

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Luka Pogačnik

**Lidarski sistem z več vidnimi polji za
zagotavljanje varnosti v robotiki**

Doktorska disertacija

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, 2024

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

LUKA POGAČNIK

temo za doktorsko disertacijo z naslovom:

Lidarski sistem z več vidnimi polji za zagotavljanje varnosti v robotiki

Multi-field-of-view lidar system for safety in robotics

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

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

- 1 Izdelan raziskovalni modularni lidarski sistem z možnostjo opazovanja internih signalov.
- 2 Preučeni vplivi nečistoč na zrcalih na meritve razdalje z uporabo lidarja pri preusmerjanju svetlobe izven lidarjevega mrtvega polja.
- 3 Preučeni vplivi zrcal iz sosednjih preusmerjanjih svetlobnih poti lidarja na meritev razdalje.
- 4 Razvit učinkovit algoritem za določanje pripadajočih referenčnih vrednosti meritev ne glede na hitrost izvajanja robotskih gibov.

Komisija za zagovor doktorske disertacije:

prof. dr. Boštjan Blažič, predsednik
prof. dr. Roman Kamnik, član
prof. dr. Janez Krč, član
Assist. Prof. dr. Luka Peternel, član
prof. dr. Rok Petkovšek, član
prof. dr. Marko Munih, mentor



Dekan:
prof. dr. Marko Topič

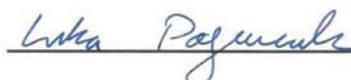
Spodaj podpisani študent, Luka Pogačnik, vpisna številka 64150151, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Lidarski sistem z več vidnimi polji za zagotavljanje varnosti v robotiki

IZJAVLJAM,

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

V: Ljubljani
Datum: 6. 9. 2024

Podpis študenta:



¹ Obkrožite varianto a) ali b).

Zahvala

Želim se zahvaliti svojemu mentorju, prof. Marku Munihu, za vso podporo, modrost in vodstvo med mojim doktorskim študijem. Brez njegovega strokovnega znanja, spodbudnih besed in nasvetov bi bilo izvajanje eksperimentov in pisanje člankov precej bolj kaotično.

Zahvalil bi se tudi ARIS, ki je s financiranjem omogočil moje raziskave.

In seveda, hvala vsem, ki ste me spremljali na tej poti - družina, prijatelji in tudi vsi ostali, s katerimi smo si prekrizali poti. Zaradi vas je bil celoten proces precej manj boleč!

Povzetek

V zadnjih letih se na področju industrijske robotike kaže trend nekoliko povečane uporabe sodelujočih robotov. Trenutno varnost dosegajo z omejevanjem moči in sil, nadaljnji razvoj pa poteka tudi na področju zagotavljanja varnosti z nadzorom nad hitrostjo in varnostno razdaljo. To lahko izmerimo z uporabo zunanjih globinskih kamer, demonstrirana pa je bila tudi uporaba množice individualnih lidarjev, pritrjenih na robota.

Namesto uporabe množice individualnih lidarjev, bi morda lahko podoben efekt dosegli z uporabo centraliziranega lidarja, čigar vidna polja s pomočjo zrcal statično prerazporedimo vzdolž robotovega segmenta. Ta vidna polja podajajo perspektivo iz množice točk na segmentih robota. Izdelali smo lidar z več kanali, ki omogoča vpogled v vse interne signale. Z njim smo preučili vpliv zrcal in prizem na meritev razdalje. Preizkusili smo različne vrste zrcal v čistem in nekoliko zaprašenem stanju. Poleg tega smo preverili tudi vplive preusmerjanja svetlobe med več sosednjimi kanali.

Ugotovitve kažejo, da tip zrcala ni pomemben, velik vpliv pa imajo nečistoče na zrcalu. Del svetlobe se odbije že od njih, skupaj z odbojem svetlobe od tarče pa se signala seštejeta v popačen odboj, ki prinese negativno merilno napako. Zaradi vzpostavljanja novih svetlobnih poti prek sosednjih zrcal, lahko do napake pride tudi, kadar so zrcala za preusmerjanje sosednjih svetlobnih poti znotraj vidnega polja opazovanega kanala. Če je dodatna svetlobna pot krajša od primarne, privede do negativne merilne napake, v nasprotnem primeru pa je napaka pozitivna. V obeh primerih so napake prisotne le na delu merilnega območja.

Poleg tehnične izvedbe prerazporejanja vidnega polja smo se poglobili tudi v možno uporabo. Za dobro rekonstrukcijo okolice robota je potrebno poznati pozicije in oblike vidnih polj uporabljenih senzorjev, kar je ne trivialna zahteva. Vendar dobra rekonstrukcija okolice za povečanje varnosti morda ni nujno potrebna. Izdelan in preizkušen je bil sistem za sprotno zaznavanje nepričakovanega posega v robotov delovni prostor, ki deluje na podlagi primerjave trenutnih meritev z vsebino prilagodljive referenčne tabele. Za določanje pripadajoče referenčne vrednosti se zanaša na poznavanje trenutnih pozicij in hitrosti robotskih sklepov. Sistem je preizkušen, ustrezno delovanje pa je prikazano tudi v sodelujoči aplikaciji, kjer se človek giblje v neposredni bližini in mu nenehno posega v delovni prostor.

Ključne besede: lidar, preusmerjanje vidnega polja, zrcalo, vpliv na meritev, adaptivna referenca

Abstract

In recent years, there has been a shift in industrial robotics towards increased use of collaborative robots. Currently, safety is ensured by power and force limiting, but further development is also happening in the area of speed and separation monitoring. This can be measured using external depth cameras, and the use of multiple individual lidars attached to the robot has also been demonstrated.

Instead of using multiple individual lidars, the same effect might be achieved by using a centralized lidar, whose fields of view (FOVs) are statically redistributed along the robot's segment using mirrors. These fields of view provide perspective from multiple points on the robot's segments. We developed a multi-channel lidar that provides insight into all internal signals. With it, we examined the influence of mirrors and prisms on distance measurement. We tested different types of mirrors in both clean and dusty conditions. Additionally, we also investigated the effects of light redirection between multiple adjacent channels.

Findings indicate that the type of mirror is not significant, but dust on the mirror has a significant impact. Some light is reflected off it, and when combined with the reflection of light from the target, the signals add up to distorted reflection, resulting in a negative measurement error. Due to the establishment of new light paths, errors can also occur when mirrors for redirecting adjacent light paths are within the FOV of the observed channel. If the additional light path is shorter than the primary one, it leads to a negative measurement error; otherwise, the error is positive. In both cases, errors occur only in part of the measurement range.

In addition to the technical implementation of FOV redistribution, we also delved into possible applications. For a good reconstruction of the robot's surroundings, it is necessary to know the positions and shapes of the FOVs of the sensors used, which is a non-trivial requirement. However, a good reconstruction of the environment might not necessarily be required to increase safety. A system for real-time detection of unexpected intrusion in the robot's workspace has been developed. To determine the corresponding reference value, it relies on knowledge of the current positions and velocities of the robot's joints. The system has been tested and its proper operation is also demonstrated in collaborative applications, where a person moves in close proximity and constantly intrudes in the robot's immediate vicinity.

Keywords: lidar, FOV redirection, mirror, effect on measurement, adaptive reference

Kazalo

1	UVOD	1
1.1	Zagotavljanje varnosti	2
1.2	Zaznavanje posega v okolico robota	4
1.3	Cilji doktorske disertacije	6
2	BREZKONTAKTNO MERJENJE RAZDALJE	9
2.1.1	Kapacitivni senzorji	9
2.1.2	Svetlobni senzorji	9
2.2	Merjenje razdalje na podlagi časa preleta	10
2.2.1	Zvočno valovanje	11
2.2.2	Radijsko valovanje	11
2.2.3	Svetlobno valovanje	12
2.3	Evalvacija komercialnih lidarskih modulov	17
2.3.1	Analiza delovanja senzorja VL53L0X	18
2.3.2	Analiza delovanja senzorja VL53L1	22
2.3.3	Povzetek preizkušanja lidarjev in izbor za nadaljnje delo	26
3	LIDARSKI SISTEM Z VEČ VIDNIMI POLJI	29
3.1	Vidno polje	29
3.1.1	Optika na sprejemniku	30
3.1.2	Optika na oddajniku	31
3.2	Izplen koristnega signala	33
3.2.1	Šum iz okolice	33
3.2.2	Ocena moči odbitega signala	35
3.2.3	Izbor fotodiode	35
3.2.4	Omejitev moči svetlobnega vira	36
3.3	Poznavanje lastnosti medija	37
3.4	Zasnova lidarskega sistema z več vidnimi polji	37
3.4.1	Matična plošča	38
3.4.2	Sateliti	39

3.5	Opis delovanja posamičnih blokov	40
3.5.1	Oblikovanje pulza	40
3.5.2	Oddajnik svetlobe	41
3.5.3	Sprejemnik svetlobe	42
3.6	Merjenje časa preleta in določanje razdalje	45
3.6.1	Hod meritve	47
4	EVALVACIJA LIDARSKEGA SISTEMA S PREUSMERJENIMI VIDNIMI POLJI	53
4.1	Vpliv nečistoč na odklonskem elementu	55
4.1.1	Merilna oprema	55
4.1.2	Rezultati	58
4.1.3	Diskusija	62
4.2	Medsebojni vpliv sosednjih kanalov	66
4.2.1	Merilna oprema	67
4.2.2	Rezultati	68
4.2.3	Diskusija	71
4.3	Eliminacija problemov	74
4.3.1	Uporaba različnih svetlobnih poti za oddano in odbito svetlobo	75
4.3.2	Uporaba ločenih a podobnih svetlobnih poti	76
4.4	Sklepne misli o preusmerjanju vidnega polja	77
5	SPROTNA DETEKCIJA NEPRIČAKOVANEGA POSEGA V ROBOTOV DELOVNI PROSTOR	79
5.1	Delovanje sistema za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor	81
5.1.1	Določanje pripadajoče referenčne vrednosti meritev	83
5.1.2	Prilagajanje na spremenljivo okolje	87
5.1.3	Implementacija sistema	90
5.2	Eksperimentalna postavitev	91
5.3	Rezultati	94
5.3.1	Scenarij 1 – preizkus osnovnih funkcionalnosti v praznem okolju	94
5.3.2	Scenarij 2 – preizkus delovanja v kompleksnejšem okolju	96

5.3.3	Scenarij 3 – preizkus delovanja v časovno spremenljivem okolju	97
5.3.4	Scenarij 4 – preizkus delovanja pri sodelovanju med robotom in človekom	99
5.4	Diskusija	100
5.5	Nadaljnje delo	103
6	ZAKLJUČEK	105
	LITERATURA	111

Seznam slik

SLIKA 2.1: SHEMA DELOVANJA MERILCA RAZDALJE NA PODLAGI DIREKTNEGA MERJENJA ČASA PRELETA	11
SLIKA 2.2: SHEMA DELOVANJA AMCW LIDARJA. ODDAJNIK (T_x) ODDAJA MODULIRANO SVETLOBO, KI SE ODBIJE OD TARČE IN DO SPREJEMNIKA (R_x) PRIDE S FAZNM ZAMIKOM (θ).	13
SLIKA 2.3: ZVEZA MED MODULACIJSKO FREKVENCO TER NEGOTOVOSTJO MERITVE. PRI MERITVI FAZE Z ENAKO NEGOTOVOSTJO (VERTIKALNA OS) JE NEGOTOVOST MERITVE RAZDALJE (HORIZONTALNA OS, ORANŽNO) ODVISNA OD FREKVENCE OZIROMA OBMOČJA Z ENOLIČNO DOLOČLJIVO RAZDALJO. Z VIŠANJEM MODULACIJSKE FREKVENCE JE NEGOTOVOST MERITVE RAZDALJE MANJŠA, HKRATI PA LAHKO PRIDE DO NAVIDEZNIH SLIK TARČE (HORIZONTALNA OS, MODRO).	14
SLIKA 2.4: SHEMA IQ DEMODULATORJA ZA IZRAČUN FAZNEGA ZAMIKA. SPREJEMNI SIGNAL SE RAZDELI NA VEJI I TER Q, NA KATERIH SE POMNOŽI S SINUSOM OZIROMA KOSINUSOM, KI STA FAZNO UJETA Z ODDAJNIM SIGNALOM. OBE FAZI POTUJETA SKOZI NIZKOPREPUSTNO SITO, NAKAR SE MED NJIMA IZRAČUNA FAZNI ZAMIK, KI JE SORAZMERN FAZNEMU ZAMIKU MED ODDANIM IN SPREJETIM SIGNALOM.	16
SLIKA 2.5: ILUSTRACIJA PRINCIPA DELOVANJA FMCW LIDARJA. FREKVENCA ODDANEGA SIGNALA SE S ČASOM SPREMINJA. KER MED ODDAJO IN PREJEMOM ODBITE SVETLOBE PRETEČE NEKAJ ČASA, PRIDE DO RAZLIKE V FREKVENCI MED ODDANO IN PREJETO SVETLOBO, IZ KATERE JE MOGOČE POSREDNO DOLOČITI ODDALJENOST TARČE.	17
SLIKA 2.6: MERILNA NEGOTOVOST MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L0X ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI VELIKE TARČE.	19
SLIKA 2.7: MERILNI POGREŠEK MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L0X ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI VELIKE TARČE.	20
SLIKA 2.8: MERILNA NEGOTOVOST MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L0X ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI MALE TARČE.	20
SLIKA 2.9: POGOSTOST NEVELJAVNIH MERITEV S SENZORJEM VL53L0X V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE MED SENZORJEM IN TARČO.	21
SLIKA 2.10: MERILNI POGREŠEK MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L0X ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI MALE TARČE.	22

SLIKA 2.11: MERILNA NEGOTOVOST MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L1 ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI VELIKE TARČE.	23
SLIKA 2.12: MERILNI POGREŠEK MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L1 ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI VELIKE TARČE.	23
SLIKA 2.13: MERILNI POGREŠEK MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L1 ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI MALE TARČE.	24
SLIKA 2.14: MERILNI POGREŠEK MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L1 ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI MALE TARČE Z OMEJENO VERTIKALNO OSJO.	24
SLIKA 2.15: MERILNA NEGOTOVOST MERITEV RAZDALJE S SENZORJEM VL53L1 ZA RAZLIČNE BARVE TARČE IN RAZLIČNE ČASE MERITEV PRI UPORABI MALE TARČE.	25
SLIKA 2.16: KORELACIJA MED RAZTROSOM MERITEV KORISTNEGA SIGNALA TER RAZTROSOM MERITEV RAZDALJE PRI MERJENJU ODDALJENOSTI MALE BELE TARČE S SENZORJEM VL53L1.	25
SLIKA 2.17: DETAJL ANALIZE KORELACIJE MED RAZTROSOM MERITEV KORISTNEGA SIGNALA TER RAZTROSOM MERITEV RAZDALJE PRI MERJENJU ODDALJENOSTI MALE BELE TARČE S SENZORJEM VL53L1.	26
SLIKA 3.1: PRIKAZ DELOVANJA MRTVEGA POLJA IZ STRANI (LEVO) TER PREČNI POGLED NA KONCU MRTVEGA POLJA (A) IN KONCU DELNO MRTVEGA POLJA (B).	30
SLIKA 3.2: SHEMA VIDNEGA POLJA SPREJEMNIKA.	30
SLIKA 3.3: OBČUTLJIVOST SPREJEMNIKA V ODVISNOSTI OD KOTA.	31
SLIKA 3.4: SHEMA ODDANEGA SNOPA SVETLOBE.	32
SLIKA 3.5: OBLIKA SNOPA SVETLOBE NA RAZDALJI 10 CM, 40 CM IN 80 CM OD LIDARJA.	33
SLIKA 3.6: GOSTOTA MOČI SONCA NA POVRŠINI ZEMLJE PO STANDARDU ASTM G173.	34
SLIKA 3.7: SPEKTER MOTILNEGA SIGNALA ZA IZBRANO FOTODIODO S PLAZOVNIM PREBOJEM PRI DANI OBČUTLJIVOSTI IN OKOLIŠKI OSVETLJENOSTI.	34
SLIKA 3.8: POENOSTAVLJENA SHEMA MODULARNEGA LIDARKEGA SISTEMA.	38
SLIKA 3.9: MODULARNI LIDARSKI SISTEM S TREMI SATELITI S POGLEDOM (A) OD SPREDAJ IN (B) OD ZADAJ.	39
SLIKA 3.10: VEZJE ZA OBLIKOVANJE PULZA.	41
SLIKA 3.11: SHEMA VEZJA NA ODDAJNIKU.	42

SLIKA 3.12: TRANSIMPEDANČNI OJAČEVALNIK S FOTODIODO V DC VEZAVI (LEVO) IN AC VEZAVI (DESNO).....	43
SLIKA 3.13: SHEMA VEZJA NA SPREJEMNIKU.....	44
SLIKA 3.14: PRIMERI OBLIKE SVETLOBNEGA PULZA ZA TIA PRI RAZLIČNIH ODDALJENOSTIH TARČE.....	44
SLIKA 3.15: OBLIKE SIGNALOV NA ODDAJNIKU TER SPREJEMNIKU, ZA PRIMERJALNIKOM IN ZA OBLIKOVALNIKOM PULZA.....	45
SLIKA 3.16: SHEMATSKI PRIKAZ DEJANSKE POTI SVETLOBE MED ODDAJNIKOM (Tx), TARČO IN SPREJEMNIKOM (Rx).....	46
SLIKA 3.17: VPLIV AMPLITUDE PREJETEGA PULZA NA ČAS IN ŠIRINO ZAZNANEGA PULZA.....	48
SLIKA 3.18: HOD MERITVE V ODVISNOSTI OD ZAZNANE ŠIRINE PULZA ZA SUROVE MERITVE (RUMENO) IN TEKOČE POVPREČJE OSMIH MERITEV (ZELENO) TER ODSEKOMA LINEARNA KOMPENZACIJSKA FUNKCIJA (MODRO).....	48
SLIKA 3.19: (A) PRIMERJAVA MED SUROVO IN KOMPENZIRANO MERITVIJO RAZDALJE NA MNOŽICI MERITEV PRI NARAŠČAJOČI NASTAVLJENI RAZDALJI, (B) MERILNI POGREŠEK SUROVE MERITVE V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE, (C) ŠIRINA ZAZNANEGA PULZA V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE TER (D) MERILNI POGREŠEK IN STANDARDNA DEVIACIJA KOMPENZIRANIH MERITEV V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE.....	50
SLIKA 3.20: (A) MERILNI POGREŠEK V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE TER (B) STANDARDNA DEVIACIJA MERITEV V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE.....	51
SLIKA 4.1: PRIMERJAVA VIDNEGA POLJA SKAENIRAJOČEGA LIDARJA (LEVO) TER LIDARJA S STATIČNO RAZPOREJENIMI VIDNIMI POLJI (DESNO).....	53
SLIKA 4.2: ILUSTRACIJA PRIMERA IMPLEMENTACIJE LIDARJA Z VEČ VIDNIMI POLJI, KI SO PREUSMERJENA S STATIČNIMI ZRCALI.....	54
SLIKA 4.3: ILUSTRACIJA VIDNEGA POLJA LIDARJA PRI (A) DIREKTNI MERITVI, (B) MERITVI S PREUSMERJANJEM VIDNEGA POLJA Z ZRCALOM V MRTVEM POLJU TER (C) MERITVI S PREUSMERJANJEM VIDNEGA POLJA Z ZRCALOM IZVEN MRTVEGA POLJA LIDARJA.....	54
SLIKA 4.4: MERILNA POSTAVITEV ZA PREIZKUŠANJE VPLIVA NEČISTOČ NA ODKLONSKEM ELEMENTU.....	56
SLIKA 4.5: TOTALNA IN ODBOJNOST ZRCAL S5003, MES2-P01 IN MES2-G01 V ČISTEM IN ZAPRAŠENEM STANJU.....	57

SLIKA 4.6: DIFUZNA IN ODBOJNOST ZRCAL S5003, MES2-P01 IN MES2-G01 V ČISTEM IN ZAPRAŠENEM STANJU.	57
SLIKA 4.7: TOTALNA ODBOJNOST TARČE (ČRNO), DIFUZNA ODBOJNOST TARČE (ORANŽNO) TER IZRAČUNANI FAKTOR RAZPRŠITVE (MODRO).	58
SLIKA 4.8: MERILNI POGREŠEK PRI MERJENJU PREKO ZRCALA ZA KONFIGURACIJO S (A) ČISTIM ZRCALOM Z ODBOJEM NA SPREDNJI POVRŠINI, (B) ZAPRAŠENIM ZRCALOM Z ODBOJEM NA SPREDNJI POVRŠINI, (C) ČISTIM KLASIČNIM ZRCALOM TER (D) ZAPRAŠENIM KLASIČNIM ZRCALOM PRI RAZLIČNIH RAZDALJAH MED LIDARJEM IN ZRCALOM.	59
SLIKA 4.9: OBLIKA ODBITEGA SVETLOBNEGA SIGNALA PRI MERJENJU PREKO MOČNO ZAPRAŠENEGA ZRCALA Z ODBOJEM NA SPREDNJI POVRŠINI. SIGNAL JE VZORČEN ZA TRANSIMPEDANČNIM OJAČEVALNIKOM. Z MODRO JE PRIKAZAN SIGNAL, KO TARČE NI V LIDARJEVEM MERILNEM OBMOČJU, Z ORANŽNO PA JE PRIKAZAN SIGNAL ZA TARČO ODDALJENO 4 M OD LIDARJA.	60
SLIKA 4.10:(A) MERILNI POGREŠEK PRI VZORČENJU PREKO PRIZME IN (B) MERITVE RAZDALJE V ODVISNOSTI OD NASTAVLJENE RAZDALJE PRI VZORČENJU PREKO PRIZME.	61
SLIKA 4.11: IZRAČUN RAZMERJA AMPLITUD KORISTNEGA IN PARAZITNEGA ODBOJA OB PREDPOSTAVLJENI REFLEKTIVNOSTI SVETLOBE 1 % OD NEČISTOČ NA ZRCALU IN 85 % OD TARČE.	64
SLIKA 4.12: (A) NA STOJALO PRITRJEN MODULARNI LIDARSKI SISTEM Z MATIČNO PLOŠČO IN TREMI SATELITI PRITRJENIMI NA SKUPNO PODLAGO TER (B) MERILNA POSTAVITEV ZA MERITEV S TREMI PREUSMERJENIMI VIDNIMI POLJI.	67
SLIKA 4.13: POGREŠEK MERITEV (A) PRVEGA KANALA OB PRISOTNOSTI ZRCALA LE NA PRVEM KANALU, (B) PRVEGA KANALA OB PRISOTNOSTI VSEH TREH ZRCAL, (C) DRUGEGA KANALA OB PRISOTNOSTI LE DRUGEGA ZRCALA, (D) DRUGEGA KANALA OB PRISOTNOSTI VSEH TREH ZRCAL, (E) TRETJEGA KANALA OB PRISOTNOSTI LE TRETJEGA ZRCALA TER (D)TRETJEGA KANAL OB PRISOTNOSTI VSEH TREH ZRCAL.	69
SLIKA 4.14: POGREŠEK MERITVE OB PRISOTNOSTI ZRCALA NA PRVEM IN DRUGEM KANALU ZA (A) PRVI KANAL IN (B) DRUGI KANAL.	70
SLIKA 4.15: POGREŠEK MERITVE OB PRISOTNOSTI ZRCALA NA DRUGEM IN TRETJEM KANALU ZA (A) DRUGI KANAL IN (B) TRETJI KANAL.	70
SLIKA 4.16: POGREŠEK MERITVE OB PRISOTNOSTI ZRCALA NA PRVEM IN TRETJEM KANALU ZA (A) PRVI KANAL IN (B) TRETJI KANAL.	71

SLIKA 4.17: ILUSTRACIJA SVETLOBNIH POTI ODBITE SVETLOBE PRI RAZLIČNIH RAZDALJAH MED ZRCALI IN TARČO.....	72
SLIKA 4.18: SHEMATSKI PRIKAZ MERJENJA Z LOČENIMI SVETLOBNIMI POTMI ZA ODDAJNIK IN SPREJEMNIK.	75
SLIKA 4.19: SVETLOBNE POTI ODDANE IN ODBITE SVETLOBE ZA RAZLIČNE OBLIKE IN POSTAVITVE TARČ.	76
SLIKA 4.20: PRIMER PREUSMERJANJA VIDNEGA POLJA Z UPORABO OBLIKOVANEGA ZRCALA. ..	77
SLIKA 5.1: DIAGRAM POTEKA PROGRAMA ZA SPROTNO DETEKCIJO SPREMEMB V OKOLICI ROBOTA.	82
SLIKA 5.2: GRAFIČNI PRIKAZ POSTOPKA DOLOČANJA INDEKSA REFERENČNE VREDNOSTI, KI PRIPADA TRENUTNEMU STANJU ROBOTA.	84
SLIKA 5.3: GRAF VSEBINE RLUT, RAZDELJEN NA (A) KOTE IN (B) NORMALIZIRANE HITROSTI ROBOTOVIH SKLEPOV ZA PRIMER PREPROSTE APLIKACIJE POBIRANJA IN ODLAGANJA KOSOV.	85
SLIKA 5.4: IZRAČUN ODPSTOPANJA MED TRENUTNO LEGO IN VNOSI V RLUT.....	86
SLIKA 5.5: IZRAČUN ODPSTOPANJA MED TRENUTNO LEGO IN VNOSI V RLUT NA IZSEKU LUT V BLIŽINI SPREMEMBE SMERI GIBANJA PO ISTI TRAJEKTORIJI.	86
SLIKA 5.6: (A) PRIKAZ POSTAVITVE, NA KATERI JE BILO ZAJETO PRILAGAJANJE REFERENČNE MERITVE IN (B) ILUSTRACIJA GIBA, ŠKATLE IN VIDNEGA POLJA SENZORJA RAZDALJE TEKOM ZBIRANJA MERITVE.....	88
SLIKA 5.7: GRAF (A) MERITEV RAZDALJE OPAZOVANEGA SENZORJA IN (B) REFERENČNIH MERITVE TEKOM PRILAGAJANJA NA OVIRO V DELOVNEM PROSTORU.....	90
SLIKA 5.8: POSTAVITEV LIDARJEV NA ROBOTU IN ILUSTRACIJA NJIHOVIH VIDNIH POLJ.	91
SLIKA 5.9: EKSPERIMENTALNA POSTAVITEV ZA PREVERJANJE DELOVANJA SISTEMA (A) V PREPROSTI APLIKACIJI ROBOTSKE MANIPULACIJE IZDELKA, (B) SODELUJOČI MANIPULACIJI OBJEKTA, KJER SODELUJETA DVA ROBOTA IN (C) SODELUJOČI MANIPULACIJI OBJEKTA, KJER SODELUJETA ROBOT IN ČLOVEK.	93
SLIKA 5.10: GRAFI NORMALIZIRANIH RELATIVNIH ODPSTOPANJ MERITEV SENZORJEV OD REFERENČNIH VREDNOSTI, KO SE ROBOT GIBLJE V PRAZNEM PROSTORU. MED EKSPERIMENTOM JE BILA V PROSTOR DODANA ŠKATLA, ROBOTA SMO TEKOM NASLEDNJIH PET CIKLOV MED UPOČASNJENIM GIBANJEM DREGALI IN KASNEJE ŠKATLO ODSTRANILI. ..	95

SLIKA 5.11: GRAFI NORMALIZIRANIH RELATIVNIH ODPANJ MERITEV SENZORJEV OD REFERENČNIH VREDNOSTI, KO ROBOT SAMOSTOJNO KOS PRELAGA MED TEKOČIM TRAKOM IN ODLOŽIŠČEM. MED EKSPERIMENTOM JE BILA V ROBOTOV DELOVNI PROSTOR DODANA ŠKATLA, KASNEJE PA JE BILA TUDI ODSTRANJENA.	97
SLIKA 5.12: GRAFI NORMALIZIRANIH RELATIVNIH ODPANJ MERITEV SENZORJEV OD REFERENČNIH VREDNOSTI, KO ROBOT V SODELOVANJU Z DRUGIM ROBOTOM KOS PRELAGA MED TEKOČIM TRAKOM IN ODLOŽIŠČEM.	98
SLIKA 5.13: GRAFI NORMALIZIRANIH RELATIVNIH ODPANJ MERITEV SENZORJEV OD REFERENČNIH VREDNOSTI, V SODELUJOČI APLIKACIJI, KO ROBOT IN OPERATER KOS SKUPAJ PRELAGATA MED TEKOČIM TRAKOM IN ODLOŽIŠČEM.	99

Seznam tabel

TABELA 2.1: PREGLED UPORABNIH DOMETOV LIDARJEV	27
TABELA 3.1: PRIMERJAVA SiPM, APD IN PIN FOTODIODE.	36
TABELA 4.1: MAKSIMALNE STANDARDNE DEVIACIJE MERITEV PO KONFIGURACIJAH.	62
TABELA 5.1: BARVNA LEGENDA, UPORABLJENA V PREDSTAVITVI REZULTATOV.	94

Seznam kratic

PFL	Omejevanje moči in sil (ang. Power and Force Limiting)
SSM	Nadzorovanje hitrosti in varnostne razdalje (ang. Speed and Separation Monitoring)
TDC	Časovno digitalni pretvornik (ang. Time to Digital Converter)
AMCW	Konstantna amplitudna modulacija (ang. Amplitude Modulation Continuous Wave)
Tx	Oddajnik (ang. Transmitter)
Rx	Sprejemnik (ang. Receiver)
FMCW	Konstantna frekvenčna modulacija (ang. Frequency Modulation Continuous Wave)
SNR	Razmerje med signalom in šumom (ang. Signal to Noise Ratio)
APD	Plazovna fotodioda (ang. Avalanche Photodiode)
SiPM	Silicijeva pomnoževalka (ang. Silicon Photomultiplier)
SPAD	APD v Geigerjevem režimu (ang. Single Photon Avalanche Diode)
IR	Infrardeča
MCU	Mikrokontroler (ang. Microcontroller Unit)
ADC	Analogno digitalni pretvornik
DAC	Digitalno analogni pretvornik
SDNP	Sprotna detekcija nepričakovanega posega
LUT	Vpogledna tabela (ang. Look Up Table)
PLr	Zahtevana raven zmogljivosti (ang. required Performance Level)
SIL	Nivo varnostne integritete (ang. Safety Integrity Level)
HFT	Odpornost na okvare (ang. Hardware Fault Tolerance)
SFF	Delež varnih odpovedi (ang. Safe Failure Fraction)

Seznam simbolov

Velčina/Oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
čas	t	sekunda	s
hitrost širjenja valovanja	c	meter na sekundo	m s^{-1}
razdalja	d, D, a, b	meter	m
frekvenca	F	herc	Hz
fazni zamik	θ	radian	/
enolično določljiva razdalja	r	meter	m
valovna dolžina	λ	nanometer	nm
čas meritve	T	sekunda	s
pasovna širina	B	herc	Hz
kot	φ, ϕ	radian	/
dolžina	d, y	meter	m
moč	P	vat	W
učinkovitost	G	/	/
radij	r	meter	m
dejanska dolžina poti	l	meter	m
moč	P	vat	W
odbojnost	R	/	/
lomni količnik	n	/	/
kotna hitrost	ω	radian na sekundo	rad s^{-1}
varnostna razdalja	S	meter	M
hitrost približevanja	K	meter na sekundo	m s^{-1}
odzivni čas	T	sekunda	S
dodatna varnostna razdalja	C	meter	M

Natančnejši pomen simbolov ter njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

1 Uvod

Začetki lidarja segajo v trideseta leta devetnajstega stoletja, ko so znanstveniki s pomočjo močnih reflektorjev želeli preučevati sestavo atmosfere. Prvi takšen sistem je bil izdelan leta 1930 [1], za določanje odboja od različnih delov atmosfere pa se je zanašal na triangulacijo. Do ključnega napredka je prišlo v letu 1939, ko so namesto konstantne svetlobe začeli uporabljati modulirano svetlobo. Namesto filma so za detekcijo uporabili fotoelektrično celico, katere izhodni signal so ojačali sofazno z modulacijo oddane svetlobe [2]. Glede na način delovanja je bil torej prvi vremenski lidar tako imenovani AMCW lidar, čigar delovanje je natančneje opisano v poglavju 2.2.3.2. Lidarje se za analizo atmosfere uporablja tudi dandanes [3], [4].

