joint conference on robotics: ISR 2006, 37th international symposium on robotics and robotik 2006, 4th German conference on robotics, 15–17 May; 2006.
- [14] Cinkelj J, Rejc J, Munih M. Profile measurement using robot and distance sensor. In: Proceedings of the joint conference on robotics: ISR 2006, 37th international symposium on robotics and robotik 2006, 4th German conference on robotics; 15–17 May; 2006.
- [15] Teutsch C, Trostmann E, Weber M, Isenberg T. Evaluation and optimization of laser scan data. SimVis 2004; 311–22.
- [16] International Standard ISO 10360-2. Geometrical product specifications (GPS)—acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)—Part 2: CMMs used for measuring size. Geneva, International Organization for Standardization; 2001.
- [17] El-Hakim SF, Beraldin J-A, Blais F. A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems. In: SPIE proceedings, conference on digital photogrammetry, vol. 2646, St. Petersburg, Russia, 25–30 June 1995. p. 14–25.
- [18] Curless B, Levoy M. Better optical triangulation through spacetime analysis. In: Proceedings of IEEE international conference on computer vision, Cambridge, MA, USA, 20–23 June 1995. p. 987–94.
- [19] Häusler G, Kreipl S, Lampalzer R, Schielzeth A, Spellenberg B. New range sensors at the physical limit of measuring uncertainty. In: Proceedings of the EOS topical meeting on optoelectronics distance measurements and applications. Nantes, France, 8–10 July; 1997.

Please cite this article as: Rejc J, et al. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robot Comput Integr Manuf (2007), doi:10.1016/j.rcim.2007.11.001

## Izjava

Izjavljam, da sem doktorsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja prof. dr. Marka Muniha. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

V Ljubljani, 18.11.2008

Jure Rejc