Razvoj prvega merilca razdalje na podlagi časa preleta svetlobe se je začel leta 1938, kot stranski produkt iskanja metode za natančno merjenje hitrosti svetlobe. Določanje hitrosti svetlobe na podlagi meritve časa preleta znane razdalje in določanje razdalje na podlagi meritve časa preleta pri znani hitrosti širjenja valovanja sta si namreč neposredno sorodna. Pod imenom Geodimeter je bil prvi lidar razvit leta 1947 [5]. Za delovanje je uporabljal živosrebrno žarnico, čigar oddano svetlobo je moduliral z uporabo Kerrove celice. Sofazno je moduliral tudi občutljivost fotopomnoževalke, ki je služila kot svetlobni sprejemnik [6]. Zaradi sofazne modulacije je bila intenziteta izhodnega signala zato sorazmerna faznemu zamiku med oddano in sprejeto svetlobo, ki pa je bil sorazmeren oddaljenosti tarče. Za povečan izplen signala je tarčo vedno predstavljal retroreflektor. Glede na način delovanja je torej tudi prvi lidar za določanje razdalje izkoriščal AMCW princip delovanja. Geodimeter je bil primarno namenjen uporabi za geodetske meritve.

Velik napredek na področju tehnologije lidarjev je nastopil po letu 1957, ko je bil izumljen laser. Leta 1960 sta bila izdelana prvi rubinov [7] in prvi plinski (He-Ne) laser [8]. Leto kasneje je z izumom metode preklapljanja Q [9] postalo mogoče z rubinovim laserjem oddajati izjemno kratke svetlobne pulze z visoko energijsko gostoto [10]. Od tu naprej je šel razvoj zelo hitro. Nekoč je bil lidar dojeman kot slabša alternativa radarja [11], že v drugi polovici leta 1961 pa so z izdelavo prvega laserskega lidarja, poimenovanega Colidar, prepoznali bistveno večjo prostorsko ločljivost lidarja napram mikrovalovnemu radarju ter možnost izdelave znatno bolj kompaktne naprave [12]. Leta 1962 je bil zaznan prvi odboj svetlobe rubinovega laserja od površine Lune [13], isti raziskovalci pa so leta 1963 tudi uspešno zaznali razpršeni odboj svetlobe od atmosfere 60 km do 140 km nad morsko gladino [14]. Laserska tehnologija je med

drugim omogočila natančnejšo analizo relacije med Zemljo in Luno, pri čemer so bili v šestdesetih in sedemdesetih letih devetnajstega stoletja aktivni predvsem ameriški in sovjetski znanstveniki [15]. Na prelomu desetletja so tako ameriški kot sovjetski znanstveniki na površino lune postavili vsaki svoje retroreflektorje, s čimer je postalo določanje razdalje enostavnejše, saj se je od njih do lidarja vrnil večji delež oddane svetlobe [16].

Poleg razvoja na področju vesoljskih in atmosferskih meritev, se je področje lidarjev krepilo tudi v sferi določanja razdalje na površini Zemlje. V letu 1963 so poročali o novi verziji Colidarja z imenom Colidar Mark II. To je ročni lidar z dometom 11 km in točnostjo 4,5 m [17], ki je bil razvit za vojaške namene. Leta 1968 je na tržišče prišel Geodimeter Model 8, ki je prvič za svetilo uporabil He-Ne. Ta model je uporabljal tudi pasovno prepustni svetlobni filter, ki je odstranil večino svetlobe izven laserjevega spektra [5]. S tem je lahko ne glede na čas v dnevnu meril tarče oddaljene do 60 km.

V sledečih letih je sledila množica izboljšav, ki pa so bile usmerjene v reševanje specifičnih problemov. Dandanes se lidarje pogosto uporablja za geodetske meritve [18], [19], zračno profiliranje površine Zemlje [20], [21] in oceanov [22], [23], čedalje pogosteje pa se za nadzor okolice uporabljajo tudi v samovozečih vozilih [24], [25], [26].

Poleg navedenega je šel razvoj tudi v smeri miniaturizacije in nižanja cene, zaradi česar se lidarji pojavljajo na vse več mestih. Lidarje tako najdemo tudi v mobilnih telefonih [27], [28], robotskih sesalnikih [29] in še mnogo drugih napravah. Nazadnje omenimo še, da se lidarji, natančnejše linijski lidarski skenerji, pogosto uporabljajo za zagotavljanje varnosti v industrijskih okoljih [30].

1.1 Zagotavljanje varnosti

V industriji se kaže trend robotizacije vse večjega dela proizvodnih procesov, kar se odraža tudi v čedalje večjem številu robotov v uporabi [31]. Pri tem je varnost ključnega pomena. Osnovne varnostne zahteve za industrijske robote so opisane v standardu ISO 10218-1 [32]. Ta je nadgradnja standarda ISO 12100, ki se nanaša na stroje v splošnem [33]. Oba sta namenjena predvsem proizvajalcem robotov, in narekujeta inherentno varno zasnovano naprav. Pri implementaciji robota v delovno okolje je pomemben še standard ISO 10218-2, ki se nanaša na robotske celice [34]. Po standardu se med normalno rabo robot ne sme gibati, ko je delavec v njegovem delovnem prostoru. Tradicionalno se je zahtevi zadostilo z omejevanjem robotskih

celic s fizično ogrado. To je znatno otežilo kakršno koli sodelovanje med človekom in robotom. Ovirano je bilo že samo podajanje objektov za manipulacijo.

Namesto fizične pregrade je mogoče uporabiti tudi tako imenovane mehke pregrade. Robotovo gibanje lahko omejimo na podlagi detekcije posega v fizično ne ograjen varnostni prostor. To lahko dosežemo z uporabo svetlobnih zaves, skenirajočih lidarjev ali drugih ustreznih senzorskih sistemov. V tem primeru je še vedno treba preprečiti možnost za trk z robotom. Pozicije varnostnih naprav in zahtevane varnostne razdalje glede na hitrost približevanja dela človekovega telesa so opisane v standardu ISO 13855 [35].

Ko operater vstopi v robotov delovni prostor, se mora robot zaustaviti. Število nepotrebnih zaustavitvev se lahko zmanjša z vpeljavo več varnostnih con. Ko delavec vstopa od zunanje varnostne cone v čedalje bolj notranjo, se gibanje robota postopoma upočasnjuje, robot pa se dokončno zaustavi šele, ko delavec vstopi v skrajno notranjo varnostno cono. S tem je podajanje objektov za manipulacijo mnogo enostavnejše, tesno sodelovanje med človekom in robotom pa še vedno ni mogoče. Za reševanje te problematike se je razvila posebna veja sodelujočih robotov. Ti so izdelani tako, da minimizirajo možnost za povzročanje poškodbe delavca. Poleg omejevanja hitrosti in sil, k večji varnosti pripomore varnostno izobraževanje delavcev, nekateri sodelujoči roboti pa se poslužujejo tudi podajnih mehanizmov in uporabe mehkih oblog [36].

Uporaba sodelujočih robotov nudi več prednosti. Ker sodelujoči roboti ne potrebujejo dodatne varnostne opreme, se jih lahko preprosto premika iz enega konca tovarne na drugega za namen opravljanja druge naloge [37], ugodna pa je tudi možnost programiranja z demonstracijo [38], [39]. Seveda je tudi pri sodelujočih robotih potrebno zagotoviti varno delovanje. Zahteve za sodelujoče robote opisuje tehnična specifikacija ISO/TS 15066 [40]. V njem je definiranih dvanajst območij, za katere je določena največja dovoljena energija, ki se v telo prenese ob trku. Trk z glavo in sprednjim delom vratu ni dovoljen. Tehnična specifikacija ISO/TS 15066 bo v rabi le še nekaj časa. V času pisanja tega dela sta pripravljena osnutka posodobljenih standardov ISO/DIS 10218-1 in ISO/DIS 10218-2, ki bosta poleg vsebine svojih predhodnikov vključevala tudi vsebino ISO/TS 15066 [41], [42].

V sodelujočih aplikacijah je predpostavljeno, da lahko pride do trka med človekom in robotom. Za preprečevanje poškodb se mora zato robot gibati ustrezno počasi, kar pa pomeni tudi počasnejše izvajanje naloge. S tem razlogom se lahko na podlagi zaznane varnostne razdalje

med človekom in robotom preklaplja med sodelujočim in industrijskim delovanjem. To je tako imenovano prostorsko preklapljanje med načini delovanja. Poleg tega lahko med načini delovanja preklapljamo tudi glede na trenutno nalogo ali krmilni dogodek.

Sodelujoči roboti se lahko pri zagotavljanju varnosti zanašajo na nadzor nad hitrostjo in varnostno razdaljo (ang. Speed and Separation Monitoring, SSM) ali pa na omejevanje hitrosti in sil (ang. Power and Force Limiting, PFL). Trenutno dostopni komercialni sodelujoči roboti se za zagotavljanje varnosti zanašajo predvsem na PFL. Poleg zagotavljanja varnosti ta pristop omogoča fizično interakcijo med robotom in človekom, česar SSM ne omogoča.

Čeprav je PFL trenutno primarni vir varnosti v sodelujoči robotiki, pa se aktivno razvija tudi SSM. Velika prednost, ki jo nudi ta pristop, je možnost preprečevanja trka in ne le omejevanje posledic. Za omogočanje SSM je ključnega pomena zmožnost zaznave posega v okolico robota. Pri tem za ustrezno delovanje potrebujemo natančen vpogled v dejansko varnostno razdaljo med delavcem in robotom. Čeprav je za doseganje tega cilja potencialno uporabnih več vrst senzorjev, ki so podrobneje predstavljeni v drugem poglavju, pa je med njimi najprimernejša uporaba lidarjev.

1.2 Zaznavanje posega v okolico robota

Najenostavnejši način zaznavanja posega v okolico robota je z uporabo globinske kamere oziroma 3D lidarja [43], [44]. Ta pristop je sicer preprost, a ima težave z zakrivanjem vidnega polja. Ovira med kamero in delavcem ali robotom namreč onemogoči določanje dejanske varnostne razdalje. Ovira niti ni nujno zunanji objekt, saj določanje dejanske minimalne razdalje med delavcem in robotom lahko ovira že delavec s svojim telesom. Problem lahko omilimo z opazovanjem robota in okolice iz več različnih zornih kotov [45], [46].

Alternativno lahko robotovo okolico namesto iz zunanje perspektive z lidarji opazujemo tudi iz površine robota samega [47], [48]. V tem primeru enega ali več senzorjev razdalje pritrdimo na enega ali več robotovih segmentov. S smiselno postavitvijo senzorjev sistem postane imun na zakrivanje vidnega polja, saj vse meritve merijo razdaljo med površino robota in prvo oviro. S fuzijo meritev iz senzorjev na robotu in zunanjih stacionarnih globinskih kamer dobimo še boljšo sliko okolice robota [30], [49].

Za merjenje razdalje med robotom in oviro je mogoče uporabiti množico različnih senzorjev, kot so to storili že [48], [50], [51], [52], [53]. Pri izboru so pomembni predvsem vzorčna

frekvenca ter globinska in prostorska resolucija meritve. Pri uporabi večjega števila posameznih senzorjev je poleg tega pomembna tudi velikost posamezne enote in morebitna medsebojna interferenca posameznih enot. V trenutnem stanju tehnike najboljše razmerje med temi zahtevami ponujajo razne variante lidarjev. Napram ultrazvočnim in radarskim senzorjem bližine, ki so glavna konkurenca, nudijo največjo prostorsko resolucijo, nekoliko bolj pa so omejeni z vzorčno frekvenco.

Večina senzorjev razdalje meritve izvaja le znotraj omejenega prostorskega kota. Pri opazovanju okolice iz površine robota zato naletimo na problematiko mrtvih polj v bližini robota, ki pa se z večanjem števila uporabljenih senzorjev manjša. Nov problem nastopi, ker se lahko posamezni senzori s prekrivajočimi vidnimi polji med seboj motijo in zato ne morejo meriti sočasno. To pomeni, da je pri postavitvi senzorjev potrebno zagotoviti ustrezno razmerje med pokritostjo okolice in vzorčno frekvenco [50]. Alternativno lahko za zmanjševanje mrtvega polja uporabimo tudi dodatne senzore s krajšim dometom a širšim vidnim poljem, kot so na primer kapacitivni senzori bližine [51].

Ne glede na način opazovanja robota in okolice je potrebno razločiti med detekcijo robota, okolice in operaterja oziroma ostalimi ovirami. Pri opazovanju okolice iz površine robota problematika ni tako jasna, saj vsaka posamezna meritev določa razdaljo med površino robota in prvo oviro. Problem je v tem, da lahko senzor na enem robotovem segmentu izmeri razdaljo do drugega segmenta istega robota ali do dela robotske celice. V tem primeru robot ne sme reagirati na meritev ne gleda na njeno vrednost.

Drugače je, kadar je izmerjena razdalja manjša od pričakovane. V nekaterih primerih je pričakovane meritve mogoče določiti analitično [52], v bolj kompleksnih delovnih okoljih pa to ni nujno mogoče. V takšnih situacijah je potencialno uporaben pristop z uporabo digitalnega dvojčka robota in okolice. V tem primeru je potrebno dobro poznati geometrijo robota in okolice ter lastnosti uporabljenih senzorjev.

Kadar so trenutne meritve realnih senzorjev enake ali večje od pričakovanih meritev, ki so določene računsko ali s simulacijo, reakcija ni potrebna. V nasprotnem primeru, ko se meritve manjše od pričakovanih, je ustrezna reakcija upočasnjevanje oziroma zaustavitev gibanja skladno z varnostnimi standardi. Dobro poznavanje geometrije okolice poleg tega omogoča tudi izogibanje trku ali celo napredno načrtovanje poti okrog ovir [48], [54].

1.3 Cilji doktorske disertacije

V tem doktorskem delu naslavljamo dve od izpostavljenih problematik. V prvem delu se ukvarjamo z zaznavanjem ovir v okolici robota, v drugem pa se posvečamo razločevanju med detekcijo robota ali okolice ter nepričakovane ovire. S svojim delom stremimo k izboljšanju možnosti sodelovanja med robotom in človekom z uporabo SSM.

Za izboljšanje zaznave ovir v okolici robota želimo v okviru tega dela raziskati možnosti in omejitve preusmerjanja svetlobe lidarja za imitacijo opazovanja robotove okolice iz množice točk na površini robota. Pri tem se osredotočamo na prerazporejanje vidnih polj centralnega lidarskega sistema z uporabo stacionarnih zrcal. Z uporabo centralnega lidarskega sistema s preusmerjenimi vidnimi polji želimo med drugim omogočiti natančen nadzor nad trenutkom meritve vsakega posameznega kanala in s tem izločiti problem medsebojne interference. S tem želimo povečati vzorčno frekvenco in posledično zmanjšati čas, ki ga varnostni sistem potrebuje za zaznavo posega v robotov delovni prostor.

To služi kot nadgradnja stanja tehnike na področju opazovanja okolice robota z uporabo množice individualnih kompaktnih lidarjev, razporejenih po površini robota, kot demonstrirano v [47]. Uporaba centralnega lidarskega sistema lahko omogoča sinhronizacijo trenutka proženja svetlobnega pulza na posamičnih kanalih. Zaradi tega ni potrebno sklepati kompromisov med vzorčno frekvenco in pokritostjo okolice, ki je lahko problematična pri uporabi množice individualnih lidarjev [50]. V stanju tehnike preusmerjanje vidnega polja lidarja ni v celoti nov koncept. Poznanih je več primerov, kjer je bilo vidno polje skenirajočega lidarja razširjeno s pomočjo zrcal [55], [56], [57]. Ogledala so bila uporabljena tudi za rekonstrukcijo 3D objekta iz vseh strani z uporabo ene same stacionarne globinske kamere [58]. Čeprav je bilo merjenje razdalje prek zrcala že demonstrirano, pa je za praktično uporabo potrebno podrobneje preučiti, kako zrcala v različnih realnih stanjih vplivajo na delovanje lidarja.

Poleg tehnične rešitve nadzora okolice iz površine robota se delo posveča tudi uporabi meritev varnostna razdalje za preprečevanje trkov z robotom. V stanju tehnike je bilo že demonstrirano, da lahko robot iz s pomočjo merilcev razdalje, ki so pritrjeni po njegovi površini, ne le prepreči trk z oviro, temveč se ji tudi umakne oziroma načrtuje pot okrog nje [48], [54]. Pri tem se je potrebno zavedati problema samodetekcije. Posamezni senzorji lahko namreč namesto razdalje do točke v okolici izmerijo razdaljo do točke na delu robota samega. Za določanje dejanskega posega v bližino robota je torej potrebno poznati pričakovane meritve, kar se lahko določi s simulacijo, v nekaterih primerih pa je mogoč tudi analitičen izračun [52]. Ne glede na način

izračuna je pri tem je ključnega pomena dobro poznavanje točne lokacije senzorjev. Alternativa preciznemu montiranju ali naknadni meritvi pozicij senzorjev je kalibracija pozicije med gibanjem robota, ki se izvede s pomočjo inercialnih meritev na posameznih senzorjih [59]. V vsakem primeru je zagotavljanje oziroma določanje točne pozicije senzorjev zamuden proces.

Namesto tega želimo poiskati enostaven in robusten način za razločevanje med detekcijo robota ali okolice ter nepričakovane ovire brez potrebe po točnem poznavanju pozicij posameznih senzorjev. Za doseganje zastavljenega cilja želimo realizirati sistem, ki bo trenutne meritve primerjal s pričakovanimi vrednostmi. Pri tem največji izziv predstavlja določanje, katera referenčna meritev pripada vsakemu danemu trenutku.

V raziskavah sledimo naslednjim raziskovalnim vprašanjem:

1. **Kako izdelati primeren lidarski sistem s premaknjenim vidnim poljem z uporabo stacionarnih optičnih elementov.** Raziskave zajemajo konfiguracije z odklonskimi elementi na različnih razdaljah od merilnika. Za izboljšanje karakteristike merjenj bo implementirana kompenzacija hoda meritve.
2. **Kako na delovanje sistema vpliva uporaba več vidnih polj.** Razširitev iz enega na več vidnih polj ni trivialna, saj je pri tem potrebno paziti na razporeditev komponent ter medsebojno oviranje.
3. **Ali je mogoče med gibanjem robota z lidarsko svetlobno ovojnico v realnem času na uporaben način trenutne meritve lidarjev primerjati z vnaprej zajetimi referenčnimi vrednostmi in s tem zaznavati spremembe geometrije okolice.** Referenčne meritve v zagotovo varnem okolju zajamemo z enako konfiguracijo lidarskega sistema, kot bo v uporabi med normalnim delovanjem. Na osnovi izmerjenih referenčnih podatkov lahko med delovanjem nadzorni sistem ukrepa (upočasni ali ustavi gibanje robota), kadar trenutne meritve bistveno odstopajo od referenčnih in so hkrati v neposredni bližini robota. Domet senzorjev je namreč večji od robotovega delovnega prostora, dogajanje izven tega pa na varnost delovanja ne vpliva. Opisani sistem zahteva referenčno meritev, parametrično odvisno od lege in časa, saj se bo hitrost izvajanja cikla med tekom lahko spreminjala skladno z SSM načeli. To pomeni, da je potrebno prepoznati povezavo med robotovo trenutno lego ter pripadajočimi referenčnimi meritvami.

Jedro te doktorske disertacije je razdeljeno na štiri poglavja. V drugem poglavju so predstavljeni tipi senzorjev, ki se lahko uporabljajo za detekcijo posega v robotov delovni prostor. Postavljeni so tudi v kontekst stanja tehnike zagotavljanja SSM. Namen tega poglavja je bralcu predstaviti tehnologijo merilnikov razdalje s poudarkom na lidarjih. S tem se vzpostavi osnovno poznavanje pojmov za lažje razumevanje nadaljnjega dela. V tretjem poglavju je podrobneje predstavljeno delovanje pulznega lidarja. Govora je tako o splošni načelih, kot tudi specifični izdelavi in karakteristiki lidarja, ki je bil izdelan za potrebe raziskav, ki pomagajo odgovoriti na prvi dve raziskovalni vprašanji. Te raziskave in njihovi rezultati so predstavljeni v četrtem poglavju. V petem poglavju je predstavljen še sistem za zaznavanje nepričakovanega posega v robotov delovni prostor, ki je bil razvit kot odgovor na tretje raziskovalno vprašanje.

2 Brezkontaktno merjenje razdalje

Cilj tega poglavja je bralcu predstaviti različne tehnologije brezkontaktnega določanja razdalje, ki se uporabljajo v robotiki, kar pomaga pri razumevanju vsebine preostanka te doktorske disertacije. Pri tem se osredotočamo na senzorje, ki temeljijo na meritvi fizikalnih veličin in ne procesiranju podatkov. Stereo vizije, strojnega vida, in raznih metod, ki temeljijo na podlagi umetne inteligence, v tem v tem poglavju ne opisujemo. Posebna poglavja so namenjena trem tipom lidarjev, nazadnje pa je predstavljena še analiza delovanja dveh komercialnih liadrskih modulov. Na podlagi analize argumentiramo tudi izbor lidarja, ki smo ga uporabljali za nekatere raziskave.

Magnetni, induktivni in kapacitivni senzorji, precejšen del družine fotoelektričnih senzorjev, sonar in radar so v splošni rabi že več desetletij. Z izjemo zadnjih dveh, ki temeljita na meritvi časa preleta, ti senzorji kot izhodno veličino tipično podajajo napetost ali tok, zaradi česar so primerni za analogno obdelavo meritve. Objekt v bližini senzorja lahko zaznamo preprosto s primerjavo izhodne veličine s pragovno vrednostjo. Pri tem je potrebno vedeti, kakšne so omejitve in sposobnosti posameznih tipov senzorjev, saj niso vsi primerni za vse materiale, razdalje, barve, ali velikosti tarč. Kot primer lahko vzamemo magnetne senzorje. Ti zaznavajo le magnetno polje, zaradi česar ne morejo zaznati raznih nemagnetnih materialov. Podoben problem imajo tudi induktivni senzorji, ki pa so primerni le za zaznavo kovin.

2.1.1 Kapacitivni senzorji

Kapacitivni senzorji za svoje delovanje izkoriščajo vpliv snovi na kapacitivnost senzorskega kondenzatorja. Zaradi tega lahko v merilnem območju zazna tako kovine, kot druge materiale, na primer tekočine, tkanine, steklo in tudi človeka. Za delovanje se tipično zanaša na spremembo resonančne frekvence sistema ali pa spremembo amplitude signala pri konstantni frekvenci. Ti senzorji so kljub omejenemu dometu lahko primerni za zagotavljanje SSM po ISO/TS 15066 [60]. Pogosto se uporabljajo kot del sistema za zaznavanje dotika robota, torej kot robotsko kožo [61], [62], [63], primerni pa so tudi za uporabo kot pomožni senzor za pokrivanje mrtvega polja drugih senzorjev [51].

2.1.2 Svetlobni senzorji

Za določanje razdalje se lahko uporabi tudi svetlobo. Tipično se za ta namen uporablja infrardečo (IR) svetlobo, ki jo je v okolici tipično manj kot vidne. Poleg tega so svetleče diode

in laserji v tem spektru cenovno dostopni. Kadar želimo, da je lokacija meritve vidna s prostim očesom, se lahko uporabi tudi svetloba v vidnem spektru.

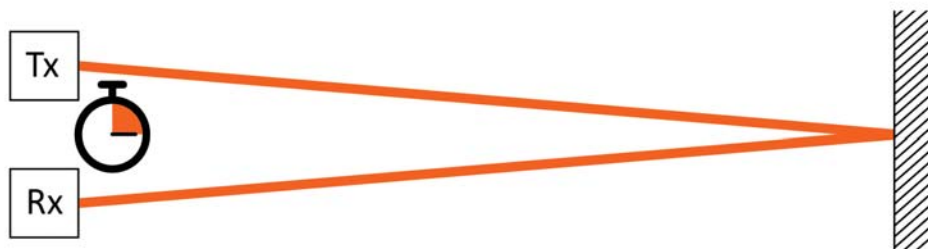
Najenostavnejša opcija je uporaba para svetila in detektorja. Amplituda odbite svetlobe je odvisna od oddaljenosti tarče. Za večjo imunost na šum je lahko oddana svetloba frekvenčno modulirana, amplitudo odboja pa se določa le pri enaki frekvenci. Opisani pristop je enostaven in cenovno ugoden, a občutljiv na odbojnost tarče. Pri isti oddaljenosti bo amplituda odboja temnejše tarče opazno nižja kot od svetlejšje tarče. Kadar oddajnik oddaja razpršeno svetlobo, je amplituda signala odvisna tudi od velikosti tarče. S tem razlogom so senzorji oddaljenosti z meritvijo amplitude odboja bolj primerni za vlogo indikatorja bližine tarče, vseeno pa pripomorejo k večji varnosti [64], [65] oziroma lahko predstavljajo del senzornega sistema [66].

Za doseganje višje natančnosti se lahko poslužujemo osvetljevanja s strukturirano svetlobo, pri čemer pa potrebujemo polje sprejemnikov in fokusno optiko. Tega pristopa se poslužujejo predvsem nekatere globinske kamere, linijski skenerji in enodimenzijski merilniki razdalje, kjer je potrebna visoka ločljivost a majhen merilni razpon. Tovrstni senzorji za svoje osnovno delovanje zahtevajo določeno količino procesiranja podatkov, so pa bistveno manj občutljivi na barvo tarče. Poleg opisanih vrst svetlobnih senzorjev poznamo še več izvedb. Med njimi so za merjenje razdalje najbolj uporabni lidarji. Ti so podrobneje opisani v poglavju 2.2.3.

2.2 Merjenje razdalje na podlagi časa preleta

Za merjenje razdalje med senzorjem in tarčo je mogoče uporabiti tudi meritev časa preleta signala. Signal mora imeti poznano hitrost propagacije v uporabljenem mediju. Tipično se uporablja zvočno, radijsko, ali svetlobno valovanje. Ideja v ozadju meritve je ista ne glede na uporabljeni tip valovanja, posamezne izvedbe pa nudijo unikatne prednosti in slabosti. Ključno se razlikujejo po dometu in prostorski resoluciji. Pri tej veliko oviro predstavlja uklon valovanja, ki je povezan z velikostjo izvora in vseh zožitev, skozi katere signal potuje. S tem ima najmanj težav lidar, ki uporablja valovanje z najmanjšo valovno dolžino, največ težav pa radar z nizko oddajno frekvenco, ki ima največjo valovno dolžino. Razdalja med senzorjem in tarčo se na podlagi časa preleta (t) in poznane hitrosti širjenja signala (c) določi po enačbi (2.1), delovanje pa je tudi ilustrirano na sliki 2.1. Oznaki Tx in Rx predstavljata oddajnik in sprejemnik.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.1)$$



Slika 2.1: Shema delovanja merilca razdalje na podlagi direktnega merjenja časa preleta.

2.2.1 Zvočno valovanje

Med merilci razdalje na podlagi merjenja časa preleta signala je še najenostavnejša uporaba zvočnega valovanja, predvsem ker je za to potrebna najmanjša hitrost obdelave signalov. Tipičen primer takšnega senzorja je ultrazvočni merilec razdalje. Ob poznavanju hitrosti zvoka v zraku lahko na podlagi časa določimo razdaljo, s spremljanjem frekvence odbitega signala pa lahko zaradi Dopplerjevega pojava določimo tudi hitrost gibanja tarče vzdolž smeri propagacije signala. Ultrazvočni senzorji razdalje imajo običajno nizko prostorsko resolucijo zato se pogosto uporabljajo kot nizkocenovni parkirni senzorji. Primerni pa so tudi za integracijo v robotsko brezkontaktno kožo [53]. Določanje razdalje na podlagi merjenja časa preleta zvočnega valovanja se lahko uporablja tudi v vodi. Takšen merilec tipično imenujemo sonar (ang. sound navigation and ranging). Zaradi nižjega slabenja zvočnega signala v vodi napram v zraku, imajo sonarji večji domet. Pogosto združujejo več oddajnikov in sprejemnikov, da lahko signal usmerjajo in s pomočjo obdelave signalov rekonstruirajo celoten profil opazovanega območja. Sonar lahko za svoje delovanje uporablja širok razpon frekvenc valovanja. Nižje frekvence tipično ponujajo večji domet, višje pa boljšo prostorsko resolucijo.

2.2.2 Radijsko valovanje

Kadar za signal uporabimo radijsko valovanje, se tovrstna naprava imenuje radar (ang. radio detection and ranging). Ideja delovanja je identična kot pri sonarju, odlikuje pa se predvsem v dometu in robustnosti. Ponovno nižje frekvence tipično ponujajo večji domet, višje pa boljšo prostorsko resolucijo, pri čemer pa je potrebno paziti na izbor valovne dolžine, saj nekatere frekvence sovpadajo z resonančnimi frekvencami molekul snovi v zraku, nekatere pa so

rezervirane za drugo rabo. Kot pri sonarju, se tudi pri radarju lahko za doseganje večje prostorske ločljivosti poslužujemo uporabe več oddajnikov ter sprejemnikov v kombinaciji z napredno obdelavo signalov. Za namene SSM lahko z uporabo radarja dosežemo primerljive rezultate kot s skenirajočim lidarjem [67], pri čemer pa se je še vedno potrebno zavedati omejene prostorske resolucije.

2.2.3 Svetlobno valovanje

Za določanje razdalje se lahko uporabi tudi svetlobno valovanje. V tem primeru se naprava imenuje lidar (ang. light detection and ranging). Osnovna ideja ostaja enaka kot pri sonarju ter radarju, ključna pa je razlika v valovni dolžini. Med tem, ko je valovna dolžina valovanja pri prej omenjenih tehnologijah ranga centimetrov ali milimetrov, se valovna dolžina svetlobe nahaja v rangu mikrometrov ali nekaj sto nanometrov. Zaradi tega je uklon manj izražen, pulz svetlobe pa lahko oblikujemo v ozek in precej vzporeden snop. To omogoča izjemno prostorsko ločljivost.

Za razliko od prej opisanih tehnologij, si pri uporabi svetlobnega valovanja za povečanje prostorske ločljivosti ne moremo pomagati z uporabo več oddajnikov ali sprejemnikov, saj s trenutno tehnologijo iz svetlobe še ne moremo enostavno izločiti informacije o faznem zamiku prejete svetlobe. To ne pomeni, da lahko sočasno izmerimo le eno razdaljo, ampak da je število sočasno izmerjenih razdalj enako številu detektorjev. Za sočasno določanje globinske informacije vzdolž več kot ene osi, je potrebno uporabiti polje sprejemnikov, kadar pa sočasnost ni potrebna, lahko to dosežemo s fizičnim premikanjem osi detekcije [68].

Za določanje razdalje na podlagi časa preleta svetlobe se lahko poslužujemo več različnih pristopov, ki nudijo svoje prednosti in slabosti. Možno je direktno merjenje časa preleta, kar se uporablja pri tako imenovanem pulznem lidarju, in posredno merjenje časa preleta, ki se uporablja pri lidarjih s konstantno modulacijo svetlobe ali frekvenčno moduliranih lidarjih [69], [70], [71]. Vsi trije pristopi so natančneje opisani v nadaljnjih poglavjih.

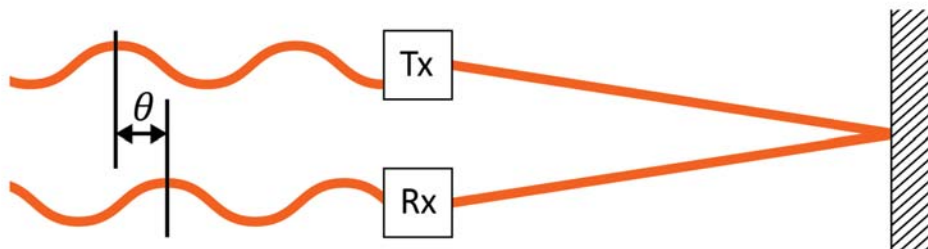
2.2.3.1 Pulzni lidar

Za razumevanje delovanja je najenostavnejši lidar z direktnim merjenjem časa preleta svetlobe. Imenujemo ga tudi pulzni lidar. Svetloba v zraku milimeter razdalje prepotuje v približno 33 ps, torej za povratno pot med lidarjem in tarčo porabi približno 67 ps na milimeter razdalje. Za visoko ločljivost meritve razdalje to zahteva zelo natančno merjenje časa. Poleg natančnega merjenja časa preleta signala mora biti pulzni lidar sposoben iz okoliške svetlobe razločiti

odbito svetlobo, zato tipično oddajajo zelo kratke pulze svetlobe z izjemno močjo. Pulzni lidar omogoča zelo hitre meritve razdalje, zaradi česar je uporaben za skenirajoče lidarje. Za potrebe naših raziskav smo uporabili ta tip lidarja. Podrobnosti o delovanju in izdelavi pulznega lidarja so natančneje opisani v tretjem poglavju.

2.2.3.2 AMCW lidar

Namesto direktne meritve časa preleta, se lahko razdaljo določi tudi posredno. Za to se lahko uporabi lidar s konstantno amplitudno modulacijo svetlobe, tako imenovani AMCW lidar. Ta modulira amplitudo oddane svetlobe, razdaljo pa določi na podlagi faznega zamika med oddajnikom in sprejemnikom. Ideja delovanja je prikazana na sliki 2.2.



Slika 2.2: Shema delovanja AMCW lidarja. Oddajnik (Tx) oddaja modulirano svetlobo, ki se odbije od tarče in do sprejemnika (Rx) pride s faznim zamikom (θ).

Takšen lidar je zelo odporen na okoliško svetlobo in omogoča izdelavo z uporabo cenejših komponent, zaradi daljšega časa integracije pa ima nižjo vzorčno frekvenco. Za AMCW lidar je mogoče enostavno izdelati integrirano polje sprejemnikov za določanje faze, zato je AMCW lidar primeren za integracijo v globinsko kamero [68].

Ker svetloba potuje s končno hitrostjo, bo na povratni poti med lidarjem in tarčo prišlo do faznega zamika med oddanim in odbitim signalom. Na podlagi meritve faznega zamika (θ) lahko pri poznani modulacijski frekvenci (f) in poznani hitrosti širjenja svetlobe (c) razdaljo (d) določi po enačbi (2.2).

$$d = \frac{c \cdot \theta}{4 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.2)$$

Zaradi periodične narave modulacije signala ima AMCW lidar sistemsko vgrajeno največjo razdaljo, do katere lahko enolično določi razdaljo do tarče (r), ki jo opisuje enačba (2.3). Če

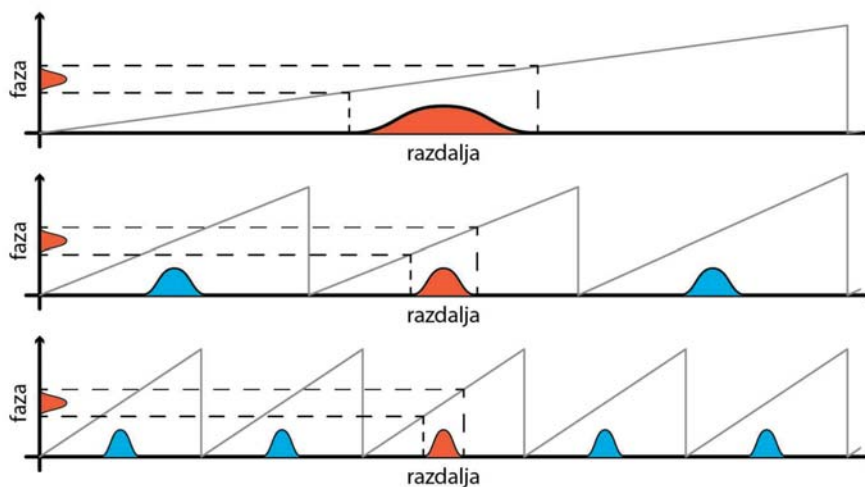
lahko AMCW lidar zazna odboj svetlobe od tarče, ki se nahaja izven tega območja, se izmerjena razdalja izračuna po enačbi (2.4) in ni nujno pravilna.

$$r = \frac{c}{2 \cdot f} \quad (2.3)$$

$$d = \frac{c \cdot \theta}{4 \cdot \pi \cdot f} \% r \quad (2.4)$$

Enačba (2.3) nakazuje, da je za doseganje večjega merilnega območja smiselno uporabiti čim nižjo frekvenco modulacije. Problem je v tem, da z večanjem dometa, negotovost meritve faze dobiva čedalje večji vpliv na negotovost meritve razdalje. Negotovost v meritvi faze, se namreč odraža v negotovosti meritve razdalje. Enaka negotovost v meritvi faze se pri nižji modulačijski frekvenci pozna bolj, kot pri višji. Zvezo opisuje enačba (2.5), grafično pa je predstavljena na sliki 2.3.

$$\sigma_d = \frac{c \cdot \sigma_\theta}{4 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.5)$$



Slika 2.3: Zveza med modulačijsko frekvenco ter negotovostjo meritve. Pri meritvi faze z enako negotovostjo (vertikalna os) je negotovost meritve razdalje (horizontalna os, oranžno) odvisna od frekvence oziroma območja z enolično določljivo razdaljo. Z višanjem modulačijske frekvence je negotovost meritve razdalje manjša, hkrati pa lahko pride do navideznih slik tarče (horizontalna os, modro).

Če lahko sprejemnik AMCW lidarja zazna odboj svetlobe od tarče, ki se nahaja izven območja za enolično določanje razdalje, se pojavi problematika prekrivanja meritev (ang. aliasing). Ker je območje za enolično določanje razdalje odvisno od modulačijske frekvence, lahko isto meritev ponovimo pri več frekvencah. S tem dobimo sistem dveh enačb z dvema pozitivnima

celoštevilska neznanka m in n ter eno pozitivno realno neznanko ($d_{dejanski}$), kot opisuje enačba (2.6). Dejanska razdalja se med meritvami ne sme spremeniti. Z uporabo meritev z več modulacijskimi frekvencami se območje za enolično določanje razdalje določi po enačbi (2.7). Razdalja postane povezana z najmanjšim skupnim večkratnikom modulacijskih frekvenc. Po potrebi lahko za reševanje prekrivanja uporabimo tudi več kot dve frekvenci, kar pa pri pametni izbiri prvih dveh ni nujno potrebno. Za več modulacijskih frekvenc v funkcijo za iskanje najmanjšega skupnega večkratnika, lcm (ang. Least Common Multiple) v enačbi (2.7), dodamo še ostale frekvence.

$$d_{dejanski} = d_{izmerjeni_1} + n \cdot r_1 \quad (2.6)$$

$$d_{dejanski} = d_{izmerjeni_2} + m \cdot r_2$$

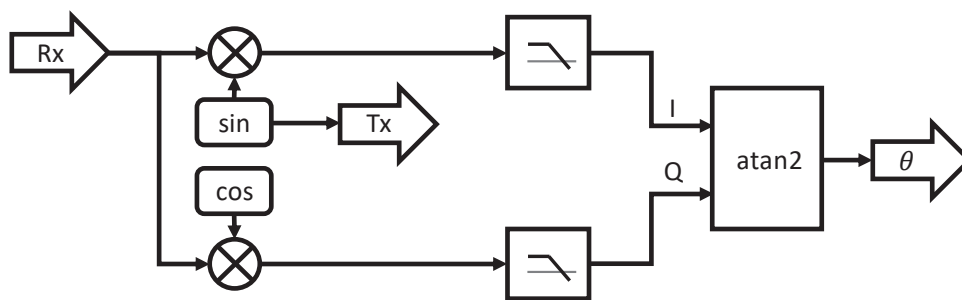
$$r = \frac{c}{2 \cdot lcm(f_1, f_2)} \quad (2.7)$$

Za razliko od pulznega lidarja, kjer lahko razločimo več tarč, z analizo histograma meritev pa celo dobimo informacijo o dogajanju na prenosni poti, AMCW lidar ni sposoben razločiti med več tarčami. Odboji vseh se združijo v en sam signal, na katerega posamezne komponente vplivajo tako, da mu spreminjajo amplitudo in fazo. Seštevanje dveh odbojev v primeru, ko je signal sinusno moduliran, opisuje enačba (2.8). V njej nastopata realni konstanti A in B ter realni fazi θ in $\Delta\theta$.

$$\begin{aligned} A \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) + B \cdot \sin(\theta) &= \\ &= \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cdot \cos(\Delta\theta)} \cdot \\ &\cdot \sin\left(\theta + \operatorname{atan}\left(\frac{A \cdot \sin(\Delta\theta)}{A \cdot \cos(\Delta\theta) + B}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Pod pravimi pogoji lahko pride celo do situacije, ko bi ravno prav razporejene tarče, pri čemer ima bližja manjšo odbojnost od bolj oddaljene, rezultirale v ničelnem signalu na sprejemniku. V praksi je to zelo malo verjetno. Med tipičnim delovanjem je na fotodiodi v praksi signal, ki je sorazmeren utežnemu povprečju razdalj vseh tarč v vidnem polju. Pri tem je utež odvisna od oddaljenosti, odbojnosti, in velikosti osvetljene površine tarče.

Princip določanja faze oziroma razdalje temelji na IQ demodulaciji. Oddano svetlobo moduliramo s sinusnim signalom in spremljamo signal na sprejemniku. Tega enkrat pomnožimo z istim sinusom, ki ga oddajamo, ter drugič pripadajočim kosinusom. Oba signala produktov pošljemo skozi nizkoprepustno sito, iz filtriranih I in Q komponent pa lahko določimo fazo prejetega signala napram oddanemu. Proces je shematsko prikazan na sliki 2.4. Namesto sinusne modulacije izhodnega signala, lahko uporabimo tudi pravokotno modulacijo (prižgano/ugasnjeno), saj nizkoprepustni filter v IQ demodulatorju zaduši višje harmonike. Procesiranje je lahko analogno ali digitalno.



Slika 2.4: Shema IQ demodulatorja za izračun faznega zamika. Sprejemni signal se razdeli na veji I ter Q, na katerih se pomnoži s sinusom oziroma kosinusom, ki sta fazno ujeta z oddajnim signalom. Obe fazi potujeta skozi nizkoprepustno sito, nakar se iz njiju izračuna fazni zamik, med oddanim in sprejetim signalom.

AMCW lidar je zaradi svoje zasnove mnogo bolj odporen na šum kot pulzni lidar. To je ključnega pomena za njegovo delovanje, saj je AMCW lidar strogo omejen z oddajno močjo svetlobnega vira. Za doseganje laserskega razreda 1 pri modulatorski frekvenci 10 MHz in valovni dolžini 905 nm lahko oddaja le z 23 mW. V nasprotju s pulznim lidarjem, kjer se lahko za boljše razmerje med signalom in šumom (SNR) uporabi krajše a močnejše pulze, tega pri AMCW lidarju ne moremo storiti. Največ, kar lahko storimo je, da izberemo modulatorsko frekvenco tako, da bodo pulzi znotraj časovnega okna, v katerem se po IEC 60825 seštevajo energije pulzov, prinesli minimalno vsoto energije. Omejitve izsevane energije so natančneje predstavljene v poglavju 3.2.4.

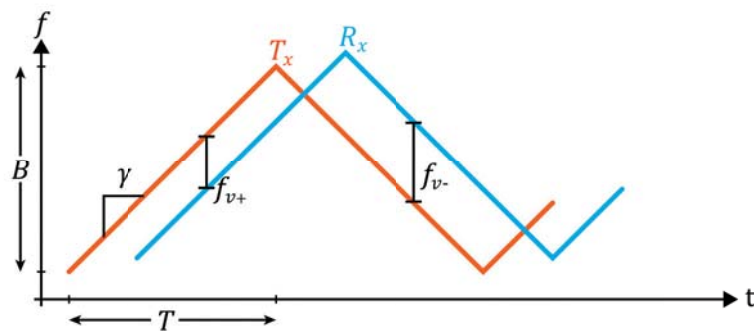
2.2.3.3 FMCW lidar

Poleg lidarja z amplitudno modulacijo svetlobe, poznamo tudi lidar s frekvenčno modulacijo svetlobe, tako imenovani FMCW lidar. Princip delovanja je podoben kot pri AMCW lidarju, le da namesto amplitudno modulirane svetlobe oddaja svetlobo z variabilno valovno dolžino [72], [73]. Odbita svetloba se na sprejemniku z deležem oddane svetlobe zmeša v vmesno

frekvenco (f_v). Ker se oddana frekvenca po času spreminja, je vmesna frekvenca proporcionalna razdalji med oddajnikom in tarčo. Pri tem je pomembna tudi hitrost spreminjanja frekvence (γ). Med lidarji ima FMCW lidar unikatno sposobnost sočasnega merjenja oddaljenosti in hitrosti tarče, pri čemer se zanaša na Dopplerjev pojav. Oddaljenost in hitrost se določa po enačbah (2.9) in (2.10), princip pa je ilustriran na sliki 2.5. Za izračun hitrosti se upošteva srednja valovna dolžina svetlobe (λ) [74].

$$d = \frac{c}{2 \cdot \gamma} \cdot \frac{f_{v+} + f_{v-}}{2} \quad (2.9)$$

$$v = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{f_{v-} - f_{v+}}{2} \quad (2.10)$$



Slika 2.5: Ilustracija principa delovanja FMCW lidarja. Frekvenca oddanega signala se s časom spreminja. Ker med oddajo in prejemanjem odbite svetlobe preteče nekaj časa, pride do razlike v frekvenci valovanja med oddano in prejeto svetlobo, iz katere je mogoče posredno določiti oddaljenost tarče.

Na domet FMCW lidarja ključno vpliva čas preleta valovnih dolžin (T), na ločljivost pa pasovna širina oddane svetlobe (B). Valovna dolžina svetlobe laserskih diod je v manjši meri odvisna od toka vzbujanja [75], pri čemer je pasovna širina nekaj nanometrov. Obstajajo tudi nastavljivi laserji, ki omogočajo nastavljanje valovne dolžine v rangu več sto nanometrov [76]. Zaradi narave delovanja je FMCW lidar primeren za izdelavo v obliki integriranega fotonskega vezja [77], [78], [79].

2.3 Evalvacija komercialnih lidarskih modulov

Za svoje raziskave smo želeli uporabiti komercialno dostopne lidarje a smo na prvo oviro naleteli že pri izbiri senzorja. Za namene opazovanja okolice robota iz njegove površine so pogosto uporabljeni lidarski moduli proizvajalca STMicroelectronics iz družine senzorjev VL53L. Družina zajema cenovno ugodne in izjemno kompaktne lidarje z direktnim merjenjem

časa preleta v obliki sistema na čipu. Poleg teh se čedalje pogosteje uporabljajo sorodni senzorji iz družine TMF proizvajalca AMS-Osram, saj so v zadnjih letih začeli prodajati kakovostne integrirane direktne lidarske module. Na podlagi preliminarne preizkušnje smo se osredotočili na VL53L0X ter nekoliko dražji a zmogljivejši VL53L1, ki je bil v času preizkušnje najzmogljivejši lidar iz družine VL53L. Kasneje smo poleg njiju v obzir vzeli še VL53L5CX in VL53L8CX, ki omogočata merjenje razdalj v matriki 4 x 4 ali 8 x 8, a se lahko glede na naše ugotovitve posamezni senzorji med seboj opazno motijo. S tem razlogom podrobnejše analize nismo izvedli. V nekaterih študijah motenje niso bile opažene [80], iz česar sklepamo, da je interakcija med ločenimi senzorji v neki meri odvisna od vsakega posameznega čipa. Medsebojne interference pri VL53L0X in VL53L1 nismo opazili. Področje lidarjev z direktnim merjenjem časa preleta v obliki sistema na čipu se hitro širi. Največja proizvajalca sta še vedno STMicroelectronics in AMS-Osram. Na področju AMCW lidarjev podobnih senzorjev v času pisanja tega dela ni, obstaja pa več analognih vmesnikov, kot sta OPT3101 proizvajalca Texas Instruments ali ISL29501 podjetja Renesas. Slednjega smo v obliki razvojnega modula Pmod ToF proizvajalca Digilent tudi preizkusili, a zaradi opaznega zlivanja odbojev od tarče in ozadja nismo izvedli podrobne analize delovanja.

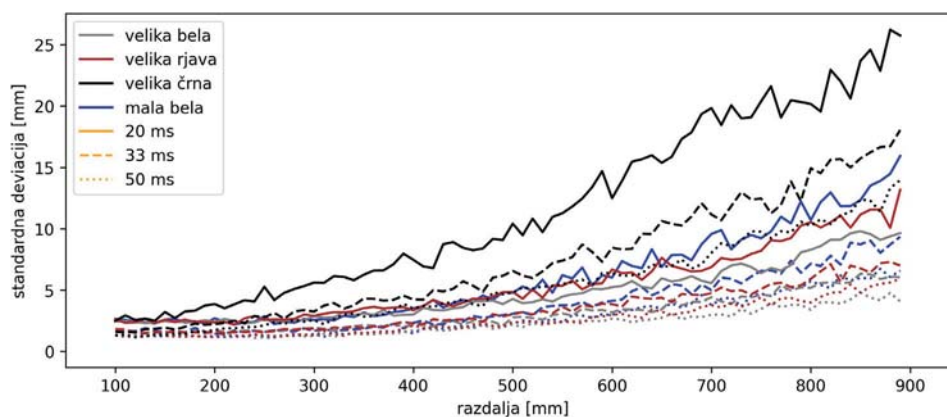
Izbrana senzorja smo preizkusili na dveh velikostih tarče s po tremi različnimi odbojnostmi površine in pri več časih vzorčenja. Tarči sta bili velikosti 22 cm x 22 cm (velika) ter 11 cm x 22 cm (mala). Tri različne površine so bile pisarniški papir (bela), rjav embalažni karton (rjava), ter z laserskim tiskalnikom homogeno s črno potiskan list papirja (črna). LIDAR smo postavili tako, da je bil od tarče pri najmanjšem odmiku, odmaknjenem 10 cm, kar je več od mrtvega polja senzorjev. V nadaljevanju so predstavljeni rezultati preizkušnje merilne točnosti in pogreška za izbrana senzorja. Rezultati so podani v obliki grafov, na koncu pa je v preglednici podan povzetek uporabnih dometov v različnih režimih delovanja.

2.3.1 Analiza delovanja senzorja VL53L0X

VL53L0X proizvajalca ST je najcenejši med preizkušenimi senzorji, ne pa tudi najcenejši iz proizvajalčevega portfelja. V kompaktnem ohišju združuje oddajni laser, sprejemno polje SPAD ter mikrokrmilnik, ki nadzira delovanje. V teoriji je primeren za merjenje razdalje do

2 m, pri čemer naj ne bi bil občutljiv na barvo tarče. Njegovo vidno polje je 25° , najvišja vzorčna frekvenca pa 50 Hz.

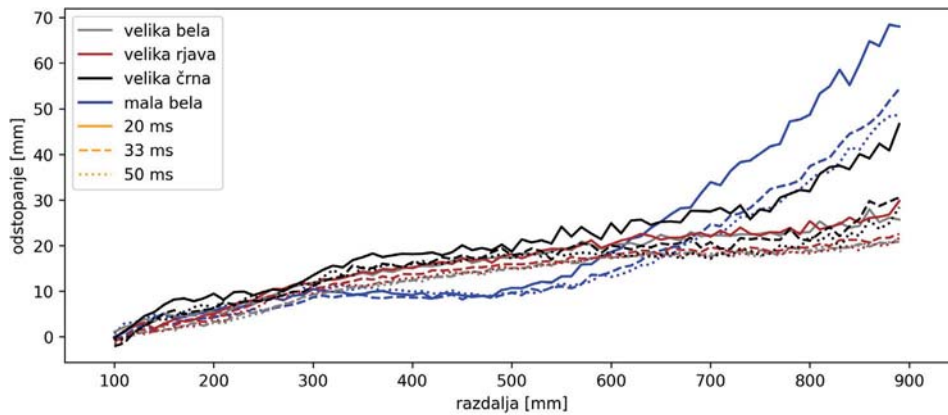
Najprej je predstavljena analiza standardne deviacije meritev pri merjenju velike tarče. Rezultati so prikazani na sliki 2.6. Siva, rjava ter črna barva pripadajo meritvam na beli, rjavi ter črni tarči, s polno, črtkani in pikčasto črto pa so označeni različni časi vzorčenja. Za lažjo primerjavo z meritvami na majhni tarči je z modro vrisana še meritev, ki pripada analizi z meritvami na drugi velikosti tarče bele barve. Takšen format grafov ohranjamo za vse nadaljnje rezultate analize merilne negotovosti in merilnega pogoška senzorjev VL53L0X in VL53L1. Na sliki 2.6 lahko opazimo, da so pri enakih vzorčnih časih za večino vzorcev merilne negotovosti precej podobne ne glede na barvo in velikost tarče, za črno tarčo pa je natančnost meritve znatno slabša. Kot pričakovano, negotovost z večanjem razdalje narašča.



Slika 2.6: Merilna negotovost meritev razdalje s senzorjem VL53L0X za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi velike tarče.

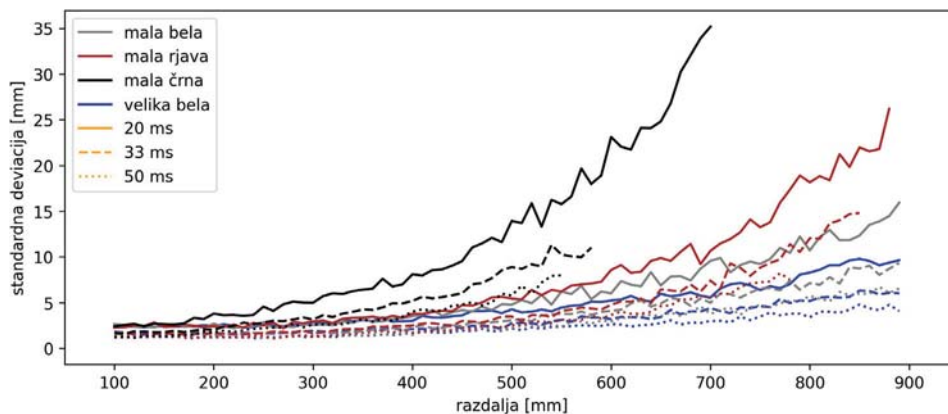
Na sliki 2.7 so prikazani še merilni pripadajoči pogoški. Tu opazimo podoben vzorec. Merilni pogoški ne glede na barvo tarče in vzorčno frekvenco kažejo podoben trend in obliko naraščanja. Nepresenetljivo so najslabše meritve črne tarče pri najvišji vzorčni frekvenci, zanimivo pa je, da pogošek sledi trendu ostalih meritev vse do približno 750 mm, ko začne pogošek naraščati z večjim naklonom. Merilni pogošek ostalih meritev je na celotnem merilnem območju znotraj 11 mm medsebojne razlike. Podobno se začne tudi meritev razdalje

do male bele tarče, ki pa pri 300 mm doseže začasni plato, za katerim pogrešek pri 650 mm preseže celo nivoje meritev razdalje do velike črne tarče.



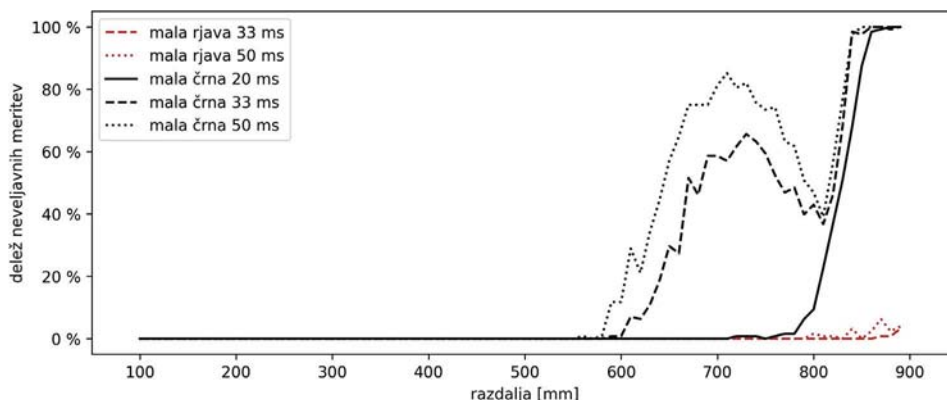
Slika 2.7: Merilni pogrešek meritev razdalje s senzorjem VL53L0X za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi velike tarče.

Slika 2.8 prikazuje še merilni pogrešek pri določanju razdalje do male tarče. Za posamezno tarčo in čas merjenja so prikazani le podatki do razdalje, do katere je senzor konsistentno vračal veljavne meritve brez opozoril za možnost neveljavne vrednosti. Senzor ima najmanjši domet pri merjenju razdalje do male črne tarče, kar je skladno s pričakovanji. V tem primeru je namreč odboj svetlobe najšibkejši.



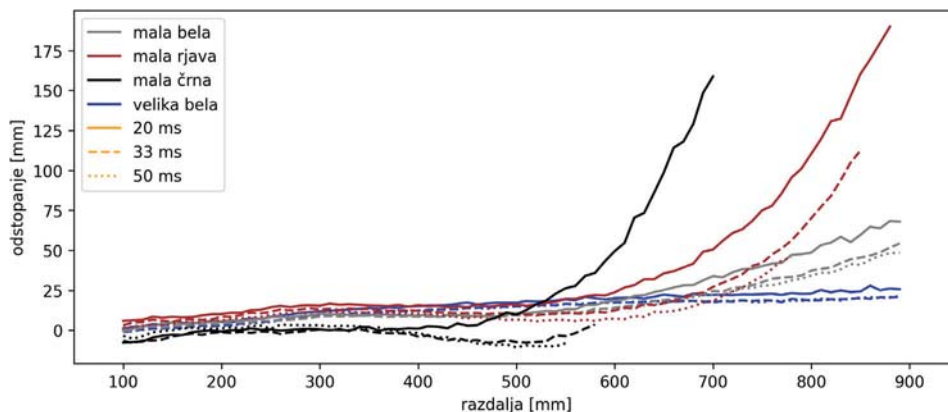
Slika 2.8: Merilna negotovost meritev razdalje s senzorjem VL53L0X za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi male tarče.

Opazimo tudi, da se pri daljšem vzorčnem času napake začnejo prej, kot pri krajšem vzorčnem času. To pripisujemo dejstvu, da je med daljšim časom vzorčenja več možnosti, da senzor zazna neveljavno meritev in posledično javi napako. Pogostost neveljavnih meritev v odvisnosti od nastavljene razdalje je prikazan na sliki 2.9. Prikazane so le konfiguracije, v katerih smo zaznali vsaj eno neveljavno meritev. Zanimivo je opažanje, da pri uporabi male črne tarče pogostost neveljavnih meritev doseže lokalni maksimum okrog 700 mm, nakar začasno upade. Za ta pojav nimamo ustrezne razlage. Pri vsem skupaj gre izpostaviti, da v marsikaterem primeru senzor zaznani napaki navkljub še vedno lahko vrne uporabno a nezanesljivo meritev razdalje. Za povečevanje dometa senzorja torej nikakor ni priporočljivo krajšati časa meritve. Kot je razvidno iz grafa merilnih negotovosti na sliki 2.8, krajši čas vzorčenja pomeni večji raztros meritev.



Slika 2.9: Pogostost neveljavnih meritev s senzorjem VL53L0X v odvisnosti od nastavljene razdalje med senzorjem in tarčo.

Nazadnje je na sliki 2.10 prikazan še merilni pogrešek pri merjenju oddaljenosti male tarče. Ponovno so prikazani le podatki do razdalje, do katere je senzor konsistentno vračal veljavne meritve. Po pričakovanjih je merilni pogrešek za svetlejše tarče ter daljše čase vzorčenja manjši. Zanimivo je opažanje, da pogrešek sprva narašča, nato pa pri neki razdalji doseže začasni plato. Ta je prisoten v vseh konfiguracijah merjenja oddaljenosti male tarče. Po koncu platoja pogrešek v večini primerov hitro narašča, za krajše čase vzorčenja in črno tarčo pa sprva upada.



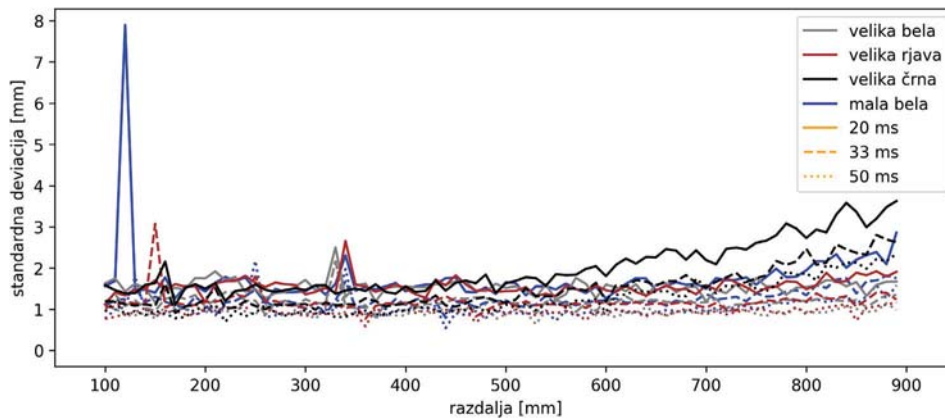
Slika 2.10: Merilni pogrešek meritev razdalje s senzorjem VL53L0X za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi male tarče.

2.3.2 Analiza delovanja senzorja VL53L1

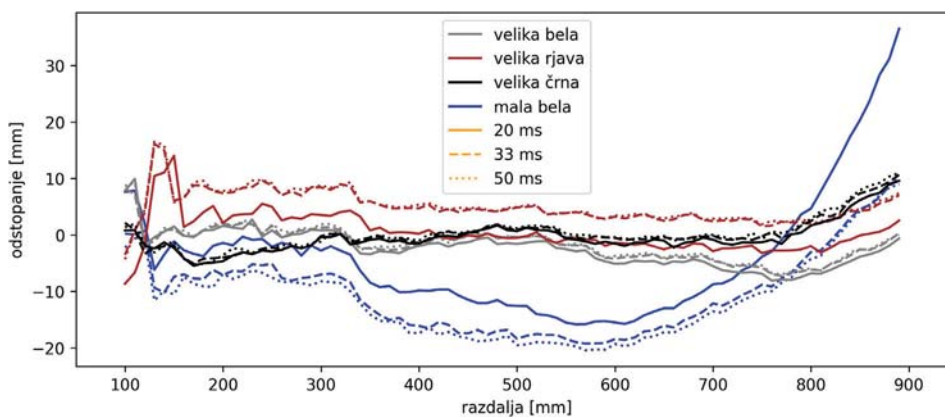
Drugi predstavnik lidarjev z direktni merjenjem časa, ki smo ga preizkusili je VL53L1. V času preizkušanja je bil to najzmogljivejši lidarski modul iz ponudbe STMicroelectronics. Njegovo vidno polje obsega 27°, teoretični domet pa znaša 4 m. Poleg tega ima tudi več dodatnih funkcionalnosti, kot sta zaznavanje več tarč na različnih razdaljah pod pogojem, da so razmaknjene vsaj 80 cm, in nastavljanje vidnega polja z izbiro interesnih sprejemnikov iz 16 x 16 polja SPAD. V normalnem režimu lahko podatke vzorci z največ 60 Hz.

Tekom analize smo izmerili relativno majhne standardne deviacije meritev. Za določanje razdalje do velike tarče so negotovosti prikazane na sliki 2.11. Na celotnem testiranem območju se standardna deviacija meritev nahaja pod 4 mm. Povečana standardna deviaciji na modrem grafu je kasneje razložena v sklopu analize delovanja senzorja na majhni tarči.

Slika 2.12 prikazuje še pripadajoči merilni pogrešek. Tako kot pri negotovosti meritev tudi tu opazimo, da praktično ni zveze z barvo tarče. Za velike tarče so meritve ne glede na čas vzorčenja vsaj znotraj 2 cm od prave vrednosti. Če izvzamemo povečan pogrešek pri meritvi do rjave tarče okrog 140 mm, je pogrešek celo manjši od 1 cm. Opazimo tudi, da za velike tarče hitro nastane nekaj napake, ki pa je med 200 mm ter 800 mm precej konstantna. Odstopanje znotraj ene konfiguracije je na tem območju manjše od 11 mm.

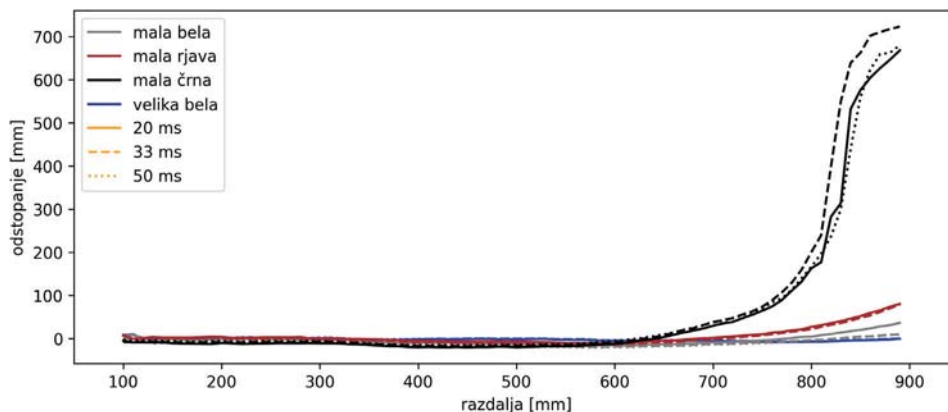


Slika 2.11: Merilna negotovost meritev razdalje s senzorjem VL53L1 za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi velike tarče.



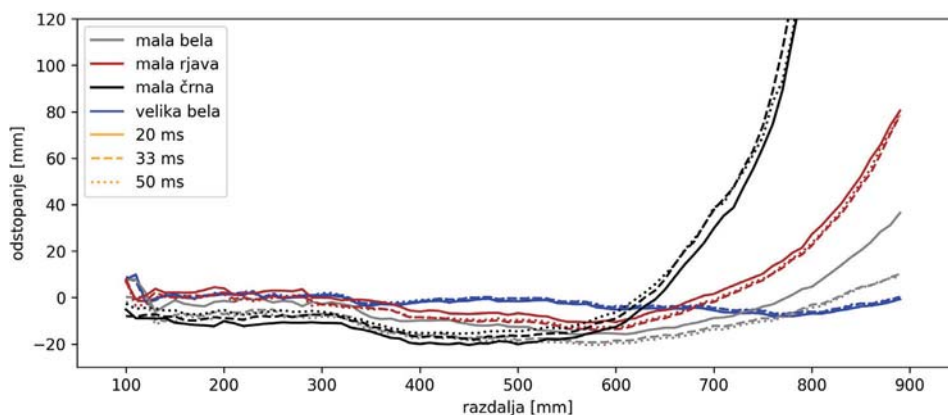
Slika 2.12: Merilni pogrešek meritev razdalje s senzorjem VL53L1 za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi velike tarče.

Odstopanje meritev od prave vrednosti pri merjenju razdalje do malih tarč je prikazano na sliki 2.13. Okrog 600 mm se za črno tarčo izmerjena razdalja odcepi od pričakovane vrednosti. To pripisujemo temu, da je signal iz ozadja primerljivo močan odboju od tarče, ki ga algoritem določi za šum ter izloči. Morda je problem tudi to, da se odboj od tarče ter odboj od ozadja združita v en širši odboj, kar zmede delovanje algoritma za korekcijo hoda meritve, podobno kot smo opazili pri lastnem lidarju. Slednje je podrobneje opisano v poglavju 3.6.



Slika 2.13: Merilni pogrešek meritev razdalje s senzorjem VL53L1 za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi male tarče.

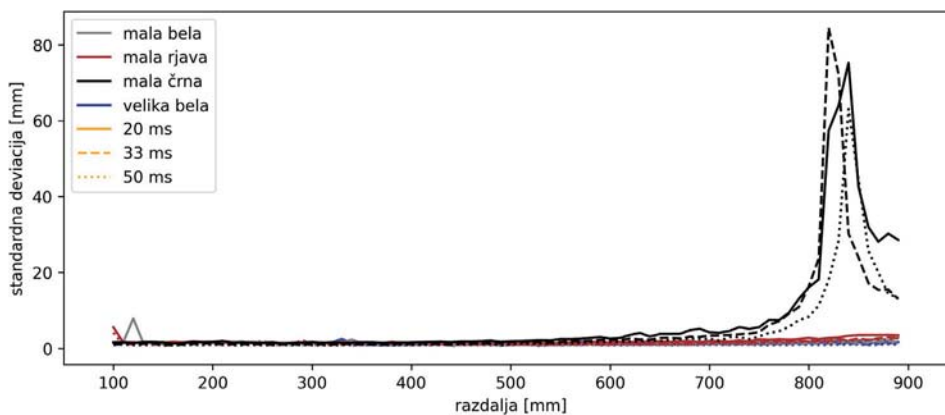
Ker ostali pogreški zaradi velikosti merilne napake na črni tarči niso vidni, so na sliki 2.14 prikazani na ločenem grafu z omejeno vertikalno osjo. Tako kot pri velikih tarčah, tudi tu opazimo le majhno odvisnost od časa vzorčenja in primerljivo majhne merilni pogrešek. Odvisnost od barve tarče je nekoliko bolj izrazita.



Slika 2.14: Merilni pogrešek meritev razdalje s senzorjem VL53L1 za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi male tarče z omejeno vertikalno osjo.

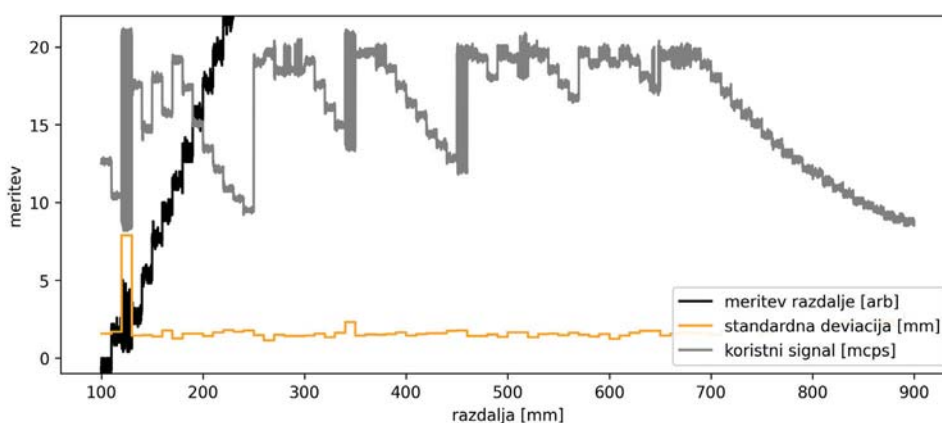
Negotovosti določanja razdalje do malih tarč so prikazane na sliki 2.15. Raztros meritev je majhen tudi tu. Izjema so meritve na mali črni tarči na razdalji preko 600 mm, na začetku merilnega območja pa povečano negotovost opazimo tudi pri beli ter rjavi tarči. Razen tega je za ti dve tarči na celotnem preizkušnem območju standardna deviacija meritev znotraj le

nekoliko nad 3 mm, enako kot pri merjenju razdalje do velike tarče. Zanimivo je, da se za črno tarčo negotovost po vrhu okrog 830 mm nekoliko umiri.



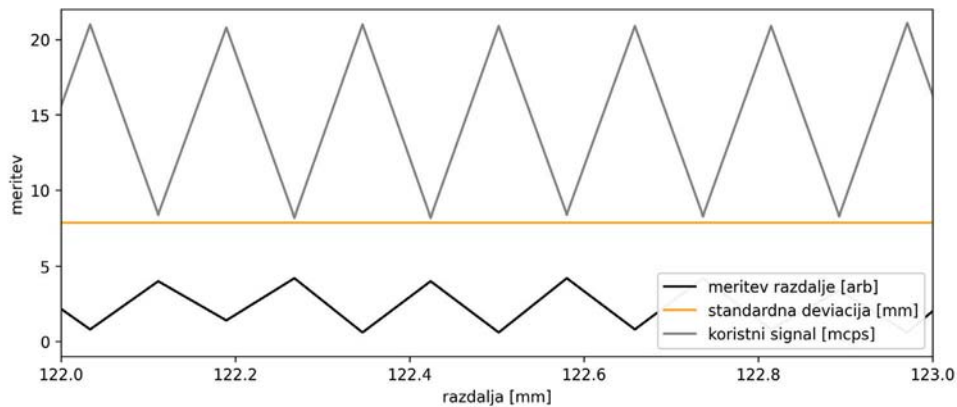
Slika 2.15: Merilna negotovost meritev razdalje s senzorjem VL53L1 za različne barve tarče in različne čase meritev pri uporabi male tarče.

Povečana standardna deviacija v prvih centimetrih meritev je še vedno ustrezno majhna, vseeno pa smo preučili vzrok za njen nastanek. Tega smo našli v načinu delovanja senzorja. Iz slike 2.16, ki prikazuje korelacijo med raztrosom meritev koristnega signala ter raztrosom meritev razdalje, je razvidno, da porast standardne deviacije meritev sovpada z velikim raztrosom meritve koristnega signala. Iz amplitude nihanja signala, lahko sklepamo, da krmilnik dinamično prilagaja moč laserja. Ker je prejeti signal ravno na meji za preklon merilnega območja, se intenziteta oddane svetlobe spreminja iz vzorca v vzorec. Preklapljanje med dvema načinoma delovanja očitno vpliva na negotovost meritev.



Slika 2.16: Korelacija med raztrosom meritev koristnega signala ter raztrosom meritev razdalje pri merjenju oddaljenosti male bele tarče s senzorjem VL53L1.

To teorijo lahko dodatno podkrepimo s sliko 2.17. Ta prikazuje povečavo grafa iz slike 2.16, ki prikazuje povečavo v okolici povečanega raztrosa. Opazimo, da nihanje meritev (črno) sovpada z nihanjem moči signala (sivo).



Slika 2.17: Detajl analize korelacije med raztrosom meritev koristnega signala ter raztrosom meritev razdalje pri merjenju oddaljenosti male bele tarče s senzorjem VL53L1.

Točen način delovanja VL53L1 ni razkrit. Očitno ima senzor težave s premajhno histerezo za preklon merilnega območja. Na interno delovanje senzorja ne moremo vplivati, torej problema s povečanim raztrosom v nekaterih delovnih točkah ne moremo rešiti. Temu navkljub je odstopanje dovolj majhno za marsikatero uporabo.

2.3.3 Povzetek preizkušanja lidarjev in izbor za nadaljnje delo

Pri merjenju razdalje do velike bele tarče sta se oba preizkušena senzorja odrezala ustrezno, več težav pa je bilo pri določanju razdalje do malih in predvsem črnih tarč. Na prvi pogled se v večini primerov VL53L1 odreže bistveno bolje od VL53L0X, po objektivni oceni pa je razlika manjša.

Za uporabo kot del sistema za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v delovno območje robota smo ocenili potrebo po doseganju točnosti in negotovosti meritev do 2 cm. Za uporabno razdaljo smo vzeli razpon do prve meritve, ki preseže začrtano mejo negotovosti in se znotraj zastavljenih meja ne vrne v največ 3 cm, oziroma če je presežek večji od 1 cm. Podatki o uporabni razdalji so zbrani v tabeli 2.1. Kot je bilo razvidno že iz grafov negotovosti in pogreška, čas vzorčenja nima bistvenega vpliva oziroma je zveza celo inverzna.

Eksperimenti z robotom so bili predvideni na robotu UR5e proizvajalca Universal Robots in s postavitvijo senzorjev vzdolž robotovih segmentov. Glede na dimenzije izbranega robota bi za zaznavanje posega v njegov delovni prostor zadoščali že senzorji z uporabnim dometom 40 cm,

čemur ustrezata oba preizkušena senzorja. Za nadaljnje eksperimente smo izbrali VL53L1, ker v primerjavi z VL53L0X na večini preizkušene območja dosega znatno manjše merilne negotovosti in pogoške.

Tabela 2.1: Pregled uporabnih dometov lidarjev

senzor	vzorčna frekvenca [Hz]	uporaben domet [cm]		opomba
		kriterij točnosti	kriterij natančnosti	
VL53L0X	50	54	60	
	30	59	59	omejitev zaradi neveljavnih meritev
	20	56	56	omejitev zaradi neveljavnih meritev
VL53L1	50	69	82	
	30	67	81	
	20	67	83	

Čeprav je izbrani lidarski modul glede na lastnosti meritev primeren za zaznavo posega v robotov delovni prostor, ta ni primeren za preučevanje pojavov pri preusmerjanju vidnega polja. VL53L1 ima zelo široko vidno polje in ponuja le malo možnosti za njegovo preoblikovanje ali preusmerjanje. Pri preoblikovanju vidnega polja je glavna ovira fizična velikost senzorja. Temu navkljub je mogoče vidno polje brez večjega vpliva na delovanje senzorja znatno zožiti z uporabo kompaktnih leč [81]. Za preučevanje pojavov pri nadaljnjem preusmerjanju vidnega polja pa naletimo na problem, ker točno delovanje senzorja ni razkrito. Na podlagi opazovanja oblike oddanega svetlobnega pulza sklepamo, da se za meritev poslužuje uporabe hibridnega pristopa med pulznim in AMCW delovanjem, opazovanje internih signalov pa ni možno. VL53L1 je torej uporaben le za del načrtovanih raziskav.

3 Lidarski sistem z več vidnimi polji

Namen tega poglavja je bralcu predstaviti delovanje lidarja, ki je bil uporabljen za analizo pojavov pri preusmerjanju vidnega polja lidarja, kar je ključnega pomena za razumevanje nadaljnjega dela. S tem razlogom so v tem poglavju sistematsko predstavljeni tako fizikalni principi, ki veljajo za vse lidarje, kot tudi specifične lastnosti delovanja in izdelave uporabljenega lidarja.

Na tržišču je mogoče najti množico kakovostnih lidarjev z visokimi vzorčnimi frekvencami, majhnimi merilnimi pogreški, in veliko natančnostjo meritev. Za namen preučevanja vplivov optičnih elementov za preusmerjanje vidnega polja na meritve razdalje potrebujemo tudi vpogled v interne signale in vgrajene kompenzacijske metode meritev, ki za komercialne lidarje niso na voljo. Na razpolago so tudi nekatere razvojne platforme, kot je SECO-RANGEFINDER-GEVK proizvajalca Semiconductor Components Industries. Ta je sicer primerna za opazovanje vseh internih signalov, a ne omogoča povezovanja ali sinhronizacije množice sprejemnikov ali oddajnikov. S tem razlogom smo izdelali lastni lidar. V tem poglavju so najprej predstavljene zakonitosti, ki jih je potrebno upoštevati pri načrtovanju, nato pa je podrobneje predstavljena tudi konstrukcija in karakterizacija izdelanega lidarja.

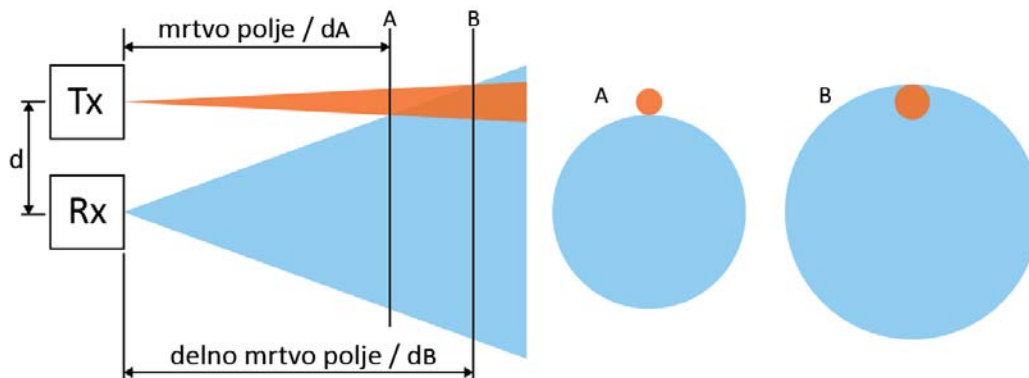
3.1 Vidno polje

Lidarji za meritve tipično oddajo ozek snop svetlobe, odboj pa zaznajo s sprejemnikom z ozkim vidnim poljem. Oddajnik in sprejemnik se lahko nahajata eden zraven drugega, oddajnik pred sprejemnikom, ali pa na poljubni poziciji in sta združena preko ustreznega optičnega sistema. V vsakem primeru je potrebno paziti, da se osvetljevalno polje oddajnika in vidno polje sprejemnika prekrivata, hkrati pa je razlika med njima čim manjša.

Če je vidno polje detektorja večje od osvetljevalnega polja oddajnika, se poveča zajem zunanje svetlobe in s tem šuma. V obratnem primeru se zaman troši moč na oddajniku, ki je omejena z varnostnimi predpisi. Z mehanskim in optičnim načrtovanjem je torej potrebno optimizirati energijo, ki pride do tarče ter nazaj do detektorja. Poleg tega je potrebno pri izbiri vidnega kota oddajnika ter sprejemnika upoštevati, da v konfiguraciji, kjer se oddajnik in sprejemnik nahajata eden zraven drugega, blizu naprave pride do mrtvega polja, kot prikazuje slika 3.1.

V mrtvem polju tarče ni mogoče zaznati. Zmanjšamo ga lahko z zmanjšanjem razdalje med oddajnikom in sprejemnikom in z večanjem širine osvetljevalnega ali vidnega polja. Pri

manjšanju razdalje smo omejeni s fizično velikostjo uporabljenih komponent, z večanjem širine oddanega pulza svetlobe ali vidnega polja pa slabšamo SNR. Mrtvemu polju sledi delno mrtvo polje, kjer sprejemnik zaznava le del koristnega signala. Za vzporedne osi oddajnika ter sprejemnika mrtvo polje, d_A , ocenimo po enačbi (3.1), konec delno mrtvega polja, d_B , pa po enačbi (3.2). Pri tem je d razdalja med oddajnikom ter sprejemnikom, φ_{Tx} in φ_{Rx} pa kot odpiranja oddanega pulza in vidno polje sprejemnika.



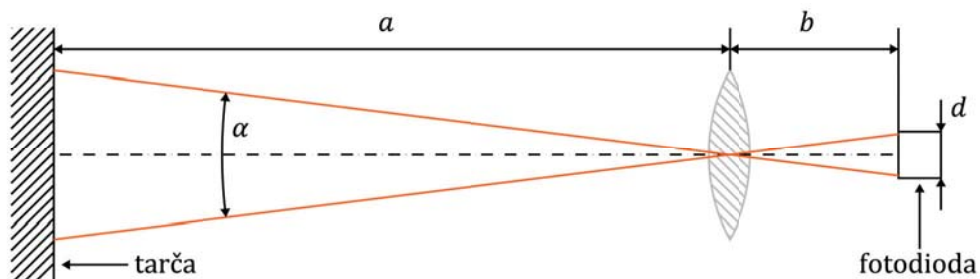
Slika 3.1: Prikaz delovanja mrtvega polja iz strani (levo) ter prečni pogled na koncu mrtvega polja (A) in koncu delno mrtvega polja (B).

$$d_A = \frac{d}{\tan(\varphi_{Tx}/2) + \tan(\varphi_{Rx}/2)} \quad (3.1)$$

$$d_B = \frac{d}{\tan(\varphi_{Tx}/2) - \tan(\varphi_{Rx}/2)} \quad (3.2)$$

3.1.1 Optika na sprejemniku

Na vidno polje lidarja vplivamo predvsem s fizično postavitvijo oddajnika in sprejemnika, ter z izborom in postavitvijo leč na oddajniku in sprejemniku. Vidno polje sprejemnika (α) lahko ocenimo po enačbi (3.3). V njej nastopata velikost fotodiode (d) ter razdalja med optičnim centrom leče in fotodiodo (b). Shema vidnega polja sprejemnika z označenimi veličinami je prikazana na sliki 3.2.



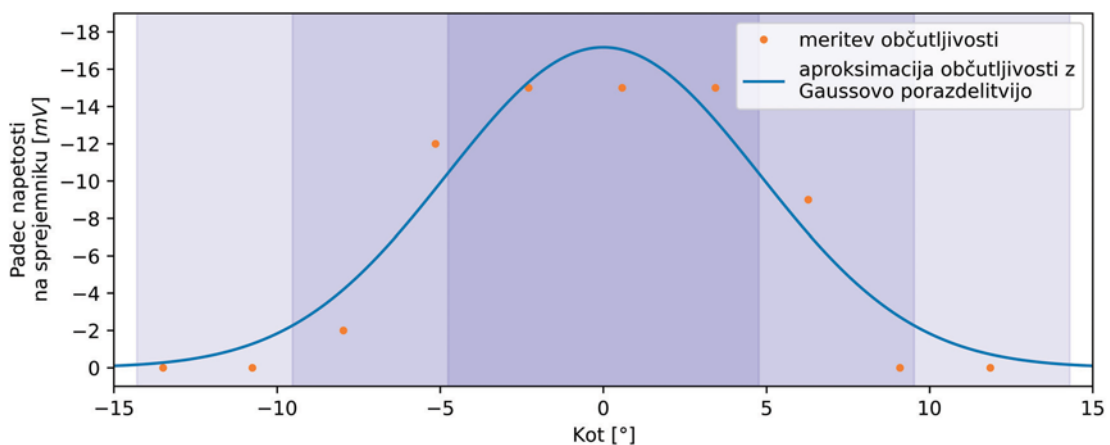
Slika 3.2: Shema vidnega polja sprejemnika.

$$\alpha = 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{d}{2 \cdot b}\right) \quad (3.3)$$

Ker se lahko tarča nahaja na poljubni razdalji, ne moremo zagotoviti, da bo na fotodetektorju nastala ostra slika, lahko pa izberemo željeni zorni kot, znotraj katerega vsa svetloba pada na detektor. Za nastanek ostre slike mora biti zadoščena enačba (3.4). Ker je goriščna razdalja leče tipično bistveno manjša od merjene razdalje, je napaka majhna in s tem ocena vidnega polja primerna.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3.4)$$

Za fokusiranje svetlobe smo v našem lidarju uporabili standardni M12 lečni sestav za kamere z goriščno razdaljo 16 mm. Za izbrano fotodiodo, MTAPD-07-013 proizvajalca Marktech Optoelectronics, ki ima okroglo aktivno površino s premerom 0,5 mm, bi s tem dobili teoretično vidno polje $1,8^\circ$, kar je odlično za meritve velikih razdalj, ustvari pa veliko mrtvo polje. Za doseganje manjšega mrtvega polja smo lečo načrtno izmaknili iz goriščne pozicije. Z meritvijo vidnega polja smo ugotovili, da pri nastavljeni poziciji leče sprejemnik odboj svetlobe zaznava z vidnim poljem 20° , s predpostavko Gaussove razporeditve občutljivosti pa smo določili vidno polje z 1σ občutljivosti, $9,5^\circ$. Meritev vidnega polja in aproksimacija občutljivosti s predpostavko Gaussove porazdelitve prikazuje slika 3.3. Z različnimi odtenki modre barve so označena območja 1σ , 2σ in 3σ občutljivosti.

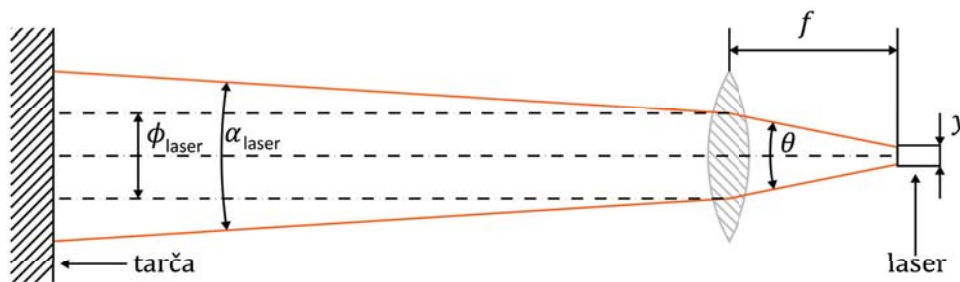


Slika 3.3: Občutljivost sprejemnika v odvisnosti od kota.

3.1.2 Optika na oddajniku

Optimalna postavitev leče glede na lasersko diodo je odvisna od njene goriščne razdalje ter od zelenih lastnosti snopa svetlobe. Za detekcijo tarče v širšem območju je smiselno svetlobo

oddajati pod širšim kotom, za natančno merjenje razdalje pa je najbolj uporaben ozek vzporeden snop svetlobe. Temu se najbolj približamo, kadar je svetilo v gorišču uporabljene leče. V tem primeru premer snopa svetlobe (ϕ_{laser}) ter divergenco (α_{laser}) v odvisnosti od velikosti izvora svetlobe (y), njegove divergence (θ) in goriščne razdalje uporabljene leče (f) opisujeta enačbi (3.5) ter (3.6). Shema oddanega snopa svetlobe s pripadajočimi veličinami je prikazana na sliki 3.4.



Slika 3.4: Shema oddanega snopa svetlobe.

$$\phi_{laser} = 2 \cdot f \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + y \quad (3.5)$$

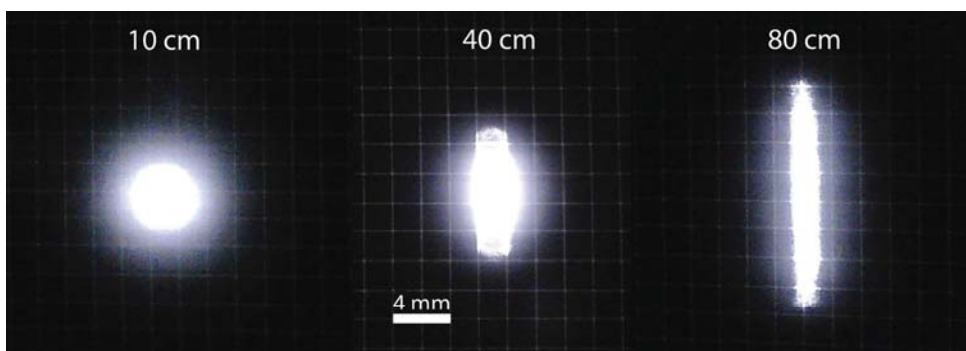
$$\alpha_{laser} = 2 \cdot \text{atan}\left(\frac{y}{2 \cdot f}\right) \quad (3.6)$$

Iz enačb je razvidno, da so premer snopa, divergenca, velikost izvora svetlobe in goriščna razdalja leče med seboj povezani. Pri načrtovanju optičnega sistema je torej vedno potrebno sprejeti kompromis, še dodatne komplikacije pa so povezane z geometrijo svetlobnega izvora oziroma astigmatizmom. Polprevodniška laserska dioda ima zaradi svoje izdelave asimetričen izvor svetlobe, kar pomeni, da sta parametra y in θ odvisna od orientacije. Poleg tega se svetloba vzdolž PN spoja in prečno nanj širi iz različnih lokacij. To je posledica uklona svetlobe ob potovanju skozi ozko odprtino, ki je vgrajena v diodo. Za simetrični izhodni žarek je treba uporabiti korekcijsko lečo oziroma lečni sistem ali prostorski filter [82], [83]. Odvisno od aplikacije korekcija astigmatizma ni nujno potrebna.

Uporaba lečnega sestava namesto samostojne leče lahko privede do težav. Ob prehodu v drug medij se del svetlobe odbije, zato poleg fokusiranega centralnega žarka pride do šibkega razpršenega sija, ki lahko vpliva na meritev. Za meritev velikih razdalj to ne povzroča težav, saj amplituda odboja parazitnega sija z razdaljo upada s četrto potenco, amplituda odboja

centralnega žarka pa z drugo potenco. V primeru, da je uporaba lečnega sestava nujna, parazitni sij pa problematičen, se lahko problem omili z uporabo protiodbojnih prevlek na lečah.

V našem lidarju smo za fokusiranje oddane svetlobe uporabili preprosto bikonveksno lečo. Slike velikosti laserskega žarka na razdalji 10 cm, 40 cm in 80 cm od lidarja so prikazane na sliki 3.5. Dosegli smo žarek, ki je v vodoravni smeri pretežno vzporeden, v navpični pa se odpira pod kotom $1,3^\circ$. Za doseganje ugodnejšega kontrasta je bil žarek fotografiran na črni tarči z belo dvomilimetrsko mrežo, ki je služila merjenju velikosti žarka.



Slika 3.5: Oblika snopa svetlobe na razdalji 10 cm, 40 cm in 80 cm od lidarja.

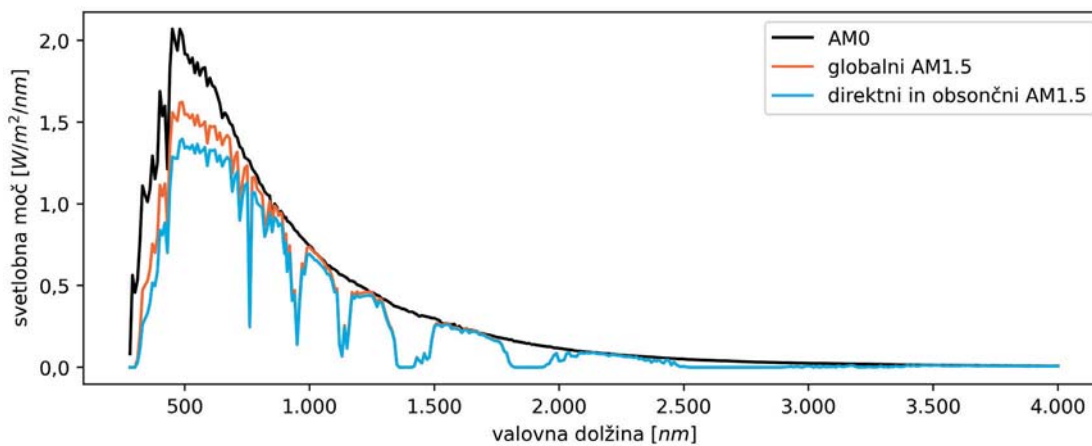
3.2 Izplen koristnega signala

Lidar deluje na podlagi zaznavanja odbite svetlobe, kar pomeni, da mora biti sposoben odbito svetlobo razločiti iz okolice. Pomembni so vsi deli signalne verige. Oddajnik mora pod primernim prostorskim kotom oddati svetlobo primerne valovne dolžine, signal se na prenosni poti ne sme preveč absorbirati, sprejemnik pa mora biti čim bolj občutljiv na valovno dolžino koristnega signala. Hkrati mora ob odsotnosti koristnega signala dajati čim manjši tok, kar zajema tako temni tok, kot tudi odziv na motilno svetlobo iz okolice.

3.2.1 Šum iz okolice

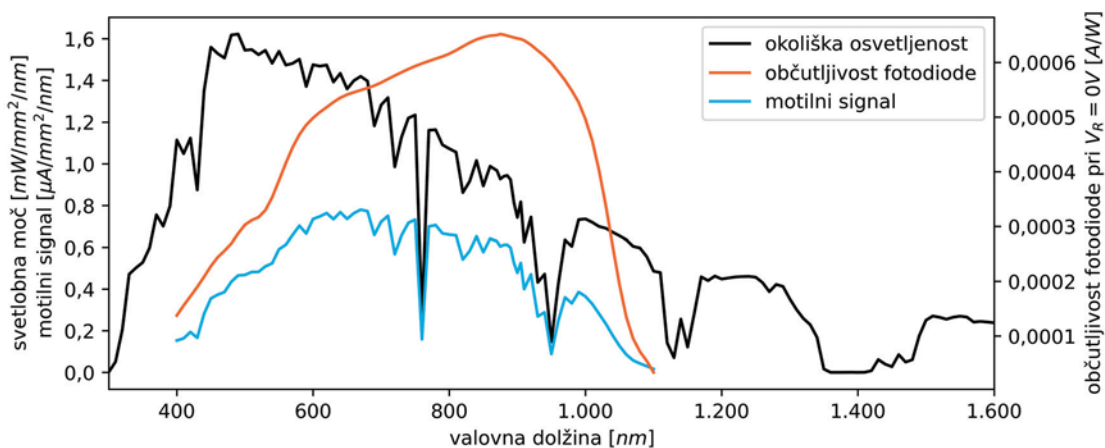
Poleg koristnega signala se v sprejemno diodo sklaplja tudi ostala svetloba iz okolice. V IR spektru, kjer običajno delujejo lidarji, svetloba prihaja pretežno s sonca. Spekter sončne svetlobe je opisan v standardu ASTM G173 [84], katerega izvleček je prikazan na sliki 3.6. Na njej so prikazane gostote moči sončne svetlobe na površini Zemlje brez upoštevanja vpliva

atmosfere (AM0), ter z upoštevanjem atmosfere pod kotom osvetlitve 37° . Za slednje sta podana globalni AM1.5, ki upošteva vso svetlobno moč, ter direktni in obsončni AM1.5, ki upošteva le moč, ki prihaja neposredno iz smeri sonca in bližnje okolice, torej ne upošteva razpršene svetlobe iz atmosfere.



Slika 3.6: Gostota moči sonca na površini zemlje po standardu ASTM G173.

V najslabšem primeru torej lahko računamo, da se v sprejemnik sklaplja vsa energija iz globalnega AM1.5 spektra. Pri tem je potrebno upoštevati še spektralno občutljivost sprejemne diode, ki je odvisna od valovne dolžine svetlobe. Na primeru fotodiode MTAPD-07-14, ki smo jo uporabili v našem lidarju, je izračunani spekter motilnega signala prikazan na sliki 3.7.



Slika 3.7: Spekter motilnega signala za izbrano fotodiodo s plazovnim prebojem pri dani občutljivosti in okoliški osvetljenosti.

Lidarji kot vir svetlobe najpogosteje uporabljajo laserske diode. Te imajo izjemno ozke spektralne črte, kar nam omogoča, da s pasovno prepustnimi svetlobnimi filtri učinkovito

odstranimo večino neželene svetlobe. Moderni filtri omogočajo filtriranje svetlobe s pasovno širino nekaj nanometrov, zelo strmimi prehodi, visoko stopnjo blokiranja neželene svetlobe in visoko prepustnostjo za koristni signal. Če bi na zgornjem primeru uporabili pasovno prepustni filter s centralno frekvenco 905 nm in pasovno širino 10 nm, bi se skupni prispevek motilnega signala zmanjšal za 46-krat. Zaradi visoke cene vrhunskih pasovno prepustnih filtrov se pogosto uporablja cenejše izvedbe, ali pa se jih sploh ne.

3.2.2 Ocena moči odbitega signala

Maksimalna moč odbitega signala (P_{Rx}) se lahko za difuzno tarčo oceni po prilagojeni radarski enačbi (3.7) [85]. G_{Tx} in G_{Rx} sta učinkovitosti oddajnika in sprejemnika, P_{Tx} predstavlja moč oddajnika, r polmer sprejemne optike (πr^2 pa njena površina), 2π je prostorski kot, pod katerim tarča odbija svetlobo, d pa je razdalja med tarčo in senzorjem. Ta enačba predpostavlja, da je svetloba fokusirana na tarčo oziroma je vanjo usmerjena v obliki vzporednega snopa. Če svetloba ni fokusirana, moč namesto s kvadratom razdalje upada na četrto potenco. Še ena predpostavka je, da tarča odbije vso svetlobo. Za tarčo z manjšo reflektivnostjo bi bilo potrebno upoštevati še ta linearni koeficient.

$$P_{Rx} = \frac{G_{Tx}G_{Rx}P_{Tx}\pi r^2}{2\pi d^2} \quad (3.7)$$

3.2.3 Izbor fotodiode

Pri pulznem lidarju je zmožnost točne detekcije šibkega odboja ključnega pomena. Za detekcijo svetlobe se pogosto uporablja plazovna fotodioda (ang. Avalanche Photodiode, APD), zaradi večje občutljivosti pa se čedalje pogosteje uporablja silicijeve fotopomnoževalke (ang. Silicon Photomultiplier, SiPM) ali APD v Geigerjevem režimu. Slednje najpogosteje imenujemo z angleško kratico SPAD (ang. Single Photon Avalanche Diode). Posamezna SPAD, opremljena s primernim vezjem za ohlajanje (ang. quenching circuit), ob zaznanem fotonu odda napetostni pulz. Pred naslednjo detekcijo mora preteči čas ohlajanja (ang. quenching time). Vezje za ohlajanje je najpogosteje preprosto serijsko vezan upor, obstajajo pa tudi aktivna vezja. Če v polju SPAD opazujemo izhode posameznih diod, je pogostost pulzov sorazmerna amplitudi vpadne svetlobe. Če izhode posameznih SPAD vežemo vzporedno, dobimo SiPM, njen izhod pa je superpozicija posameznih pulzov [86], [87]. Pri polju SPAD in SiPM hitro nastopi problematika nasičenja, zato je potrebno z optičnimi filtri odstraniti neželeni del svetlobnega

spektra. Za ojačenje signala pri večini tipov fotodiod potrebujemo transimpedančni ojačevalnik (TIA), kar igra vlogo pri skupni ceni in kompleksnosti naprave. Izjema je SiPM, pri katerem zadošča že preprosto rezistivno vezje. Primerjava diod, povzeta po [88], je prikazana v tabeli 3.1. Zaradi manjše občutljivosti na svetlobo iz okolice smo se za naš lidar odločili za APD, MTAPD-07-013 proizvajalca Marktech Optoelectronics. Pri AMCW ter FMCW lidarju hiter dvižni čas ter ojačenje nista tako pomembna, zato bi lahko pri načrtovanju teh uporabili cenejše PIN diode, ki pa za pulzni lidar niso primerne.

Tabela 3.1: Primerjava SiPM, APD in PIN fotodiode.

	SiPM	APD	PIN
Ojačenje	10^5	10 do 100	1
Delovna napetost	Do nekaj deset voltov	100 do 200 V	Nekaj voltov
Dvižni čas	Zelo hiter	Hiter	Zmeren
Cena	Visoka	Visoka	Nizka

3.2.4 Omejitev moči svetlobnega vira

Najenostavnejši način za izboljšanje SNR je s povečanjem amplitude signala. Signal lahko povečujemo le do te mere, ko za uporabnika in okolico še ne predstavlja nevarnosti. Varnost pri laserskih produktih je opredeljena v IEC 60825 [89]. Lidar za uporabo v okolju, kjer lahko človek brez zaščitne opreme za oči pride v stik z žarkom, mora biti uvrščena v razred 1 ali 2. Razred 2 je omejen na vire svetlobe, ki svetijo v vidnem spektru. Lidar, ki deluje v IR spektru, torej ne more biti v razredu 2. Za določanje maksimalne dovoljene moči IEC 60825 predpostavlja najslabši možen scenarij, torej da se vsa svetloba, ki pade na oko, fokusira v eni točki. To pomeni, da se za laserske snope, ki so manjši od standardnega očesa ($3,9 \text{ cm}^2$), pogosto namesto moči ali energije na površinsko enoto podaja kar celotna energija ali moč. V pasu med 400 nm in 1050 nm, kjer deluje večina komercialnih lidarjev za brezkontaktno merjenje razdalje, je velikost okna za integriranje $5 \mu\text{s}$. Maksimalne povprečne moči znotraj

tega intervala so odvisne od valovne dolžine, trajanja posameznega pulza in razreda laserske naprave, v katerega je naprava uvrščena. Kot primer, enačbi (3.8) ter (3.9) prikazujeta izračun maksimalne moči pulza dolžine 1 ms in 10 ns za razred 1 pri valovni dolžini 905 nm. Oddajanje krajših svetlobnih pulzov sicer zmanjšuje skupno energijo pulza, a dovoljuje oddajanje z večjo močjo in posledično omogoča večji SNR.

$$7 \cdot 10^{-4} \cdot (1 \text{ ms})^{0,75} \cdot 10^{0,002(905-700)} \text{ J} = 101,2 \text{ } \mu\text{J} \quad (3.8)$$

(101,2 mW, 1 ms)

$$7,7 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{0,002(905-700)} \text{ J} = 199,75 \text{ nJ} \quad (3.9)$$

(199,75 W, 10 ns)

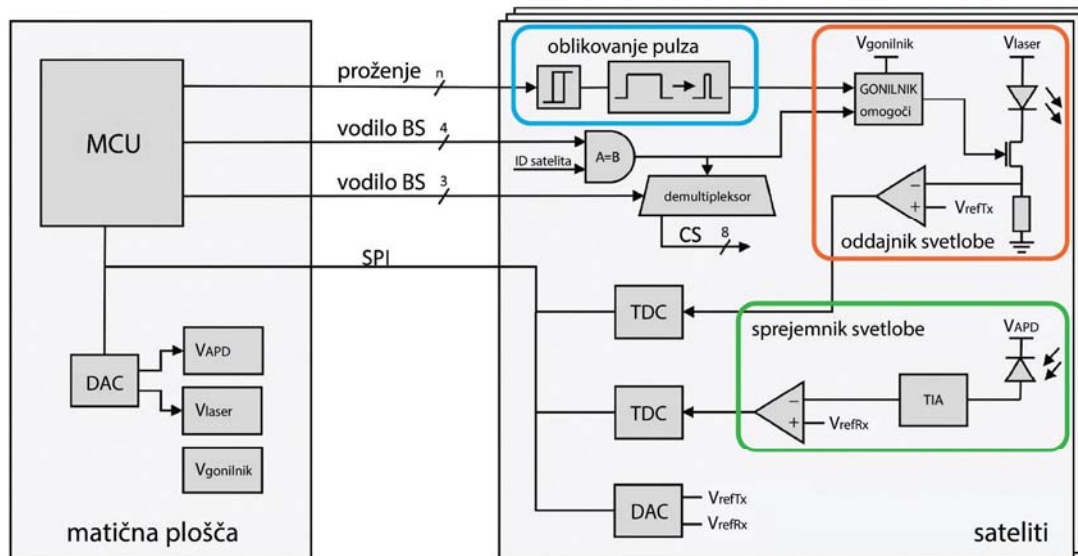
3.3 Poznavanje lastnosti medija

Pri določanju razdalje na podlagi direktne meritve časa preleta nas poleg sistemskih negotovosti in napak omejujeta še točnost poznavanja hitrosti svetlobe ter merjenja časa. Relativna hitrost svetlobe z 905 nm v suhem zraku s 450 ppm CO₂ pri standardnem tlaku niha med 0,99978816588 pri 100 °C in 0,99966055326 pri -40 °C [90]. To pomeni, da že brez upoštevanja lomnega količnika zraka dobimo manj kot 0,04 % napake, brez upoštevanja točnih lastnosti zraka pa pod 0,007 %. Razen za zelo velike razdalje, lahko za namene merjenja razdalje na površini Zemlje spreminjanje hitrosti svetlobe zanemarimo. Točnost in natančnost sta bolj kot od negotovosti poznavanja hitrosti svetlobe omejeni z našo sposobnostjo merjenja časa preleta. Točno poznavanje lomnega količnika vzdolž svetlobne poti je pomembnejše pri oceanografskih meritvah. Ta se med realnimi lastnostmi morske vode spreminja za več procentov, odvisen pa je od temperature, slanosti, valovne dolžine in pritiska [91], ki se spreminjajo z globino.

3.4 Zasnova lidarskega sistema z več vidnimi polji

Za izdelavo lastnega AMCW lidarja je na tržišču na razpolago več krmilnih čipov in pripadajočih razvojnih platform, njihov problem pa je seštevanje odbojev v skupen popačen signal. S tem razlogom smo za namene preučevanja vplivov elementov za preusmerjanje vidnega polja izdelali lasten pulzni lidar z več vidnimi polji. Razvoj je potekal postopoma. Prva verzija je bila monolitski dizajn s tremi oddajniki in enim sprejemnikom na istem tiskanem vezju, ki je za svoje delovanje potreboval zunanje napajalnike in mikrokrmilnik (MCU). V končni fazi smo razvili modularni sistem, ki združuje eno matično ploščo in do šestnajst satelitov. Na matični plošči se nahajajo napajalniki ter MCU, sateliti pa imajo vgrajene

oddajnike, sprejemnike, vezja za oblikovanje signalov ter časovno digitalne pretvornike (TDC). Poenostavljena shema modularnega lidarskega sistema je prikazana na sliki 3.8, izdelani sistem s tremi sateliti pa je prikazan na sliki 3.9. Izdelani lidar ima maksimalno teoretično vzorčno frekvenco 10 kHz, ki je razdeljena med vse priključene satelite. Zaradi omejene hitrosti prenosa podatkov iz mikrokrmilnika na računalnik, je bila dejanska vzorčna frekvenca 500 Hz.



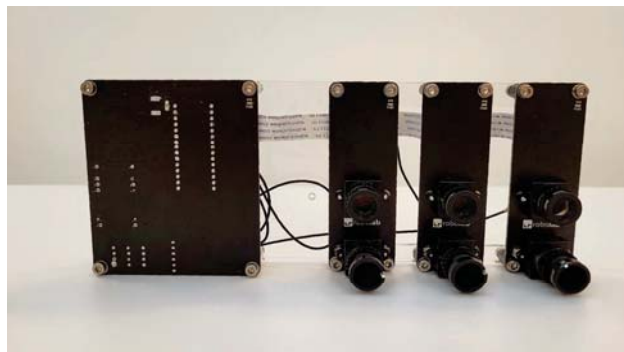
Slika 3.8: Poenostavljena shema modularnega lidarskega sistema.

3.4.1 Matična plošča

Matična plošča zajema mikrokrmilnik in napajalnike. Napaja se iz dveh virov, mikrokrmilnik preko USB, preostanek pa iz zunanega 12 V napajalnika. Za napajanje nizkonapetostnih čipov je uporabljen linearni regulator napetosti, za odpiranje tranzistorja za proženje laserja, laser in APD pa so napetosti zagotovljene s pomočjo preklopnih napajalnikov. Napajalni napetosti za laser in APD sta tudi digitalno nastavljivi, kar poenostavi nastavljanje moči oddanega pulza ter ojačenja fotodiode.

Za krmiljenje sistema je bil uporabljen mikrokrmilnik (MCU) STM32L432 na razvojni plošči Nucleo-32. Ta z računalnikom komunicira po protokolu USB-UART, s posameznimi čipi v sistemu pa preko SPI. Na matični plošči je na vodilo vezan le en dvokanalni digitalno-analogni pretvornik (DAC) za nastavljanje napajalnih napetosti, na vsakem satelitu pa so po trije čipi, ki za komunikacijo skupno zahtevajo pet vodil za izbor čipa (CS). To bi pomenilo, da bi za delovanje z vsemi šestnajstimi vodili potrebovali 81 ločenih vodil, kar je nepraktično. Namesto

tega se poslužujemo uporabe štiri-bitnega vodila za naslavljanje satelita (vodilo BS) in tri-bitnega vodila za naslavljanje čipa (vodilo CS), kot prikazano na sliki 3.8. Podatkovno vodilo ter signali za izbiro aktivnega satelita so med sateliti vezani vzporedno na tak način, da se lahko priklapljajo eden na drugega, kot je vidno na sliki 3.9. Signal za proženje meritve je prav tako iz matične plošče na vse satelite vezan vzporedno, le da je povezava direktna. Svetlobni pulz odda le tisti satelit izbran po vodilu BS.



(a)



(b)

Slika 3.9: Modularni lidarski sistem s tremi sateliti s pogledom (a) od spredaj in (b) od zadaj.

3.4.2 Sateliti

Sateliti združujejo vezja za oddajanje, sprejemanje ter merjenje časa preleta svetlobnega pulza ter elemente za določanje pragovne vrednosti za zaznavo oddaje in sprejema signala. Ti so podrobneje predstavljeni v naslednjem poglavju. Sateliti napajalne napetosti za odpiranje tranzistorja za proženje laserja, laser in APD dobijo iz matične plošče, na njih samih pa je

prisotno le osnovno filtriranje motenj na napajalnih linijah. Za napajanje ostalih nizkonapetostnih komponent matična plošča zagotavlja napajalno napetost 5 V, ki se na vsakem posamičnem satelitu s pomočjo linearnega regulatorja napetosti spusti na 3,3 V. S tem se zmanjša občutljivost vezja na padec napetosti na napajalni liniji.

Na eno matično ploščo je lahko sočasno priključenih do šestnajst satelitov. Aktivni satelit se izbere s pomočjo štiri-bitnega vodila BS. Če se vrednost na vodilu ujema z nastavljenim naslovom satelita, se na njem omogoči oddajnik ter demultipleksor za izbor čipa. Satelitu je mogoče naslov nastaviti z vrtljivim stikalom. V izogib koliziji je potrebno paziti, da si več modulov ne deli istega naslova.

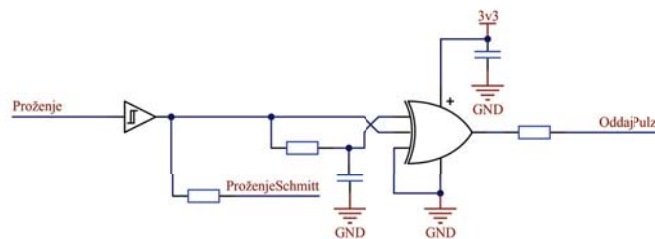
3.5 Opis delovanja posamičnih blokov

Lidarski sistem lahko razbijemo na več logičnih blokov. Ti so procesiranje, napajanje, oblikovanje pulza, oddajanje svetlobe, ter zaznavanje svetlobe. Na delovanje lidarja med naštetimi najbolj vplivajo zadnji trije, zato jim namenimo lastna poglavja. Originalni monolitski in končni modularni lidarskem sistem sta zgrajena zelo podobno, zato jima ne namenimo ločenih opisov. Ključne razlike so izpostavljene v pripadajočih poglavjih.

3.5.1 Oblikovanje pulza

Pred meritvijo je potrebno preko SPI na vseh satelitih, s katerimi želimo zaznavati odboj, vsem TDC poslati ukaz za inicializacijo meritve, šele nato lahko sprožimo meritev. Signala za začetek meritve se na vsakem satelitu najprej diskretizira s pomočjo Schmittovega prožilnika. To zagotovi ponovljive lastnosti signala za oblikovanje krmilnega pulza in posledično oblike pulza oddane svetlobe. V izogib potrebi po generiranju preciznega krmilnega pulza na strani matične plošče, pri čemer bi naleteli tudi na problematiko odbojev signala, se kratki strmi pulzi generirajo na vsakem satelitu posebej. Za ta namen obstajata dve preprosti opciji. Najenostavnejša je, da ločilni kondenzator za lasersko diodo postavimo za upor. Ko se odpre tranzistor za proženje laserja, se kondenzator sprazni skozi diodo, od tedaj naprej pa skozi njega teče le še majhen, z uporom omejen tok. Poleg enostavnosti je ta pristop tudi inherentno varen, saj bo skupna oddana energija, tudi v primeru odpovedi tranzistorja, omejena z energijo, ki je shranjena v kondenzatorju, in upornostjo upora. Slabost je v tem, da je strma le pozitivna fronta, negativna pa je sorazmerno položna in razvlečena. To poveča vpliv šuma na meritev širine svetlobnega pulza. Za doseganje večje strmine smo se poslužili vezja za aktivno oblikovanje pulza, ki je prikazano na sliki 3.10.

Signal za začetek meritve potuje skozi Schmittov prožilnik, zaradi česar fronte signala dobijo predvidljivo strmino. Signal se nato razcepi v dve veji. Prva je v vrata XOR povezana direktno, druga pa preko RC člena. Zaradi časovnega zamika, ko napetosti na vejah prečkata prag prehoda med logičnimi nivoji, se na izhodu vrat XOR pojavi kratek pulz. To se zgodi ob pozitivni in negativni fronti signala za proženje pulza. Ker prag za razločevanje med nizkim in visokim logičnim nivojem ni točno na polovici napajalne napetosti, je širina pulza ob pozitivni fronti drugačna kot ob negativni. V izogib težavam z variacijo dolžine pulzov smo poskrbeli, da proženje pulza ob negativni fronti ni bilo omogočeno.



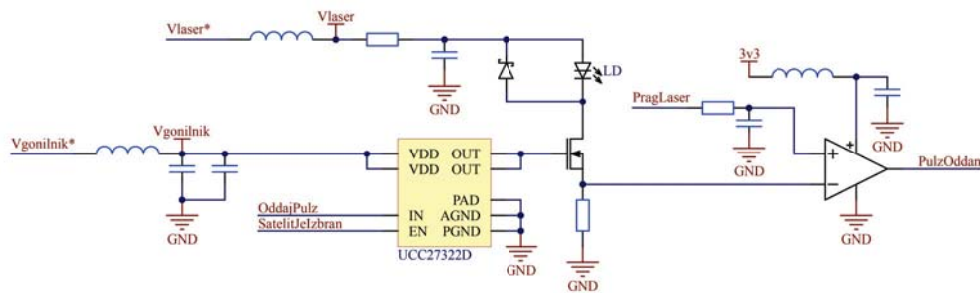
Slika 3.10: Vezje za oblikovanje pulza.

3.5.2 Oddajnik svetlobe

Oblikovani pulz služi kot krmilni signal za proženje tranzistorja. Tega odpiramo s pomočjo namenskega gonilnika, ki poskrbi za ustrezno hitro odpiranje in zapiranje kanala. Za vir svetlobe smo uporabili lasersko diodo SPL PL90_3 proizvajalca OSRAM Opto Semiconductor. Laserska dioda večino energije dobi iz ločilnega kondenzatorja, ki pa se napaja preko upora. V primeru odpovedi, ko bi kanal tranzistorja ostal konstantno odprt, bi energija prvega pulza sicer presegla varne meje, za tem pa je tok omejen pod varen nivo. Skozi lasersko diodo med pulzom teče do 40 A, svetlobna moč pa dosega 90 W. Zaradi velikih tokov in hitrih preklpov pridejo do izraza parazitne induktivnosti. Da ob izklopu inducirana napetost ne bi uničila laserske diode, ima ta vzporedno vezano zaščitno Schottky diodo. Za zmanjšan vpliv parazitov ima prožilni tranzistor majhno kapacitivnost in je z izhodom gonilnika povezan z zelo kratko povezavo. Izvor tranzistorja je na ničelni potencial vezan prek merilnega upora, na katerem lahko opazujemo tok skozi lasersko diodo. Meritev toka služi kot posredni indikator izsevane svetlobne moči. Alternativno bi lahko zraven laserske diode postavili fotodiodo z ojačevalnim vezjem, kar pa je napram merjenju toka mnogo dražje ter fizično zaseda bistveno več prostora. Za detekcijo oddanega pulza se primerja padec napetosti na merilnem uporu s pragovno napetostjo. Za zmanjševanje vpliva šuma in presluhov, se pragovna napetost v neposredni

bližini primerjalnika stabilizira z RC filtrom. Izhod primerjalnika je povezan neposredno na dva TDC. Eden od njiju meri čas do pozitivne, drugi pa do negativne fronte signala. Shema oddajnika je prikazana na sliki 3.11.

Monolitski lidar na istem vezju združuje tri oddajnike. Ključna razlika med njim in modularnim sistemom je v tem, da so izhodi iz primerjalnikov v monolitskem sistemu povezani z logičnimi vrati, tako da lahko izhode vseh treh oddajnikov nadziramo z enim samim TDC.

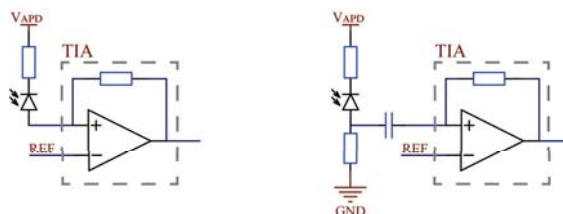


Slika 3.11: Shema vezja na oddajniku.

3.5.3 Sprejemnik svetlobe

Tako kot oddajnik, je za delovanje lidarja ključnega pomena tudi sprejemnik. Ta je bil zgrajen okrog fotodiode MTAPD-07-14. Razlog za izbiro APD pred SiPM ali PIN fotodiodo je razložen v poglavju 3.2.3, v tem poglavju pa več pozornosti posvečamo ojačenju signala, za kar je potrebno uporabiti transimpedančni ojačevalnik (TIA). Ta tok iz diode ojača in pretvori v napetost [92]. V osnovi je njegovo delovanje izjemno preprosto. Tokovni vir, običajno fotodioda z reverzno prednapetostjo, je povezan na negativni vhod operacijskega ojačevalnika, med negativnim vhodom in izhodom pa je vezan še en upor. Izhodna napetost se tako izračuna po Ohmovem zakonu $U = R \cdot I$, pri čemer pa je izhodna napetost zamaknjena za napetost na pozitivnem vhodu operacijskega ojačevalnika. Čeprav je TIA na prvi pogled preprosta komponenta, pa je TIA za lidarske aplikacije nadvse kompleksen. Omogočati mora veliko pasovno širino in veliko ojačenje, kar si med seboj nasprotuje. Za operacijske ojačevalnike je tipično podana pasovna širina pri enotskem ojačenju, pasovna širina pri izbranem ojačenju pa je za faktor ojačenja manjša. TIA, ki se uporabljajo v lidarskih aplikacijah, imajo ojačenje tipično v velikostnem razredu med 10^4 in 10^5 , zato je potrebno uporabiti izjemno kakovosten operacijski ojačevalnik. S tem razlogom je včasih uporaba SiPM primernejša, saj za odčitavanje signala ne potrebuje TIA, pasovna širina pa je zato znatno večja.

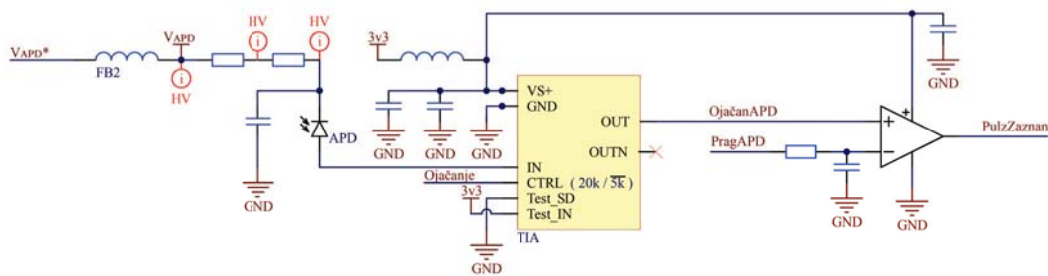
Poleg omejitev pasovne širine moramo paziti tudi na nasičenje. Razpon izhodne napetosti ojačevalnika je omejen z napajalno napetostjo, kar pomeni, da lahko do nasičenja pride že zaradi okoliške svetlobe. S tem razlogom je včasih primerno AC sklopitanje signala iz fotodiode. V tem primeru je potrebno izhod fotodiode na TIA povezati preko kondenzatorja. Ker tudi DC komponenta signala potrebuje ponor, se izhod fotodiode še preko upora veže na ničelni potencial. DC ter AC vezavi fotodiode in ojačevalnika sta prikazani na sliki 3.12. TIA je prikazan v poenostavljeni obliki.



Slika 3.12: Transimpedančni ojačevalnik s fotodiode v DC vezavi (levo) in AC vezavi (desno).

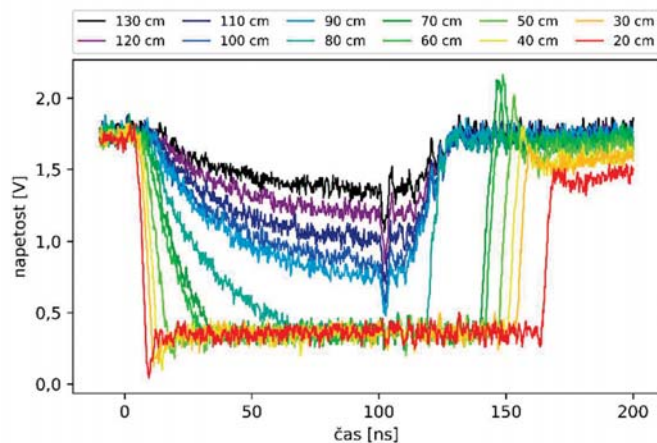
AC vezava je uporabna za izločanje ambiente svetlobe, kar pa gre na račun manjše občutljivosti in večjega mrtvega časa po nasičenju [93]. Občutljivost se zmanjša, ker del toka namesto v TIA teče skozi dodatni upor, mrtvi čas pred ponovno detekcijo pa se poveča, ker mora TIA izprazniti AC sklopitveni kondenzator. Ta mora biti čim večji, da se signal iz fotodiode čim manj popači, hkrati pa mora biti tudi čim manjši, da se čim hitreje izprazni. Zahtevi si nasprotujeta, zato je pri načrtovanju vezja potrebno sprejeti kompromis. Mrtvi čas je odvisen od amplitude tokovnega signala, velikosti kondenzatorja, ter ojačenja TIA. Traja lahko tudi več mikrosekund. Nekaj mrtvega časa je prisotnega tudi pri DC vezavi, je pa ta mnogo manjši kot pri AC. Glavna slabost DC sklopljene fotodiode je zmanjšano dinamično območje ob prisotnosti zunanje svetlobe. Problem se lahko rešuje z uporabo dodatnega vezja za izločanje DC komponente. Takšno vezje na račun povečane kompleksnosti združuje prednosti AC in DC sklopljene fotodiode. Nekateri moderni ojačevalniki v istem ohišju združujejo to vezje in TIA, kar znatno poenostavi izdelavo svetlobnega sprejemnika.

Naš sistem je bil razvit za uporabo v zaprtem prostoru z minimalno prisotnostjo naravne svetlobe in posledično zelo majhno pričakovano količino okoliške svetlobe v IR spektru. Zato smo se odločili za preprosto vezje z DC sklopljeno fotodiodo in IR prepustnim svetlobnim filtrom. Shema vezja je prikazana na sliki 3.13.



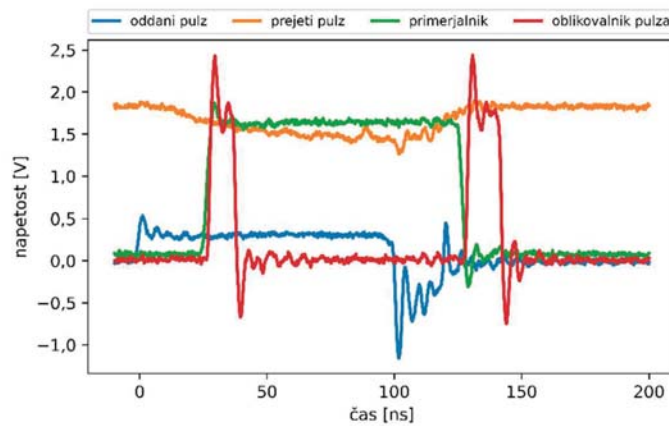
Slika 3.13: Shema vezja na sprejemniku.

APD je napajana s 140 V reverzne napetosti. Za filtriranje šuma na napajalni liniji in omejevanje toka v primeru odpovedi je dioda na napajalnik vezana preko upora in stabilizirana z ločilnim kondenzatorjem. Signal iz APD je ojačen z diskretnim TIA, OPA857 proizvajalca Texas Instruments z ojačenjem signala 20 kV/A. V temi je izhod TIA na visokem nivoju, ob prisotnosti svetlobe pa napetost pade. Primeri oblike svetlobnega pulza za TIA pri različnih oddaljenostih tarče so prikazani na sliki 3.14. Meritve so bile zajete na črni tarči, da je razlika izrazita že na majhnem merilnem območju. Analogni signal se diskretizira s primerjalnikom na enak način kot signal na oddajniku.



Slika 3.14: Primeri oblike svetlobnega pulza za TIA pri različnih oddaljenostih tarče.

Uporabljeni TDC lahko znotraj ene meritve merijo čas le do naraščajoče ali padajoče fronte signala. Na satelitih je diskretizirani signal zato povezan na dva ločena TDC. Prvi meri čas do pozitivne fronte, drugi pa do negativne fronte signala. Namesto uporabe več TDC, se lahko pulz iz primerjalnika pretvori v dva diskretna pulza z uporabo XOR oblikovalnika pulza. Ta je v osnovi enak kot za oblikovanje krmilnega signala za proženje laserja, le upor in kondenzator sta izbrana tako, da nastanejo krajši pulzi. Ta pristop je bil uporabljen v monolitnem lidarju. Oblike sprejemnega signala za TIA, za prvim primerjalnikom in za oblikovalnikom pulza so prikazane na sliki 3.15.



Slika 3.15: Oblike signalov na oddajniku ter sprejemniku, za primerjalnikom in za oblikovalnikom pulza.

3.6 Merjenje časa preleta in določanje razdalje

Določanje razdalje na podlagi časa preleta svetlobe je navidezno trivialen proces. Pri poznani hitrosti širjenja svetlobe skozi medij (c) je oddaljenost tarče (d) odvisna le od časa preleta (t), kot je opisano v enačbi (3.10).

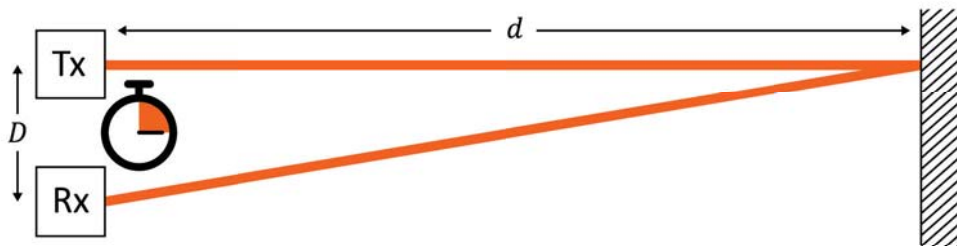
$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3.10)$$

Kadar je optična pot svetlobe zastavljena tako, da oddajnik in sprejemnik navidezno sovpadata, je ta enačba za izračun razdalje točna. Ustrezna je tudi za situacije, ko je razdalja do tarče mnogo večja od razdalje med oddajnikom in sprejemnikom. V nasprotnem primeru je potrebno

upoštevati dejansko pot svetlobe (l). Ta je odvisna od oddaljenosti tarče in razdalje med oddajnikom in sprejemnikom (D), kot opisuje enačba (3.11). Točen izračun razdalje opisuje enačba (3.12), veličine pa so ilustrirane na sliki 3.16. V primeru, da je razdalja med oddajnikom in sprejemnikom zanemarljiva, sta enačbi (3.10) in (3.12) identični, kar pa se zgodi zelo hitro. Že v primeru, da je razdalja do tarče le desetkrat večja od razdalje med oddajnikom in sprejemnikom, je dejanska svetlobna pot le pol procenta večja od poenostavljene. Doprinos napake zaradi poenostavitve je dovolj majhen, da ga lahko za naše potrebe zanemarimo. Vse meritve smo izvajali na razdalji 100 mm ali več, kar pri 20 mm razmaka med oddajnikom in sprejemnikom privede do malenkost več kot 1 mm napake zaradi uporabe poenostavljenega izračuna.

$$l = d + \sqrt{d^2 + D^2} \quad (3.11)$$

$$d = \frac{c \cdot t}{2} - \frac{D^2}{2 \cdot c \cdot t} \quad (3.12)$$



Slika 3.16: Shematski prikaz dejanske poti svetlobe med oddajnikom (Tx), tarčo in sprejemnikom (Rx).

Iz enačbe (3.10) je razvidno, da je za milimetrsko natančnost meritve potrebno zagotoviti merjenje časa z ločljivostjo vsaj 6,7 ps. To je zelo velik tehnološki izziv, ki pa je bil v stanju tehnike presežen za več kot cel red velikosti [94]. Pri izdelavi lidarja lahko za direktno meritev časa preleta uporabimo diskretni TDC, ali pa ga implementiramo v programabilnem vezju (ang. Field Programmable Gate Array, FPGA). Različni TDC se razlikujejo predvsem v natančnosti,

točnosti, po merilnim razponu, številu zaporednih meritev in po mrtvem času med posameznimi meritvami. Namesto uporabe TDC se lahko signal z visoko vzorčno frekvenco vzorči z analogno digitalnim pretvornikom (ADC) [95]. Napram prejšnjemu, je ta pristop mnogo dražji in procesno bolj zahteven, vseeno pa ima svoje prednosti, saj omogoča bolj prefinjeno nadaljnjo obdelavo signala.

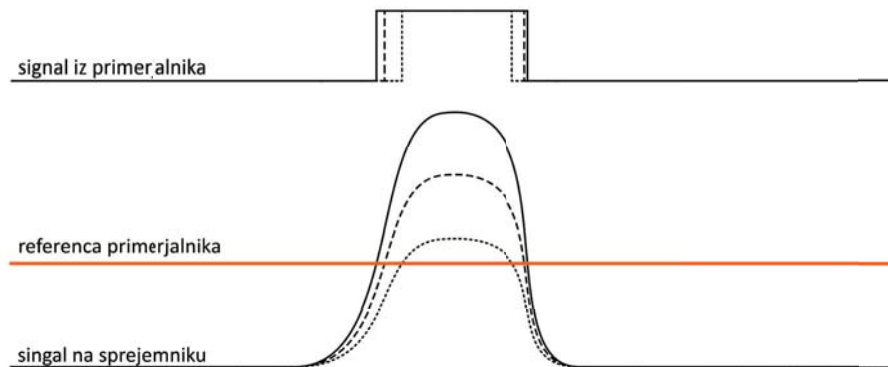
V času načrtovanja in izdelave lidarja smo imeli dostop do programske opreme za implementacijo TDC v FPGA z ločljivostjo 11 ps [96], a smo z željo po bolj kompaktnem vezju uporabili diskretni TDC7200 proizvajalca Texas Instruments. Ta nudi ločljivost 55 ps (8 mm) s standardno deviacijo meritev 35 ps (5 mm). Za večjo zanesljivost meritev se TDC redno kalibrira s pomočjo zunanega kristalnega oscilatorja, ki mora biti za zagotavljanje točnih meritev čim bolj stabilen. V satelitih smo namesto TDC7200 uporabili TDC7201, ki v istem ohišju združuje dva ločena enaka TDC.

3.6.1 Hod meritve

Pri merjenju časa med v celoti diskretnimi signali, večjih problemov ni. V primeru merjenja diskretiziranih analognih signalov z variabilno amplitudo pa lahko v procesu diskretizacije pride do časovnega zamika. Analogni signal iz oddajnika ter sprejemnika se diskretizira z uporabo analognega primerjalnika. Med nastopom pulza in trenutkom, ko signal prečka pragovno vrednost, pride do zakasnitve, ki je odvisna od strmine in amplitude signala. Pojav imenujemo hod meritve (ang. walk error) in je ilustriran na sliki 3.17.

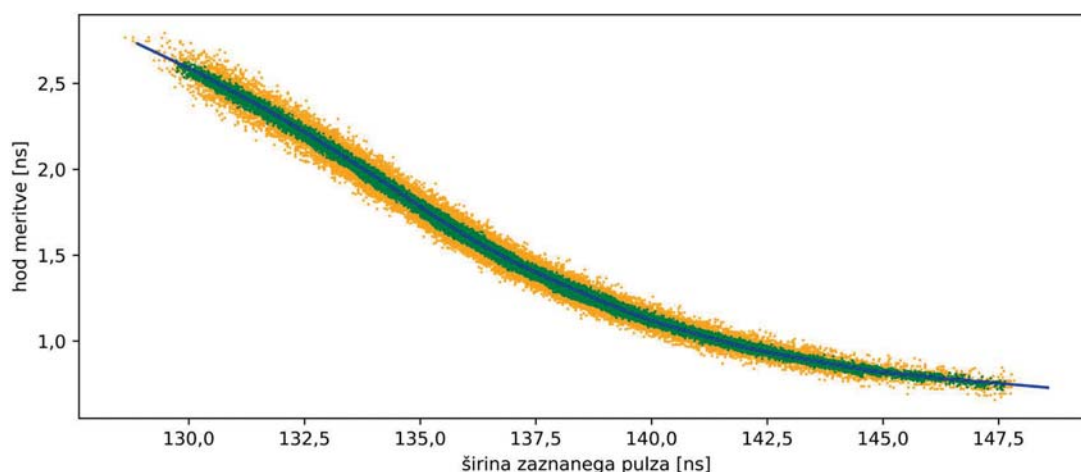
S hodom meritve se lahko soočamo na več načinov. Pri oddaji svetlobnega pulza z večjo strmino je hod meritve manj izrazit. Za signal z dvižnim časom, manjšim od ločljivosti TDC, hod meritve ni relevanten. Ker je tak oddajnik težko izdelati, hod meritve pogosto raje kompenziramo.

Hod meritve je sistemski pogrešek. Pri korekciji se tipično sklicujemo na dvižni čas signala [97], obliko pulza [98], ali trajanje, ko je signal nad pragovno vrednostjo [99]. Slednje smo uporabili v našem lidarju. Na monolitskem sistemu smo signal iz primerjalnika pretvorili v par pulzov, enega za pozitivno in enega za negativno fronto, ter razmak med njima izmerili z istim TDC, na modularnem sistemu pa smo čas do pozitivne in negativne fronte signala iz primerjalnika izmerili z dvema ločenima TDC v istem čipu.



Slika 3.17: Vpliv amplitude prejetega pulza na čas in širino zaznanega pulza.

Kompensacijski profil za odpravljanje hoda meritve smo pridobili na namenskem merilnem sistemu. Na množici znanih razdalj od 200 mm do 1000 mm med lidarjem in tarčo s spreminjajočim albedom smo zajemali meritve časa preleta in širine zaznanega pulza. Hod meritve, ki je razlika med pričakovano in izmerjeno razdaljo, v odvisnosti od širine zaznanega pulza zaseda obliko zvezne funkcije. To smo opisali z odsekoma linearno funkcijo in jo uporabili za kompenzacijo hoda. Za pridobitev točne meritve, je posamezni meritvi časa potrebno le odšteti vrednost kompenzacijske funkcije pri izmerjeni širini pulza. Primer odvisnosti hoda meritve od širine pulza ter pripadajoče odsekoma linearne kompenzacijske funkcije je prikazan na sliki 3.18.



Slika 3.18: Hod meritve v odvisnosti od zaznane širine pulza za surove meritve (rumeno) in tekoče povprečje osmih meritev (zeleno) ter odsekoma linearne kompenzacijske funkcije (modro).

Poleg tega, da je lahko širina zaznanega pulza manjša od širine oddanega svetlobnega pulza, je lahko tudi večja. Do tega pride zaradi nasičenja sprejemnega vezja. Pojav je bolj izrazit pri večjih amplitudah zaznane svetlobe. To večja mrtvi čas, ki mora preteči med posameznimi pulzi, hkrati pa tudi večja razpon izmerjenih širin svetlobnega pulza in s tem izboljša kompenzacijski profil.

Kompenzacijski profil zagotavlja točno meritev ne glede na barvo in oddaljenost tarče, a je uporaben le za eno konfiguracijo lidarja. Spreminjanje sistemskih parametrov, ki vplivajo na širino ali obliko oddanega ali prejetega pulza, lahko znatno pokvari zanesljivost meritev. Del negotovosti izhaja iz deviacij med komponentami, del iz odstopanj napajalnih napetosti, del pa tudi iz temperaturnih nihanj. V izogib potrebi po karakterizaciji sistema na širšem temperaturnem razponu, smo vse meritve izvajali v klimatiziranem prostoru, pred meritvijo kompenzacijske krivulje in zbiranjem meritev pa smo počakali, da je temperatura vezja dosegla ravnovesje.

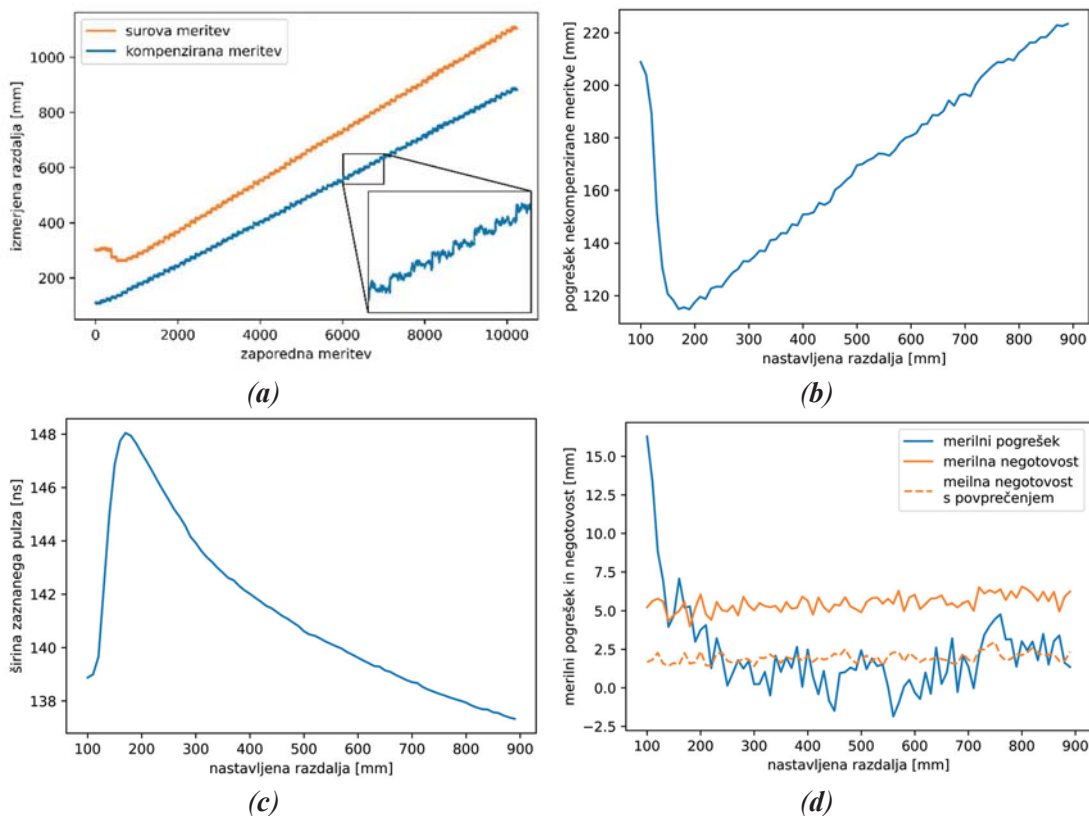
Ker se že majhen časovni zamik pozna v znatni napaki meritve razdalje si lahko pomagamo s sprotnim odpravljanjem napake na podlagi periodičnih meritev na referenčni razdalji. To je še zlasti praktično pri skenirajočih lidarjih, ki meritve izvajajo le v omejenem kotu, izven njega pa imajo nekaj prostora za kalibracijo [100]. V našem primeru avtomatske korekcije niso bile mogoče, zato smo se lahko posluževali le ročnega preverjanja in korigiranja napake med posameznimi sklopi meritev.

Pomen kompenzacije hoda meritev lahko vidimo s primerjavo surovih in kompenziranih meritev. Te so za monolitski ladarski sistem prikazane na sliki 3.19a. Z oranžno je prikazana surova, z modro pa kompenzirana meritev. Poleg konstantnega zamika, ki bi ga lahko odpravili z linearnim prištevanjem korekcije, opazimo tudi razliko med naklonoma surovih in kompenziranih meritev. Pogrešek meritve v odvisnosti od nastavljene razdalje je prikazan na sliki 3.19b.

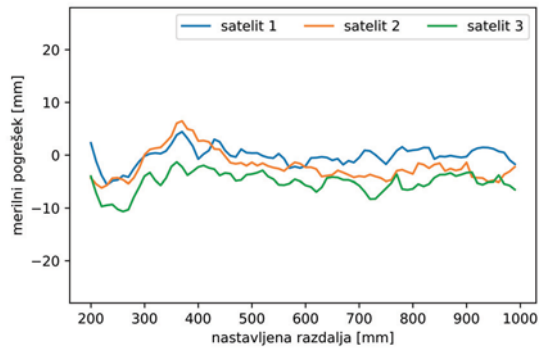
Po začetnem padcu pogreška, ta konstantno narašča. Če pogrešek surovih meritev primerjamo s pripadajočo širino zaznanega pulza, prikazano na sliki 3.19c, vidimo, da ključne točke na obeh grafih sovpadajo. Z oddaljevanjem tarče, je amplituda svetlobnega pulza, ki doseže lidar čedalje manjša, zaradi česar se s povečevanjem razdalje širina pulza manjša. Ta trditev na začetku merilnega območja ne drži, saj delno mrtvo območje lidarja sega do približno 17 cm od naprave. Tu se z oddaljevanjem tarče v vidno polje sklaplja čedalje več svetlobe, zato je trend ravno obraten.

Iz grafa kompenzacijske funkcije na sliki 3.18 je razvidno, da je korekcija hoda meritve pri širšem zaznanem pulzu manjša, kar sovпада s pričakovanji na podlagi grafov na slikah 3.19b ter 3.19c. Pogrešek kompenzirane meritve je z modro prikazan na sliki 3.19d. Na istem grafu je s polno oranžno črto prikazana še standardna deviacija meritev, prekinjena oranžna črta pa prikazuje standardno deviacijo meritev ob uporabi tekočega povprečja osmih vzorcev.

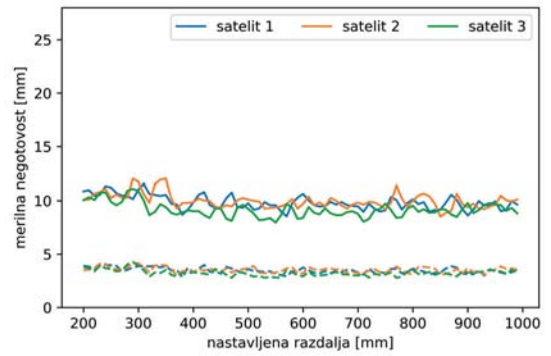
Poleg karakteristike monolitskega lidarskega sistema je na sliki 3.2 podana tudi karakteristika modularnega lidarskega sistema. Tega smo v konfiguraciji s tremi sateliti uporabili za analizo vplivov sosednjih svetlobnih poti, zato so podane karakteristike za vse tri uporabljene kanale. Merilni pogrešek v odvisnosti od nastavljene razdalje je prikazan na sliki 3.2a, na sliki 3.2b pa so prikazane standardne deviacije meritev. Polna črta prikazuje standardno deviacijo posameznih meritev, črtkana črta pa standardno deviacijo meritev filtriranih s tekočim povprečjem osmih vzorcev. Kot demonstrirano, se lahko s povprečenjem več pulzov znatno izboljša merilna negotovost.



Slika 3.19: (a) primerjava med surovo in kompenzirano meritvijo razdalje na množici meritev pri naraščajoči nastavljeni razdalji, (b) merilni pogrešek surove meritve v odvisnosti od nastavljene razdalje, (c) širina zaznanega pulza v odvisnosti od nastavljene razdalje ter (d) merilni pogrešek in standardna deviacija kompenziranih meritev v odvisnosti od nastavljene razdalje.



(a)

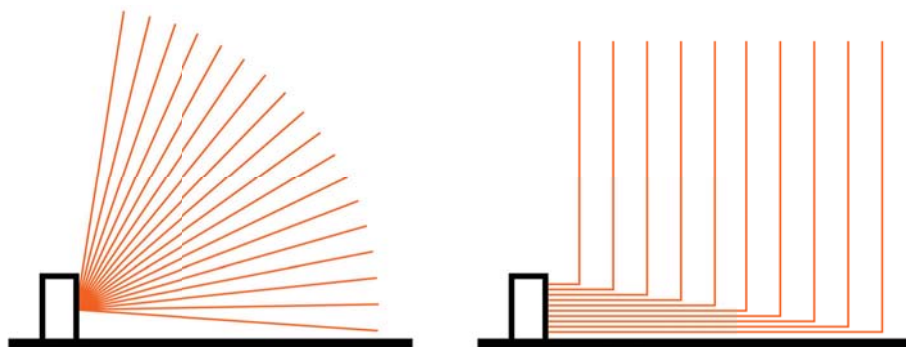


(b)

Slika 3.20: (a) merilni pogrešek v odvisnosti od nastavljene razdalje ter (b) standardna deviacija meritev v odvisnosti od nastavljene razdalje.

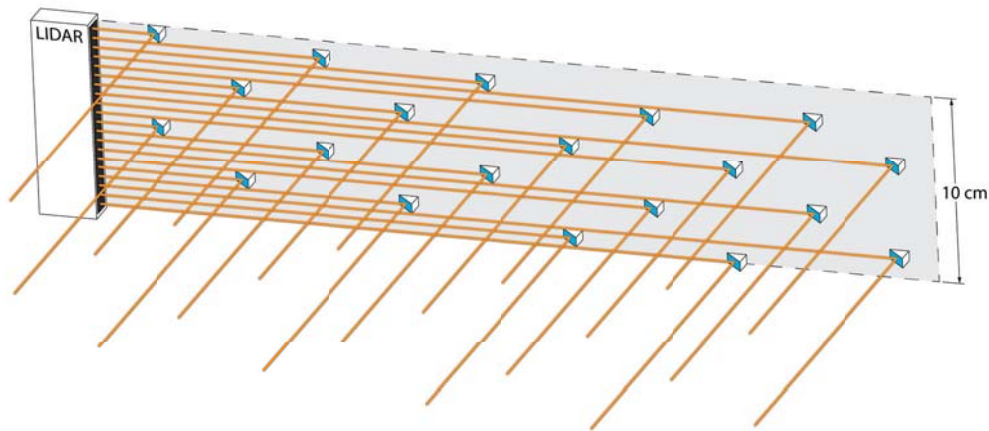
4 Evalvacija lidarskega sistema s preusmerjenimi vidnimi polji

Lidar z enim oddajnikom in enim sprejemnikom je sposoben določanja le ene razdalje. Za določanje več razdalj, lahko svetlobo in s tem vidno polje preusmerjamo s pomočjo gibljivih odklonskih elementov, kot so zrcala [71] ali prizme znotraj naprave [101], [102], [103]. S tem dosežemo razširitev vidnega polja, ki pa ima za vse meritve enak izvor. Ta pristop je občutljiv na zakrivanje vidnega polja saj že majhna ovira v bližini lidarja zakrije znaten delež nadzorovanega območja. Kot alternativo vidimo lidarski sistem, ki množico vidnih polj vzdolž nadzorovanega segmenta razporedi z uporabo statičnih odklonskih elementov. Primerjava vidnega polja skenirajočega lidarja ter lidarja s statično razporejenimi vidnimi polji je shematsko prikazana na sliki 4.1. Na njej so z oranžno barvo prikazani posamezni svetlobni žarki. Za večjo jasnost na sliki odklonski elementi niso prikazani.



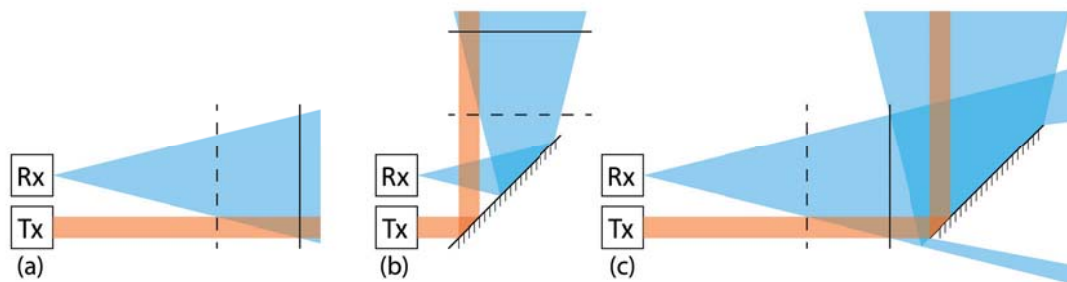
Slika 4.1: Primerjava vidnega polja skenirajočega lidarja (levo) ter lidarja s statično razporejenimi vidnimi polji (desno).

Ena od možnih implementacij predlaganega sistema je ilustrirana na sliki 4.2. V predstavljeni ideji so vidna polja iz centralnega lidarskega sistema preusmerjena s pomočjo zrcal, ki so na skupno podlago pritrjena pod kotom 45° glede na vpadno svetlobo. Kot prikazano, je s 5 mm širokimi zrcal mogoče s 5 cm trikotno mrežo pokriti pas širine 10 cm in dolžine približno 45 cm. Optične osi posameznih vidnih polj so označena z oranžno barvo.



Slika 4.2: Ilustracija primera implementacije lidarja z več vidnimi polji, ki so preusmerjena s statičnimi zrcali.

Preusmerjanje svetlobe znotraj lidarjevega mrtvega polja in izven njega sta ključno različna, saj parazitni odboji znotraj mrtvega polja ne vplivajo na meritev, pri preusmerjanju vidnega polja izven mrtvega polja, pa lahko pride do nepričakovanih vplivov. Primerjava vidnega polja v različnih konfiguracijah je ilustrišana na sliki 4.3. Direktna meritev je prikazana na sliki 4.3a, na sliki 4.3b je meritev s preusmerjanjem vidnega polja z zrcalom v mrtvem polju, slika 4.3c pa prikazuje meritev s preusmerjanjem vidnega polja z zrcalom izven mrtvega polja lidarja.



Slika 4.3: Ilustracija vidnega polja lidarja pri (a) direktni meritvi, (b) meritvi s preusmerjanjem vidnega polja z zrcalom v mrtvem polju ter (c) meritvi s preusmerjanjem vidnega polja z zrcalom izven mrtvega polja lidarja.

V stanju tehnike preusmerjanje vidnega polja lidarja ni v celoti nov koncept. Poznanih je več primerov, kjer je bilo vidno polje skenirajočega lidarja razširjeno s pomočjo zrcal [55], [56], [57]. Ogledala so bila uporabljena tudi za rekonstrukcijo 3D objekta iz vseh strani z uporabo ene same stacionarne globinske kamere [58]. V našem delu se posvečamo preučevanju pojavov, ki nastopijo pri preusmerjanju vidnega polja s pomočjo zrcal. Raziskavo smo razdelili na dva

dela. V prvem se ukvarjamo z vplivom nečistoč na zrcalih, v drugem pa se osredotočamo na medsebojne vplive sosednjih kanalov.

4.1 Vpliv nečistoč na odklonskem elementu

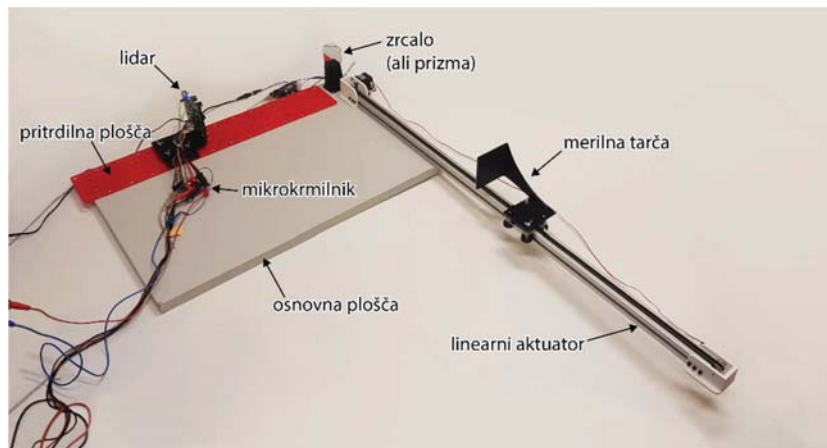
V sklopu te raziskave smo preverili delovanje lidarja s preusmerjenim vidnim poljem. Sočasno smo pod pravim kotom preusmerili tako oddano, kot tudi odbito svetlobo. Preizkusili smo preusmerjanje s klasičnim zrcalom, z zrcalom z odbojem na sprednji površini ter s prizmo na različnih razdaljah med lidarjem in elementom za preusmerjanje vidnega polja. Preizkusili smo delovanje s čistimi in zaprašenimi optičnimi elementi. Ugotovitve kažejo, da med klasičnim zrcalom in zrcalom z odbojem na sprednji strani ni znatnih razlik. Prav tako ni opazne razlike med direktno meritvijo in meritvijo prek čistega zrcala. Pri meritvi preko zaprašenega zrcala pride do negativne napake meritve, ki narašča z večanjem razdalje med lidarjem in zrcalom ter razdalje med zrcalom in tarčo. Napaka je posledica združevanja parazitnega odboja od zaprašenega zrcala in koristnega odboja od tarče, kar razširi pulz svetlobe in pokvari kompenzacijo hoda meritve. Preusmerjanje vidnega polja z uporabo prizme se je izkazalo za v celoti neuporabno. Čeprav smo uporabili prizmo s prevleko za preprečevanje odboja svetlobe, je diskreten odboj od kraka prizme nad določeno razdaljo preglasil odboj od tarče. Raziskava je podrobneje predstavljena v nadaljevanju, zajeta pa je tudi v objavljenem članku [104].

4.1.1 Merilna oprema

Za meritve smo uporabili monolitski lidar, ki je opisan v poglavju 2.3. Za doseganje ponovljivih meritev smo izdelali namensko platformo, ki zagotavlja pravokotni osi ter ponovljive pozicije lidarja ter tarče. Pozicija lidarja je bila v diskretnih korakih nastavljiva ročno, pozicija tarče pa je bila s pomočjo linearnega aktuatorja nastavljiva programsko. Pri meritvah smo poskrbeli, da je vsa svetloba iz lidarja padla pravokotno na tarčo. Ta je bila za doseganje ustreznega merilnega območja bele barve. Za preizkušanje vpliva zrcal in prizem na delovanje lidarja smo uporabili sledeče odklonske elemente:

- klasično zrcalo z aluminijasto prevleko na hrbtni strani stekla, S5003 proizvajalca Duratool,
- aluminijasto zrcalo z odbojem na sprednji strani z zaščitno prevleko, ME2S-G01 proizvajalca Thorlabs, in
- prizmo iz stekla N-BK7 s prevleko za preprečevanje odboja na krakih, PTK4001 proizvajalca Knight Optical.

Prizme brez prevleke za preprečevanje odboja nismo podrobneje preverjali, ker smo na težave naleteli že z uporabo prizme s prevleko. V vsaki konfiguraciji smo zbrali po 128 meritev za vsako nastavljeno razdaljo. Minimalna razdalja med odklonskim elementom in tarčo je bila 5 cm, ta pa se je na razponu 80 cm večala s korakom 1 cm. Minimalna razdalja med lidarjem in odklonskim elementom je bila prav tako 5 cm, večala pa se je s korakom 5 cm. Merilna postavitvev je prikazana na sliki 4.4.



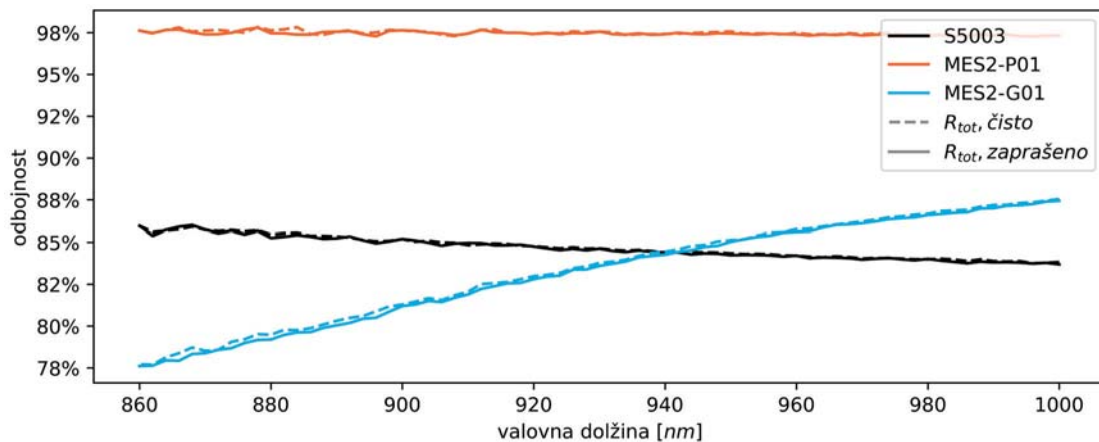
Slika 4.4: Merilna postavitvev za preizkušanje vpliva nečistoč na odklonskem elementu.

Meritve s čistim in zaprašenim odklonskim elementom smo izvedli ne da bi ga med tem premaknili, da bi zagotovili čim bolj primerljive meritve. Pred meritvijo s čistim zrcalom, smo zrcalo očistili z brezprašnimi netkanimi bombažnimi krpicami Handi-Pads proizvajalca Webril, navlaženimi s 100,0 % izopropanolom, proizvajalca VWR chemicals. Ko je izopropanol izhlapel, smo preverili, da se na površini zrcala ne vidi nečistoč ali madežev. Te lahko nastanejo v primeru, da je med čiščenjem površine prišlo do kontaminacije izopropanola z maščobami iz rok ali drugih virov nečistoč.

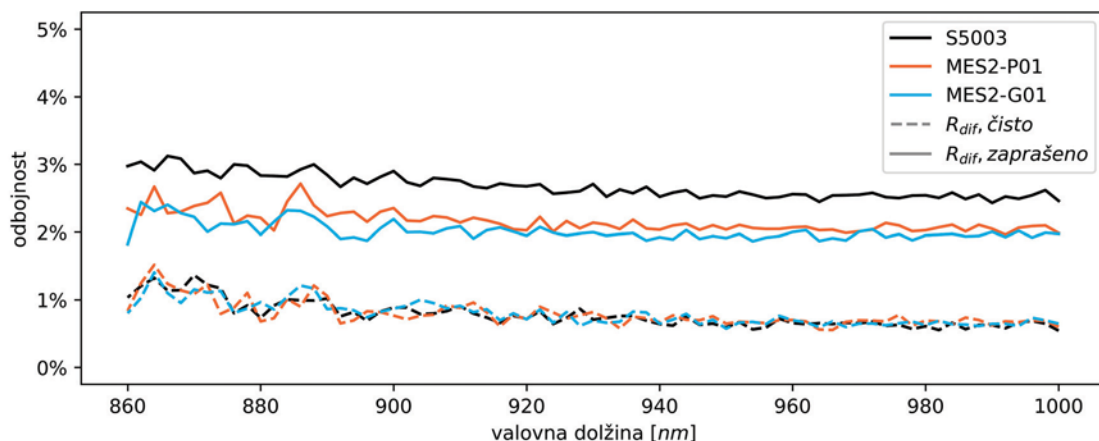
Pri valovni dolžini svetlobe 905 nm, kar oddaja uporabljeni lidar, sta bili totalni odbojnosti zrcal 85 % za klasično zrcalo (S5003) in 81 % za aluminijasto zrcalo z odbojem na sprednji strani (ME2S-G01). Difuzna odbojnost zrcala z nečistočami je znašala med 2 % in 3 %. Analiza totalne odbojnosti (R_{tot}) in difuzne odbojnosti (R_{tot}) na širšem razponu valovnih dolžin je prikazana na slikah 4.5 in 4.6. Poleg uporabljenih zrcal je v meritve vključeno tudi zrcalo ME2S-P01 proizvajalca Thorlabs, ki je bilo uporabljeno v kasnejših eksperimentih. Odbojnosti

so bile izmerjene s spektrometrom LAMBDA 950 proizvajalca PerkinElmer. S polno črto je prikazana odbojnost zaprašenega zrcala, s prekinjeno črto pa odbojnost čistega zrcala.

Skladno s priporočili je bila za meritev odbojnosti širina reže monokromatorja 20 nm, korak valovne dolžine pa 2 nm. Tako kot pri uporabljenem lidarju, je bila tudi ta svetloba nepolarizirana. Meritev odbojnosti je bila izvedena med 860 nm in 1000 nm. Spodnja meja merilnega področja je bila izbrana glede na merilno območje fotoedtektorja za infrardečo svetlobo.



Slika 4.5: Totalna in odbojnost zrcal S5003, MES2-P01 in MES2-G01 v čistem in zaprašenem stanju.

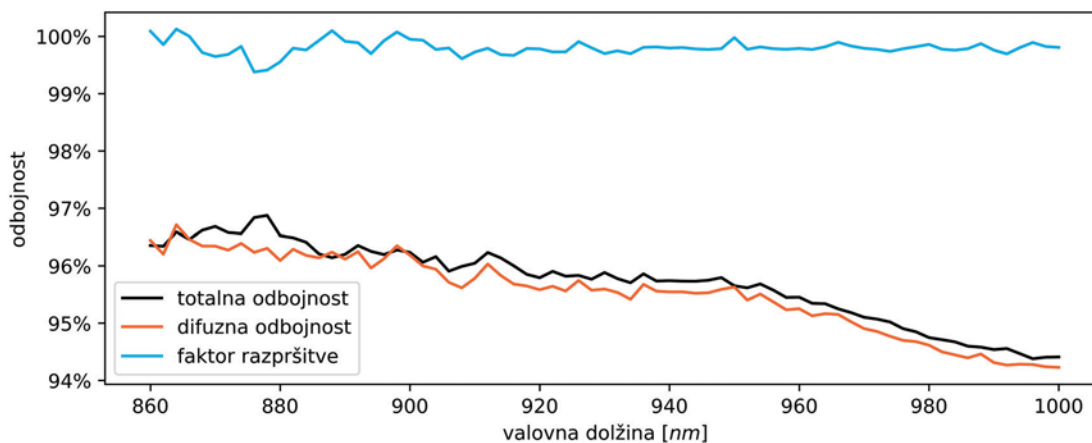


Slika 4.6: Difuzna odbojnost zrcal S5003, MES2-P01 in MES2-G01 v čistem in zaprašenem stanju.

Iz grafov na slikah 4.5 in 4.6 je razvidno, da je totalna odbojnost zrcal v čistem in zaprašenem stanju enaka. Razlike so vidne v difuzni odbojnosti. Za čista zrcala je ta približno 1 %, kar pa

je pod mejo negotovosti uporabljenega instrumenta. Glede na kasnejše eksperimente sklepamo, da je dejanska difuzna odbojnost čistih zrcal mnogo nižja.

Izmerjena je bila tudi odbojnost uporabljene tarče. Ta je prikazana na sliki 4.7. Poleg totalne odbojnosti tarče (črno) in difuzne odbojnosti tarče (oranžno) je na grafu z modro prikazan tudi izračunani faktor razpršitve (H_R). Slednji se izračuna po enačbi (4.1). Iz izračuna je razvidno, da ima tarča difuzen značaj. Povprečen faktor razpršitve na analiziranem svetlobnem spektru je namreč 99,8 %.



Slika 4.7: Totalna odbojnost tarče (črno), difuzna odbojnost tarče (oranžno) ter izračunani faktor razpršitve (modro).

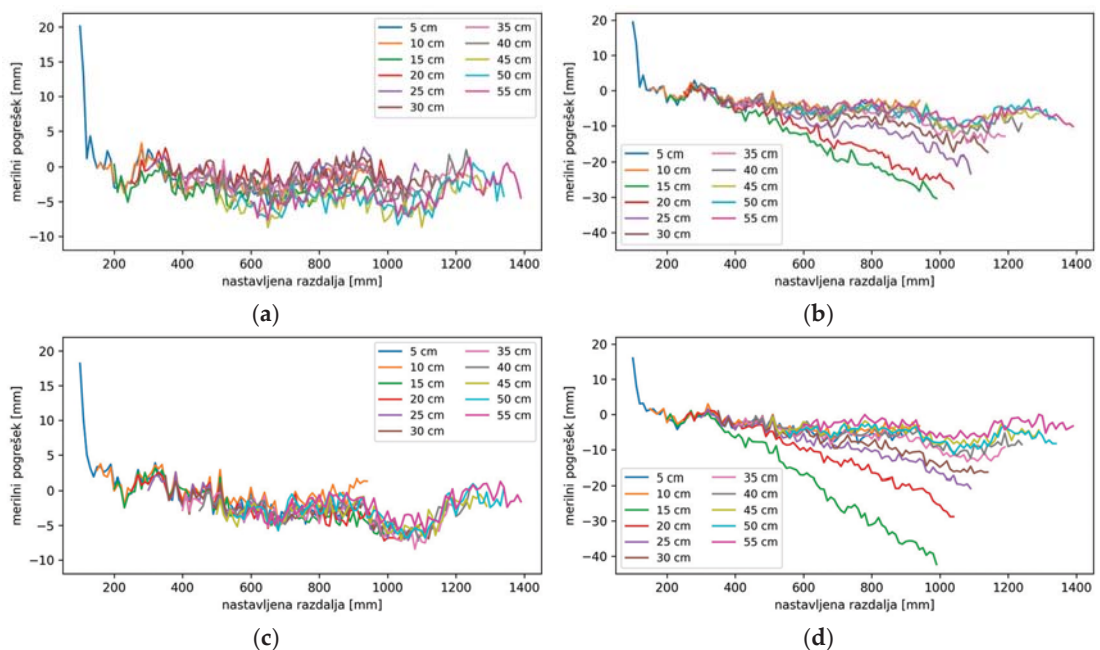
$$H_R(\lambda) = \frac{R_{diff}(\lambda)}{R_{tot}(\lambda)} \quad (4.1)$$

4.1.2 Rezultati

V tem poglavju so zbrani rezultati meritev vpliva zrcal in prizme na meritev. Na grafih so podane povprečne napake meritev v odvisnosti od nastavljene dolžine svetlobne poti med lidarjem in tarčo. Posamezne meritve so predstavljene z različnimi barvami. V legendi so podane minimalne razdalje med elementom za preusmerjanje vidnega polja in lidarjem za posamezen set meritev. Interpretacija meritev se nahaja v naslednjem poglavju.

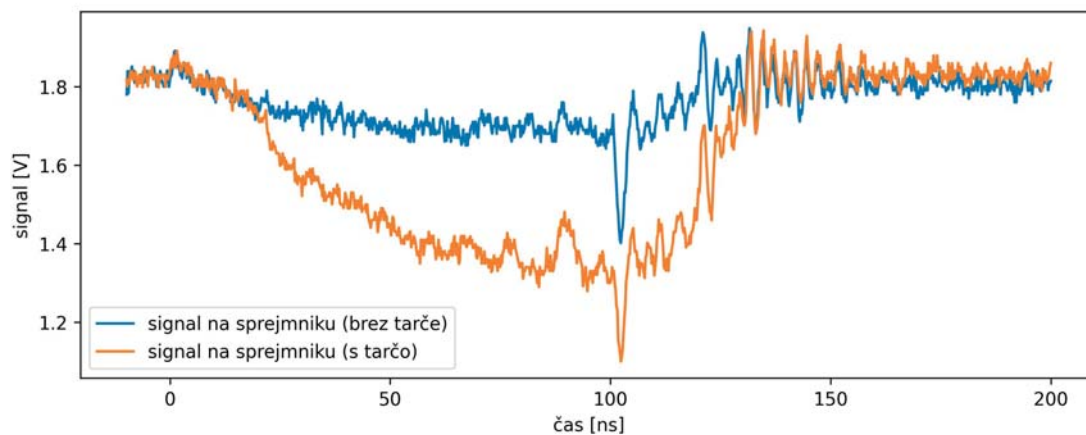
Meritve za preusmerjanje svetlobe z zrcali so prikazane na sliki 4.8. Grafa meritev na čistem in zaprašenem zrcalu z odbojem na sprednji površini sta prikazana na slikah 4.8a in 4.8b, grafa meritev na čistem in zaprašenem klasičnem zrcalu pa sta prikazana na slikah 4.8c in 4.8d.

Na vseh štirih slikah izstopa modra linija, ki pripada meritvi z najmanjšo razdaljo med lidarjem in zrcalom. Znatna pozitivna napaka na začetku merilnega območja sovpada z napako, ki jo na sliki 3.19d opazimo tudi v direktni meritvi razdalje in jo pripisujemo meritvi v delno mrtvem polju. Pojavi se tudi naraščajoča negativna napaka na grafih meritev preko zaprašenega zrcala. Na slikah 4.8c in 4.8d je opazno, da napaka narašča z večanjem razdalje med zrcalom in tarčo, kar še najbolj izraža zelena linija, ki pripada eksperimentu z zrcalom 15 cm od lidarja. V konfiguraciji z zrcalom 10 cm od lidarja ali bližje ta pogrešek ni opazen. Sočasno je opazno tudi, da je napaka bolj izrazita v konfiguracijah, kjer je zrcalo bližje lidarju. Na slikah 4.8c in 4.8d rdeča, vijolična, rjava in rožnata linija izkazujejo čedalje manjši pogrešek napram zeleni. Pri razdalji med lidarjem in zrcalom 40 cm ali več se napake sploh ne opazi.



Slika 4.8: Merilni pogrešek pri merjenju preko zrcala za konfiguracijo s (a) čistim zrcalom z odbojem na sprednji površini, (b) zaprašenim zrcalom z odbojem na sprednji površini, (c) čistim klasičnim zrcalom ter (d) zaprašenim klasičnim zrcalom pri različnih razdaljah med lidarjem in zrcalom.

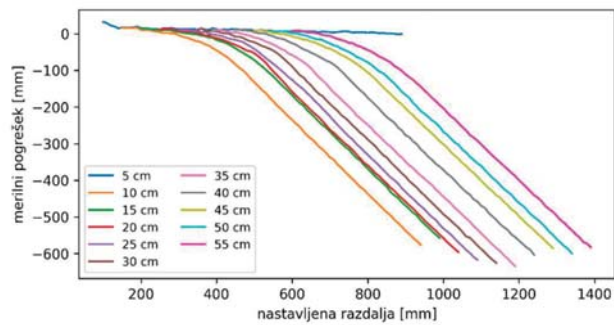
Pri iskanju razlage za nastali merilni pogrešek si lahko pomagamo s posnetkom odbitega svetlobnega signala pri merjenju preko zrcala, ki je prikazan na sliki 4.9. Posnetek je bil zajet na močno zaprašenem zrcalu z vzorčenjem signala za TIA. Z modro je prikazan signal v primeru, ko lidar odboja od tarče ne zazna, z oranžno pa je prikazan signal za šibek odboj od tarče, ki se nahaja približno 4 m od lidarja. V prvem primeru, ko tarče v lidarjevem merilnem območju ni bilo, v signalu odboj svetlobe ne bi smel biti opazen, v praksi pa je prisoten parazitni odboj od zrcala. Ta je delno viden tudi v drugem primeru, in se prišteje signalu odboja od tarče, kot je na grafu prikazano z oranžno črto.



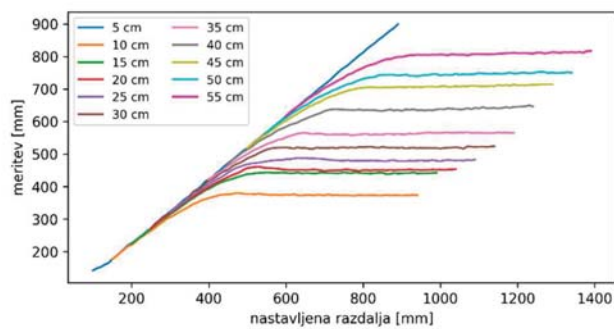
Slika 4.9: Oblika odbitega svetlobnega signala pri merjenju preko močno zaprašenega zrcala z odbojem na sprednji površini. Signal je vzorčen za transimpedančnim ojačevalnikom. Z modro je prikazan signal, ko tarče ni v lidarjevem merilnem območju, z oranžno pa je prikazan signal za tarčo oddaljeno 4 m od lidarja.

Meritve v primeru preusmerjanja svetlobe s prizmo so ključno drugačne od meritev preko zrcal. V tej konfiguraciji so bile meritve mogoče le v primeru s prizmo znotraj mrtvega območja lidarja. Merilni pogrešek pri različnih dolžinah svetlobne poti za različne razdalje med lidarjem in prizmo je prikazan na sliki 4.10a. Vsi seti meritev, razen konfiguracije s prizmo 5 cm od lidarja, izkazujejo izrazito linearno naraščajočo napako. Dejansko dogajanje je bolj jasno razvidno iz grafa meritve v odvisnosti od nastavljene razdalje, ki je prikazan na sliki 4.10b. Tu vidimo, da meritve z izjemo konfiguracije s prizmo 5 cm od lidarja z oddaljevanjem tarče od prizme kmalu dosežejo plato.

Merilna negotovost je bila v vseh konfiguracijah zelo podobna, zato jo namesto v obliki grafov, podajamo kot tabelo maksimalnih standardnih deviacij meritev v posamezni konfiguraciji. Te so zbrane v tabeli 4.1. Podatki za prizmo so podobni ostalim. Hkrati meritve merilnega pogoška pri uporabi prizme kažejo, da za doseganje željenega cilja prizma ni primerna. S tem razlogom podatki za prizmo v tabeli niso navedeni.



(a)



(b)

Slika 4.10: (a) merilni pogošek pri vzorčenju preko prizme in (b) meritve razdalje v odvisnosti od nastavljenе razdalje pri vzorčenju preko prizme.

Tabela 4.1: Maksimalne standardne deviacije meritev po konfiguracijah.

Razdalja med lidarjem in zrcalom [cm]	Maksimalna standardna deviacija meritev [mm]				
	Zrcalo z odbojem od sprednje površine (čisto)	Zrcalo z odbojem od sprednje površine (zaprášeno)	Klasično zrcalo (čisto)	Klasično zrcalo (zaprášeno)	Direktna meritev
/	/	/	/	/	3,0
5	2,8	2,7	2,7	3,7	/
10	2,7	2,7	2,6	2,9	/
15	3,0	3,4	2,9	3,7	/
20	2,8	4,5	2,8	3,3	/
25	3,0	3,5	3,3	2,9	/
30	2,8	3,6	3,2	3,0	/
35	3,8	3,5	3,6	3,4	/
40	3,3	3,4	3,2	3,5	/
45	3,7	3,5	3,8	3,7	/
50	3,5	3,9	3,8	3,9	/
55	3,4	4,1	3,6	3,9	/
Minimum	2,7	2,7	2,6	2,9	3,0
Maksimum	3,8	4,5	3,8	3,9	3,0
Povprečje	3,2	3,5	3,2	3,4	3,0

4.1.3 Diskusija

V tem poglavju se posvečamo interpretaciji meritev, predstavljenih v prejšnjem poglavju. Meritve tudi postavimo v širši kontekst v primerjavi s stanjem tehnike. Začnemo z razlago za naraščajoče negativne napake, ki jo opazimo pri meritvah preko zaprašnih zrcal, nadaljujemo z razlago pojava platoja pri meritvah preko prizme, nato pa se posvetimo razlagi zakaj je bila merilna negotovost v vseh primerih enaka.

Med direktnim merjenjem in merjenjem preko čistih zrcal ni ključnih razlik, kar velja tako za merilne pogreške, kot tudi za merilno negotovost. To je skladno s poročano karakteristiko delovanja lidarjev iz tujih raziskav. Pri preusmerjanju vidnega polja skenirajočega lidarja VLP-16 proizvajalca Velodyne Lidar, so meritve primerljive meritvam, ki so bile z enakim lidarjem poročane pri direktnih meritvah [56], [105].

Bolj zanimive so meritve razdalje v primeru uporabe zaprašnega zrcala. Na grafih merilnega pregreška pri uporabi zaprašnega zrcala z odbojem na sprednji površini in zaprašnega

klasičnega zrcala, ki sta prikazana na slikah 4.8b in 4.8d, opazimo naraščajočo negativno napako. Ta se začne večati pri nastavljeni razdalji približno 400 mm in narašča z oddaljevanjem tarče od zrcala, vendar je pri večjih razdaljah med lidarjem in zrcalom manj izrazita. V najbližjih dveh setih meritev iz slike 4.8, torej ko se zrcalo nahaja 5 cm in 10 cm od lidarja, napaka ni prisotna. Prav tako napake ni opaziti niti v konfiguracijah, kjer je bilo zrcalo postavljeno več kot 40 cm od lidarja.

Razlaga za opaženo napako leži v obliki zaznanega signala, ki je prikazan na sliki 4.9. Del oddanega svetlobnega pulza se obije že od nečistoč na zrcalu. Oblika, časovni zamik in amplituda parazitnega odboja so odvisni od oblike oddanega pulza, oddaljenosti zrcala od lidarja, ter količine nečistoč, od katerih se svetloba odbije. Problem nastopi, ko koristni odboj svetlobe od tarče doseže detektor in se s parazitnim odbojem sešteje v popačen signal. To je tudi jasno vidno na sliki 4.9. Parazitni signal, prikazan z modro, ter skupni signal, prikazan z oranžno, sta prvih 20 ns enaka, kar dokazuje, da gre za seštevanje ločenih odbojev.

To na meritev vpliva na dva načina. Do zaznave pulza pride prej, kot bi prišlo brez parazitnega odboja, hkrati pa se širina pulza poveča. Manjši izmerjeni čas pomeni manjši izmerjeni čas preleta in posledično manjšo izmerjeno razdaljo. Širjenje pulza ima nekoliko manj direkten vpliv, saj gre pri tem za interakcijo s kompenzacijo hoda meritve. V kompenzacijskem profilu sta širina zaznanega pulza in hod meritve inverzno korelirana. Širjenje pulza torej zmanjšuje izmerjeno razdaljo po korekciji hoda meritve. Zmanjševanje izmerjenega časa preleta in širjenje zaznanega pulza na meritev vplivata v nasprotni smeri. Prvi izmerjeno razdaljo krajša, drugi pa daljša. Iz predstavljenih rezultatov je razvidno, da se efekta med seboj ne izničita. Prevlada zmanjševanje izmerjenega časa preleta svetlobe, kar pa še ne razloži, zakaj je pojav prisoten le v nekaterih konfiguracijah in zakaj je amplituda pogreška med posameznimi konfiguracijami različna.

Kot prikazano na sliki 3.1, imajo lidarji tipično določeno mrtvo polje, ki mu sledi delno mrtvo polje. Delno mrtvo polje uporabljenega lidarja sega do 12 cm od naprave. Ko se zrcalo nahaja 5 cm in 10 cm od lidarja, parazitni odboj od nečistoč na zrcalu nastane v mrtvem oziroma delno mrtvem polju in ga sprejemnik sploh ne zazna oziroma zazna le slabo. V nadaljnjih konfiguracijah se je parazitni odboj sklapljal v sprejemnik in zato povzročal napako meritve. Kot je opisano v enačbi (3.7), amplituda odboja pada s kvadratom razdalje. Pri konstantni razdalji med lidarjem in zrcalom je z naraščanjem razdalje med zrcalom in tarčo amplituda parazitnega odboja konstantna, amplituda odboja svetlobe od tarče pa upada s kvadratom

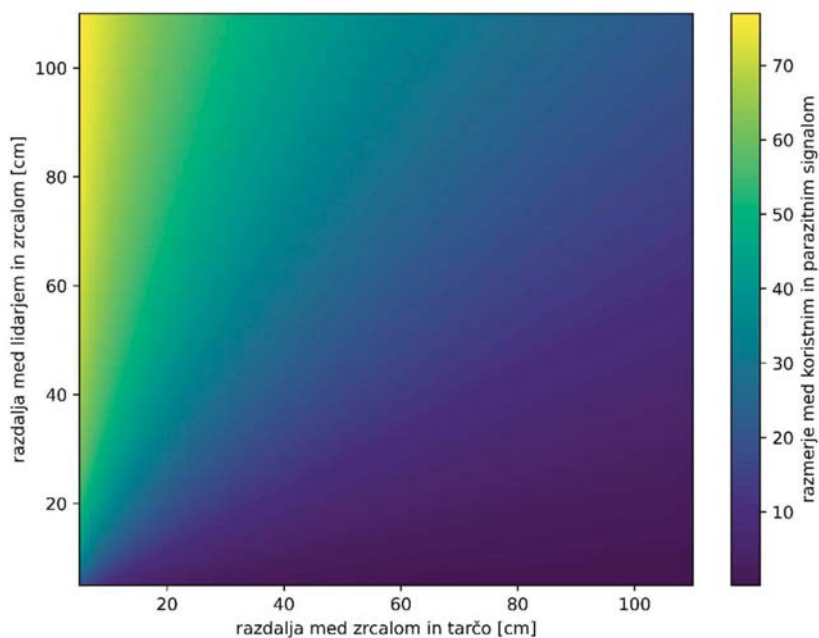
dolžine svetlobne poti. Parazitni odboj s tem dobiva čedalje večji vpliv, kar se opazi kot naraščajoča negativna napaka.

Intenziteta s kvadratom razdalje upada tudi pri parazitnem odboju, le da je tu upoštevana razdalja med lidarjem in zrcalom, ki je manjša. Z večanjem razdalje med lidarjem in zrcalom ima torej parazitni odboj čedalje manjši vpliv. Na razdalji med lidarjem in zrcalom večji od 40 cm, v naši konfiguraciji vpliva parazitnega odboja sploh ne opazimo več. To bi se seveda spremenilo, če bi se od tarče odbilo manj svetlobe, ali pa bi bilo zrcalo bolj zaprašeno in s tem parazitni odboj intenzivnejši.

Razmerje med koristnim in parazitnim signalom lahko izračunamo po enačbi (4.2). V njej P_N in P_T predstavljata relativno amplitudo signala, ki se odbije od nečistoč na zrcalu in od tarče, R_P in R_T sta svetlobni odbojnosti nečistoč in tarče, a in b pa sta razdalja med lidarjem in zrcalom ter med zrcalom in tarčo.

$$P_T/P_N = \frac{(1 - R_N) \cdot R_T}{(a + b)^2} \cdot \frac{R_N}{a^2} \quad (4.2)$$

Primer izračuna razmerja amplitud koristnega in parazitnega odboja ob predpostavki, da je odbojnost svetlobe na zrcalu 1 %, na tarči pa 85 % je za razpon različnih razdalj prikazan na sliki 4.11.



Slika 4.11: Izračun razmerja amplitud koristnega in parazitnega odboja ob predpostavljeni reflektivnosti svetlobe 1 % od nečistoč na zrcalu in 85 % od tarče.

Na sliki 4.11 opazimo enak vzorec, kot smo ga opazili v grafih pogreška pri merjenju preko zaprašnega zrcala. Z večanjem razdalje med zrcalom in tarčo je vpliv nečistoč čedalje večji, z večanjem razdalje med lidarjem in zrcalom pa njihov vpliv upada.

V nasprotju z vzorčenjem preko zrcala, kjer smo v naših eksperimentih celo v najslabšem primeru zaradi nečistoč opazili manj kot pet procentov odstopanja od prave vrednosti, pa se je merjenje razdalje preko prizme izkazalo za nemogoče. Meritve se z večanjem razdalje med prizmo in tarčo hitro odcepijo od prave vrednosti, pri neki razdalji pa celo efektivno dosežejo plato. Izjema je konfiguracija s prizmo 5 cm od lidarja, ker se prizma nahaja v mrtvem polju. Pokvarjene meritve pripisujemo odboju svetlobe pri prehodu med zrakom in stekom.

Navkljub uporabi prizme s premazom za preprečevanjem odboja, se glede na kataloške podatke od kraka prizme odbije približno 0,75 % svetlobe, kar nanese 1,5 %, ko upoštevamo še odboj od drugega kraka. To je petkrat bolje kot v primeru uporabe prizme brez premaza. Pri pravokotnem vpadu svetlobe se v tem primeru namreč odbije približno 4 % svetlobe oziroma 8 %, če upoštevamo še odboj od druge površine. Do te reflektivnosti (R) pridemo z upoštevanjem Fresnelove enačbe (4.3) in upoštevanjem lomnega količnika zraka (n_{zrak}) 1 ter lomnega količnika stekla (n_{steklo}) 1,5. S to oceno ne naredimo veliko napake, saj naš lidar deluje v bližnjem IR spektru, kjer je lomni količnik stekla N-BK7 znotraj enega procenta podane ocene [106].

$$R = \left| \frac{n_{zrak} - n_{steklo}}{n_{zrak} + n_{steklo}} \right|^2 \quad (4.3)$$

Ko svetloba doseže prizmo, se delež te svetlobe odbije proti sprejemniku. Tu ne pride do difuznega odboja, kot se zgodi v primeru, ko se svetloba odbije od nečistoč na površini, temveč se v sprejemnik sklaplja le tisti del svetlobe, ki ga doseže odbita svetloba. Del nje se odbije od prvega, del pa od drugega kraka prizme. Ker odboj ni difuzen, se mu amplituda z večanjem razdalje med lidarjem in prizmo ne manjša, temveč je kvečjemu relativno intenzivnejši, saj se pod manjšim kotom v sprejemnik sklaplja večji del odboja svetlobnega pulza. Amplituda odboja svetlobe od tarče še naprej upada s kvadratom razdalje, poleg tega pa se del odboja še od prizme odbije nazaj proti tarči. Razmerje med amplitudo parazitnega odboja in odboja svetlobe od tarče je torej nadvse neugodno. Iz rezultatov meritev, ki so prikazane na sliki 4.1b

je razvidno, da od neke razdalje naprej parazitni odboj preglasi koristni signal, zaradi česar meritve dosežejo plato.

Merilna negotovost je v vseh konfiguracijah nadvse primerljiva, kot je tudi razvidno iz tabele 4.1. Tako kot že pri direktni meritvi, katere negotovost je prikazana na sliki 3.19d, standardna deviacija meritev le rahlo narašča z večanjem oddaljenosti tarče. Ključnih razlik med posameznimi konfiguracijami z različnimi razdaljami med lidarjem in zrcalom ni opaziti. Ugotovitev ni presenetljiva, saj je negotovost odvisna predvsem od lastnosti TDC in natančnostjo detekcije svetlobnega pulza. Preoblikovanje vidnega polja na delovanje TDC ne vpliva, lahko pa pokvari detekcijo odboja od tarče. Če s preoblikovanjem vidnega polja zmanjšamo količino odbite svetlobe, bo intenziteta pulza manjša in s tem razmerje med signalom in šumom slabše. To poveča standardno deviacijo meritev. Opisani pojav vidimo že z oddaljevanjem tarče, ko intenziteta odbite svetlobe naravno upada. Razen tega z zrcali ne moremo povečati šuma, zato je njihov vpliv na standardno deviacijo meritev minimalen.

Na osnovi predstavljenega lahko zaključimo, da je preusmerjanje vidnega polja lidarja z zrcali možno tako v njegovem mrtvem polju, kot tudi izven njega, uporaba prizme pa je primerna le za preusmerjanje svetlobe v lidarjevem mrtvem polju. Pri tem se je potrebno zavedati izgube moči signala in potencialnih težav zaradi parazitnih odbojev znotraj prizme, kakršne pri oblikovanju oddanega pulza srečamo tudi pri uporabi lečnega sestava. Dokler so zrcala čista, je meritev praktično identična direktni meritvi, težave pa nastopijo, ko se na zrcalih naberejo nečistoče. Tedaj pride do seštevanja odbojev od tarče in nečistoč na zrcalu, kar pokvari meritve. Za praktično uporabo bi bilo potrebno zagotoviti čistost zrcal, ali pa meritve izvajati z izjemno kratkimi svetlobnimi pulzi, kar bi lahko omogočilo razločevanje med koristnim in motilnim signalom. Alternativno bi lahko svetlobno pot oddanega pulza v celoti ločili od vidnega polja sprejemnika. Možne rešitve so podrobneje predstavljene v poglavju 4.3.

4.2 Medsebojni vpliv sosednjih kanalov

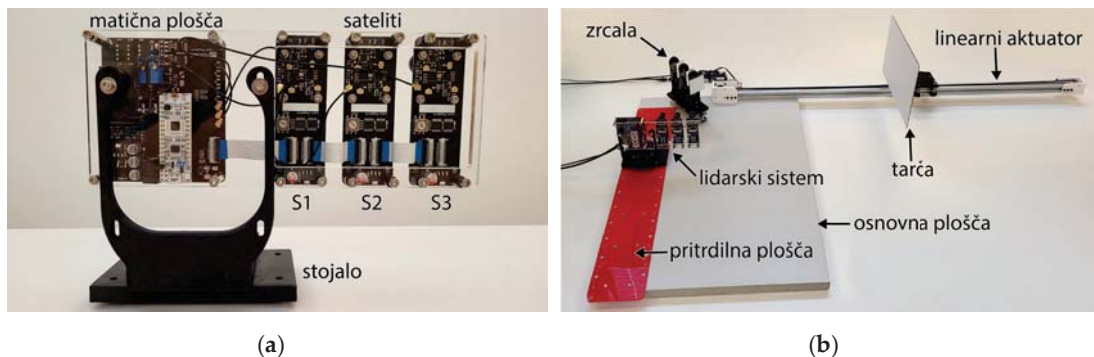
Poleg poznavanja vpliva posameznih zrcal na meritve, je pri razporejanju vidnih polj vzdolž nadzorovane površine pomemben tudi medsebojni vpliv sosednjih svetlobnih kanalov. Da bi jih preučili, smo pri različnih razdaljah med lidarjem in zrcali, različnih razdaljah med zrcali in tarčo ter z različnimi konfiguracijami zrcal na treh sosednjih kanalih zbrali množico meritev razdalje. Rezultati kažejo, da se skozi sosednje kanale vzpostavijo nove svetlobne poti, ki

povzročijo majhno a opazno merilno napako. Raziskava je podrobneje predstavljena v nadaljevanju, ugotovitve pa smo objavili tudi v članku [107].

4.2.1 Merilna oprema

Meritve smo izvajali z modularnim lidarskim sistemom, ki je podrobneje predstavljen v tretjem poglavju. Za namene preizkušanja medsebojnih vplivov sosednjih svetlobnih kanalov smo uporabili tri satelite. Na skupno podlago so bili pritrjeni v 40 mm inkrementih, kot je prikazano na sliki 4.12a. Razmak je bil prilagojen širini posameznih satelitov, ki meri 30 mm, med ploščami pa smo pustili dodatnih 10 mm razdalje, da nismo obremenjevali kablov.

Za zagotavljanje ponovljivosti meritev smo uporabili enako platformo kot v prejšnji analizi. Vidna polja vseh kanalov lidarskega sistema so bila vzporedna in postavljena pravokotno na os premikanja tarče. Zrcala smo postavili na njihova presečišča. Med zbiranjem meritev se je tarča od zrcal avtomatsko s korakom 1 cm odmikala na razponu 80 cm, med posameznimi sklopi pa smo lidarski sistem od zrcal ročno odmikali po 5 cm. Na vsaki razdalji smo zbrali po petsto meritev, ki smo jih uporabili za nadaljnjo obdelavo. Merilna postavitvev je prikazana na sliki 4.12b.



Slika 4.12: (a) na stojalo pritrjen modularni lidarski sistem z matično ploščo in tremi sateliti pritrjenimi na skupno podlago ter (b) merilna postavitvev za meritev s tremi preusmerjenimi vidnimi polji.

Svetlobo smo preusmerjali s čistimi kvadratnimi zrcali s stranico 50,8 mm. To so bila zrcala z odbojem na sprednji strani, MES2-P01 ter MES2-G01, proizvajalca Thorlabs. Pred uporabo so bila očiščena po enakem postopku, kot v prejšnji študiji. Zrcalo smo očistili z brezprašnimi netkanimi bombažnimi krpicami Handi-Pads proizvajalca Webril, navlaženimi s 100,0 % izopropanolom, proizvajalca VWR chemicals. Ko je izopropanol izhlapel, smo preverili, da se

na površini zrcala ne vidi nečistoč ali madežev. Čistočo zrcal smo preverili tudi med vsakim setom meritev.

4.2.2 Rezultati

V tem poglavju so zbrani rezultati analize merilnega pregreška v različnih kombinacijah prisotnih zrcal na različnih kanalih. Za večjo preglednost je ob podatkih označeno, katera zrcala so bila med meritvijo prisotna, in kateremu kanalu pripada prikazana meritev. Oznaka je podana v formatu X-Y, kjer X predstavlja zaporedne številke prisotnih zrcal, Y pa zaporedno številko kanala, ki mu meritve pripadajo. Oznaka 123-1 torej pomeni meritev za prvi kanal, ob prisotnosti vseh treh zrcal. Kadar je relativna lokacija kanala bolj relevantna, se na njih sklicujemo tudi glede na njihovo pozicijo. Pri tem se držimo postavitve, ki je prikazana na sliki 4.12.

Preizkusili smo delovanje v naslednjih konfiguracijah:

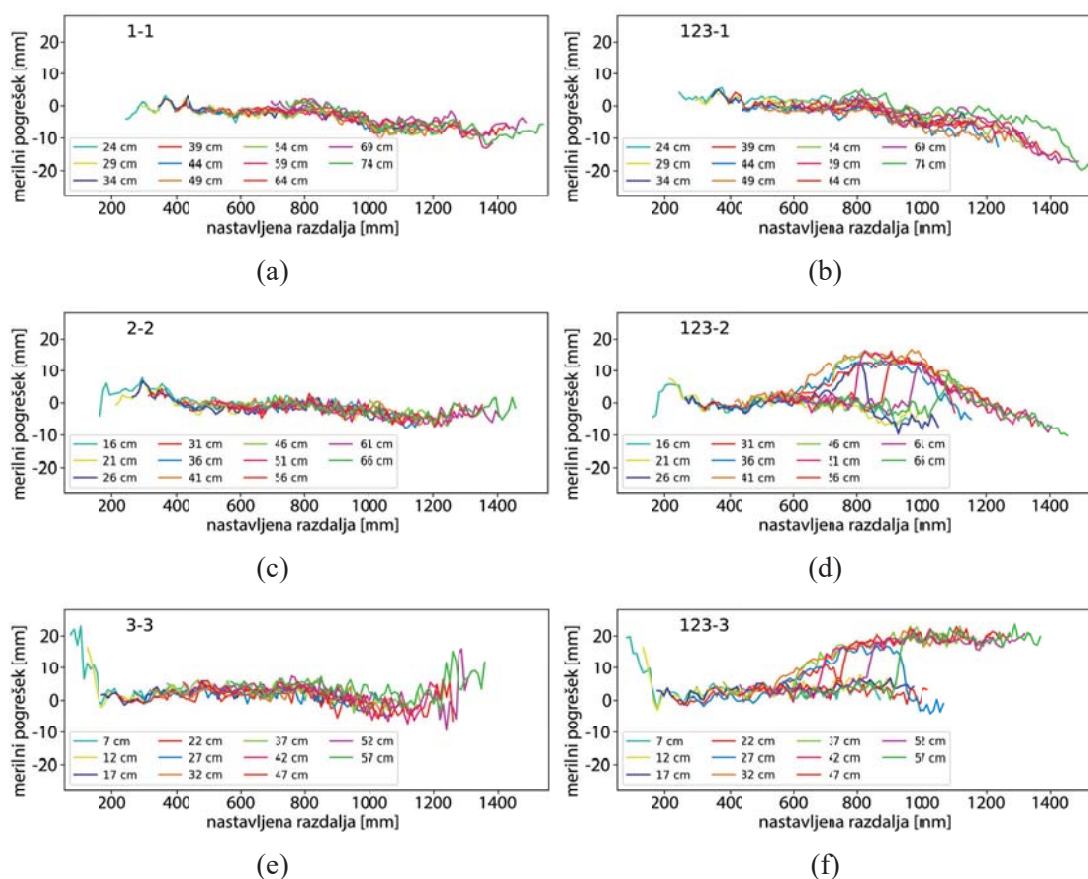
- ko je bilo prisotno le eno zrcalo na vsakem kanalu posamično (konfiguracije 1-1, 2-2 in 3-3),
- v vseh treh možnih parih preusmerjenih vidnih polj (konfiguracije 12-1, 12-2, 13-1, 13-2, 23-2 in 23-3) ter
- sočasno preusmerjanje vseh treh kanalov (konfiguracije 123-1, 123-2 in 123-3).

Podatki so predstavljeni v obliki grafov merilnega pogoška izmerjene razdalje vzdolž dejanske primarne svetlobne poti, ki je vsota razdalj med lidarjem in zrcalom ter med zrcalom in tarčo, v odvisnosti od nastavljene razdalje med lidarjem in tarčo. Meritve razdalje do tarče na izbranem kanalu so za različne startne postavitev lidarja, zrcal in tarče na istem grafu prikazane z različnimi barvami. V legendi so označene glede na minimalno nastavljeno razdaljo med lidarjem in tarčo. Merilne negotovosti ne podajamo, ker smo v prejšnji analizi ugotovili, da dodajanje zrcal nanjo ne vpliva.

Najprej so na slikah 4.13a, 4.13c in 4.13e prikazane meritve pogoška vseh treh kanalov ob prisotnosti le enega zrcala. V sosednjem stolpcu so na slikah 4.13b, 4.13d in 4.13f prikazane iste meritve ob prisotnosti vseh treh zrcal. Sledijo pari meritev v konfiguracijah s prisotnima le dvema zrcaloma. Na sliki 4.14 so prikazani merilni pogoški za konfiguracijo z zrcaloma le na prvih dveh kanalih, na sliki 4.15 za konfiguracijo z zrcali le na drugih dveh kanalih, na sliki 4.16 pa za konfiguracijo z le prvim in tretjim zrcalom.

V konfiguracijah z le enim zrcalom so meritve podobne direktnim, ki so prikazane na sliki 3.2a. Večja odstopanja opazimo le na tretjem kanalu, pri katerem je bila tarča na začetku merilnega razpona še v lidarjevem mrtvem polju. Na istem kanalu čudno obnašanje opazimo tudi proti koncu merilnega razpona, ko se tarča nahaja izven kalibriranega merilnega območja.

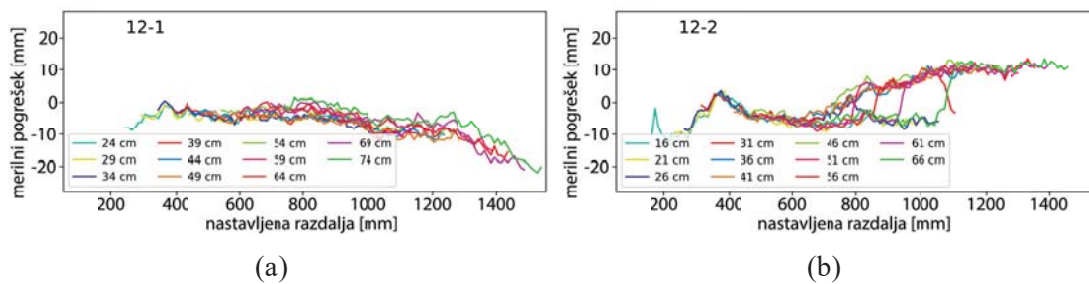
V nasprotju s konfiguracijami z le enim zrcalom, se v konfiguraciji z zrcali na vseh treh kanalih pojavi majhen a opazen merilni pogrešek. Na prvem kanalu opazimo počasen prirast negativne napake, ki je prisoten za vse razdalje med lidarjem in zrcalom. Na drugem kanalu pred nastopom naraščajoče negativne napake za nekatere konfiguracije opazimo prirastek pozitivnega pogreška. Na tretjem kanalu v nekaterih konfiguracijah opazimo pozitivno napako, ki za konfiguraciji z zrcalom 22 cm in 27 cm od neke razdalje dalje ni več prisotna.



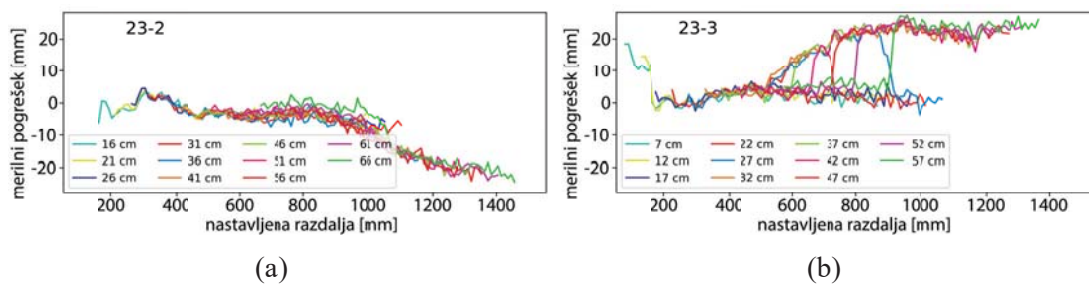
Slika 4.13: Pogrešek meritev (a) prvega kanala ob prisotnosti zrcala le na prvem kanalu, (b) prvega kanala ob prisotnosti vseh treh zrcal, (c) drugega kanala ob prisotnosti le drugega zrcala, (d) drugega kanala ob prisotnosti vseh treh zrcal, (e) tretjega kanala ob prisotnosti le tretjega zrcala ter (f) tretjega kanala ob prisotnosti vseh treh zrcal.

V konfiguraciji z zrcali le na prvem in drugem kanalu, opazimo podoben vzorec. Na prvem kanalu opazimo negativni pogrešek, ki narašča z večanjem nastavljene razdalje, prav tako kot v prejšnjem primeru. Na drugem kanalu pa opazimo enak profil odstopanja, kot na tretjem kanalu z zrcali na vseh treh kanalih. Od neke razdalje naprej je za večje razdalje med lidarjem in zrcalom prisotna pozitivna napaka, ki pa za konfiguraciji z minimalno razdaljo med lidarjem in zrcalom 26 cm in 31 cm po neki razdalji izzveni.

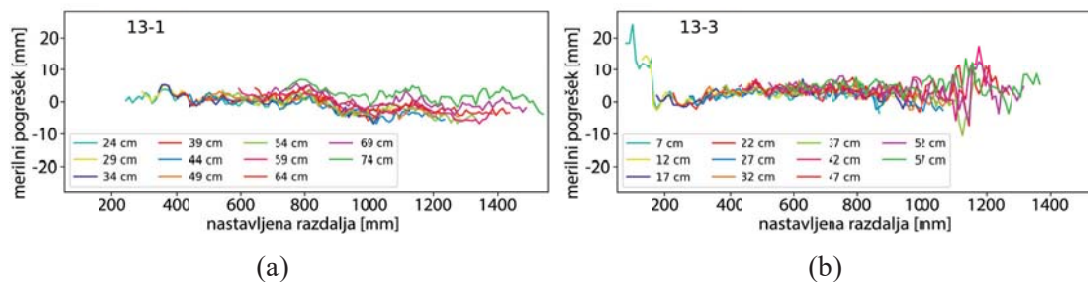
Praktično identična situacija je vidna v konfiguraciji z zrcali le na drugem in tretjem kanalu. Na drugem kanalu vidimo naraščajočo negativno napako, merilni pogrešek tretjega kanala pa je enak meritvam iz konfiguracije z vsemi temi zrcali. V konfiguraciji z zrcali na prvem in tretjem kanalu ni opaziti odstopanj od meritev, ko je bilo sočasno prisotno le eno zrcalo.



Slika 4.14: Pogrešek meritve ob prisotnosti zrcala na prvem in drugem kanalu za (a) prvi kanal in (b) drugi kanal.



Slika 4.15: Pogrešek meritve ob prisotnosti zrcala na drugem in tretjem kanalu za (a) drugi kanal in (b) tretji kanal.



Slika 4.16: Pogrešek meritve ob prisotnosti zrcala na prvem in tretjem kanalu za (a) prvi kanal in (b) tretji kanal.

4.2.3 Diskusija

V tem poglavju so razloženi rezultati meritev, predstavljenih v poglavju 4.2.2. Razlaga je podkrepjena z optično simulacijo. Namesto z zaporedno številko svetlobnega kanala se v tem poglavju na njih sklicujemo glede na njihovo relativno lego, saj se v tem vidi najbolj jasen vzorec. Relativno lego določimo glede na postavitev na sliki 4.12.

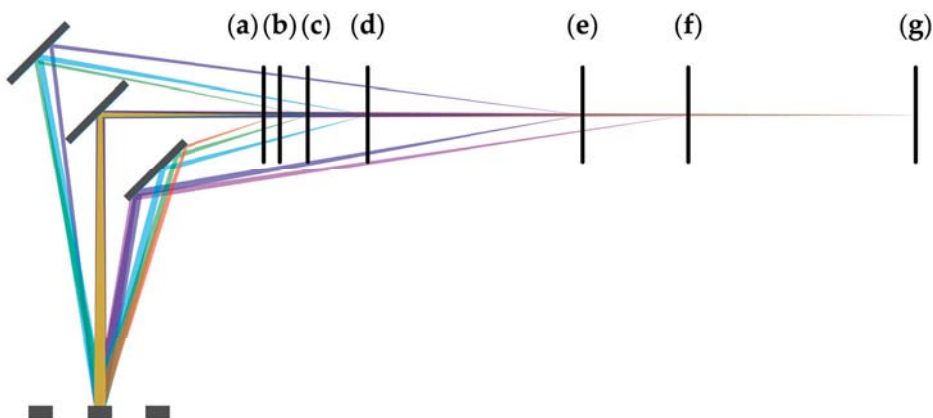
Pri preusmerjanju svetlobe v konfiguracijah, v katerih je bilo prisotno le eno zrcalo, napram direktni meritvi, ni opaziti znatnih odstopanj. To vidimo v levih grafih na sliki 4.13, torej v konfiguracijah 1-1, 2-2 in 3-3. Ker so bila zrcala čista, je to pričakovano in skladno z ugotovitvami naše predhodne študije. V preostalih meritvah lahko opazimo vzorec oblike napak v odvisnosti od prisotnosti zrcala na sosednjih kanalih.

Merilni pogrešek je naraščajoče negativen, kadar je bilo zrcalo prisotno na sosednjem desnem, ne pa tudi na sosednjem levem kanalu. To vidimo na slikah 4.13b, 4.14a in 4.15a, ki prikazujejo podatke za konfiguracije 123-1, 12-1 in 23-2. V obratnem primeru, torej ko je zrcalo prisotno le na sosednjem levem, ne pa tudi na sosednjem desnem kanalu, nastopi pozitivna napaka. Ta za razliko od prejšnje ne izkazuje trenda konstantnega naraščanja, temveč navidezno doseže konstantno vrednost, preden v nekaterih primerih v celoti izgine. Vidimo jo na slikah 4.13f, 4.14b in 4.15b, ki prikazujejo podatke za konfiguracije 123-3, 12-2 in 23-3. V primeru, da je poleg opazovanega kanala z zrcalom preusmerjeno tudi vidno polje obeh sosednjih kanalov, je opažena napaka vsota napak, ki jih opazimo za konfiguracije z zrcalom na le enem sosednjem kanalu. Če je vidno polje z zrcalom preusmerjeno na več kanalih, ki pa niso neposredno sosednji, napake ni opaziti. To vidimo na sliki 4.16, ki prikazuje podatke za konfiguraciji 13-1 in 13-3.

Odsotnost napake pripisujemo omejenemu vidnemu polju sprejemnika lidarja. Kot razloženo v poglavju 3.1.1 in prikazano na sliki 3.3, sprejemnik svetlobo zaznava do kota 10° , s

predpostavko Gaussove razporeditve občutljivosti pa je kot 1σ občutljivosti le $4,7^\circ$. Pri 4 cm razmika med sosednjimi kanali je razdalja med sredino enega zrcala in robom drugega zrcala 6,2 cm. To pomeni, da je odboj svetlobe na sosednjem zrcalu znotraj kota 1σ občutljivosti šele pri 75 cm, pred 33 cm pa odboj sprejemniku sploh ni viden. V izvedenem eksperimentu je bila maksimalna razdalja med lidarjem in katerim koli zrcalom le 74 cm. To pomeni, da je bil odboj od sosednjega zrcala v tem eksperimentu viden le na bolj oddaljenem delu preizkušene območja in še takrat le bežno. V dani konfiguraciji se torej preko sosednjega zrcala sklaplja tako malo svetlobe, da ta, kot je razvidno iz meritev v postavitvah 13-1 in 13-3 na sliki 4.16, nima vidnega vpliva na meritev.

Pri razlagi za opažene merilne pogoške smo si pomagali s preprosto dvodimenzionalno optično simulacijo [108]. Simulirali smo zgolj optične poti pri različnih razdaljah med lidarjem in zrcalom ter med zrcalom in tarčo, tako kot v prej predstavljenem fizičnem eksperimentu. Pri tem smo se osredotočili na odbito svetlobo drugega kanala, torej situacijo, ko sta prisotna tako levi, kot tudi desni sosednji kanal s preusmerjenim vidnim poljem. Odbito svetlobo smo modelirali kot perfektno difuzni odboj, torej točkast vir svetlobe, ki svetlobo oddaja stran od tarče pod kotom 180° . Občutljivosti sprejemnika nismo simulirali. Prav tako nismo upoštevali njegovega omejenega vidnega polja. Izločili smo le direkten odboj od tarče, torej tisto svetlobo, ki do sprejemnika ni prišla preko zrcala. Ilustracija simuliranih svetlobnih poti je prikazana na sliki 4.17. Prikazani so odboji s tarčo postavljeno na različnih razdaljah od zrcala. Razdalje so izbrane tako, da najbolje ilustrirajo različne načine delovanja. Posamezne pozicije tarče so prikazane z navpično črno črto in označene s črkami od (a) do (g). Svetlobne poti, ki pripadajo posamezni tarči, so za vsako pozicijo tarče prikazane z drugo barvo.



Slika 4.17: Ilustracija svetlobnih poti odbite svetlobe pri različnih razdaljah med zrcali in tarčo.

Iz slike 4.17 je takoj razvidno, da so za različne pozicije tarče prisotne različne svetlobne poti odbite svetlobe. V vseh konfiguracijah je prisotna primarna svetlobna pot, torej tista, ki je odbita z zrcalom za preusmerjanje oddane svetlobe na opazovanemu kanalu. Prisotna je že, ko je tarča zelo blizu zrcala (a). Z odmikanjem tarče se vzpostavi svetlobna pot preko desnega zrcala (b). Opazimo, da se vzpostavi na skrajnem desnem robu zrcala, pri nadaljnjem odmikanju tarče pa se točka odboja pomika levo, dokler na neki razdalji ne pade izven zrcala in izgine (f). Opisana svetlobna pot je krajša od primarne svetlobne poti. Odboj se bo torej seštel v pulz, ki ima manjši čas preleta in večjo širino.

Efekt je torej podoben tistemu, ki smo ga opazili pri merjenju preko zaprašenega zrcala. Kot opisano v poglavju 4.1, širjenje pulza manjša kompenzacijo hoda meritve in s tem povečuje izmerjeno razdaljo, manjšanje izmerjenega časa preleta pa manjša meritev razdalje. Drugi efekt je močnejši od prvega, zato je izmerjena razdalja manjša od prave vrednosti. To v meritvah vidimo kot naraščajočo negativno napako, ki je za realne meritve vidna predvsem na slikah 4.13b, 4.14a in 4.15a. Simulacija nakazuje, da bi morala napaka zaradi svetlobne poti preko desnega zrcala pri neki nastavljeni razdalji izginiti, česar pa v naših meritvah ne opazimo. Predvidoma zato, ker pojav nastopi šele izven našega merilnega območja.

Kmalu po nastopu svetlobne poti preko desnega zrcala, se vzpostavi tudi svetlobna pot preko levega zrcala (c). Pred tem njeno vzpostavitvev preprečuje primarno zrcalo. Za razliko od odboja na desnem zrcalu, se točka odboja na levem zrcalu s povečevanjem oddaljenosti tarče pomika proti desni. Na neki razdalji svetlobno pot preko levega zrcala ponovno prekine primarno zrcalo, tokrat s svojo hrbtno stranjo (e).

Opisana svetlobna pot je daljša od primarne. To pomeni, da se odboja seštejeta v pulz, ki nastopi ob predvidenem času, a je širši. Tokrat napaka ne vpliva na zamikanje izmerjenega časa preleta, vseeno pa s širjenjem pulza ob kompenzaciji hoda meritve privede do navideznega podaljševanja časa preleta. To se pozna kot pozitivni merilni pogrešek, ki je za realne meritve vidna predvsem na slikah 4.13f, 4.14b in 4.15b. Svetlobna pot preko levega zrcala je prisotna na ožjem razponu razdalj med zrcalom in tarčo. To vidimo tudi na zbranih meritvah. Na neki razdalji opazimo prirastek pozitivnega merilnega pogreška, ki za nekatere konfiguracije sčasoma izgine. Tako kot že za desno zrcalo, tudi tu predpostavljamo, da bi pri neki nastavljeni razdalji merilni pogrešek izginil za vse razdalje med lidarjem in zrcalom, česar pa ne opazimo

zaradi omejenega merilnega razpona. Z večanjem razdalje med lidarjem in tarčo se namreč razdalje, kjer se vzpostavijo in prekinejo stranske poti, oddaljujejo.

Na podlagi meritev in simulacije vidimo, da dodajanje sosednjih preusmerjenih kanalov ni trivialen poseg. Preko sosednjih zrcal se vzpostavljajo dodatne svetlobne poti, preko katerih se v sprejemnik sklaplja odboj svetlobe od tarče. Merilna napaka je sicer majhna in prisotna le na delu merilnega območja, vendar je vseeno moteča. Obseg razdalj, na katerih je napaka prisotna je odvisen od razdalje med lidarjem in zrcalom, od širine vidnega polja in od širine zrcal.

Razdalja med lidarjem in zrcalom je za praktično uporabo sistemska zahteva, tako da nanjo ne moremo vplivati, lahko pa zmanjšujemo velikosti vidnih polj ter zrcal. Pri velikosti vidnega polja smo bili omejeni z geometrijo uporabljenega lidarja ter zagotavljanjem dovolj majhnega mrtvega polja, pri velikosti zrcal pa s ponudbo primernih zrcal. Za praktično uporabo bi lahko prilagodili oba parametra in s tem znatno zmanjšali območje, na katerem je merilni pogrešek zaradi svetlobnih poti skozi sosednje kanale prisoten.

Z dovolj ozkim vidnim poljem, ko sosednjih zrcal v vidnem polju ne bi bilo, pričakujemo, da bi bile meritve preko čistih zrcal praktično enake direktnemu merjenju, kot je bilo opaženo s komercialnim lidarjem VLP-16 [109]. Takšen sistem je seveda kompleksnejši za izdelavo. V primeru uporabe zaprašenih zrcal, še vedno pričakujemo napake meritve, ki smo jih opisali v poglavju 4.1. Ker lahko s kalibracijo ugotovimo, na katerih razdaljah je prisoten pogrešek zaradi dodatnih svetlobnih poti preko sosednjih zrcal, obstaja celo možnost, da bi ga lahko programsko kompenzirali.

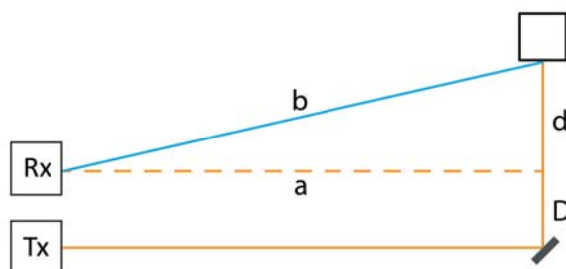
4.3 Eliminacija problemov

Pri preusmerjanju vidnega polja z zrcalom smo naleteli na dve večji oviri. Ena je sklapljanje odbite svetlobe preko sosednjih zrcal, druga pa vpliv nečistoč na zrcalih. V prejšnjem poglavju smo nakazali potencialno možnost programske kompenzacije za napako pri vzpostavljanju dodatnih svetlobnih poti, več težav pa povzročajo nečistoče na površini zrcal. Razen rednega čiščenja površin, kar v praktični uporabi ni nerealno pričakovati, je možno meritve izvajati z uporabo izjemno kratkih svetlobnih pulzov in razločevanjem med odbojem od nečistoč in od tarče. To znatno poveča kompleksnost sistema. Druge preproste ali algoritmične rešitve ne vidimo, lahko pa bi rešitev iskali v ločitvi svetlobnih poti oddane in odbite svetlobe.

4.3.1 Uporaba različnih svetlobnih poti za oddano in odbito svetlobo

Če sprejemnik odboja od nečistoč ali sosednjih zrcal ne more zaznati, ta ne more vplivati na meritev. Dela smo se lotili z željo, da bi poiskali način, kako vidna polja centraliziranega lidarskega sistema prerazporediti na tak način, da bi imitirali množico individualnih lidarjev, pritrjenih na površino robota. Pristop, ki hkrati izloči parazitne odboje in problematiko vzpostavljanja dodatnih svetlobnih poti je uporaba enega samega sprejemnika, ki tarče opazuje pod kotom, ter preusmerjanje posameznih snopov oddane svetlobe. V takšni konfiguraciji je svetlobna pot namesto prelomljene črte oris trikotnik. Ideja je za primer preusmerjanja pod pravim kotom ilustrirana na sliki 4.18. Svetlobna pot oddanega pulza je prikazana z oranžno, odbita svetloba pa z modro barvo. Skupna dolžina takšne svetlobne poti se izračuna po enačbi (4.4).

$$l = a + d + \sqrt{a^2 + d^2} + D \quad (4.4)$$

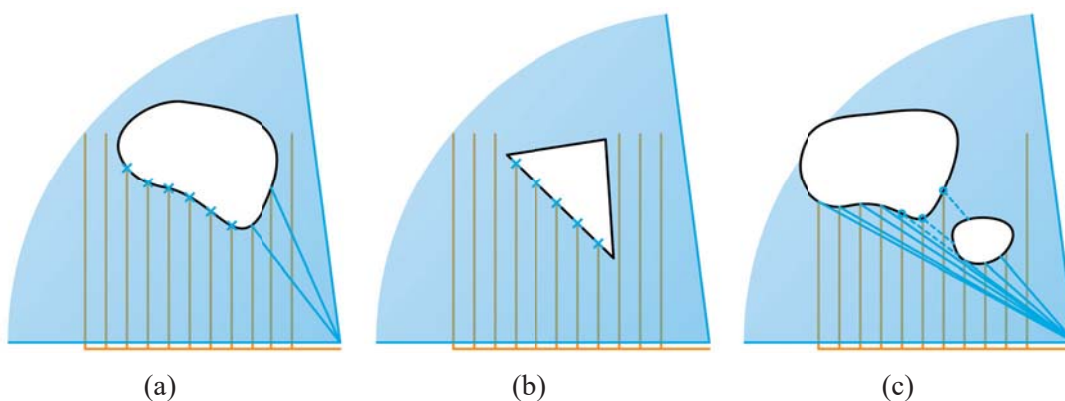


Slika 4.18: Shematski prikaz merjenja z ločenimi svetlobnimi potmi za oddajnik in sprejemnik.

V enačbi nastopajo razdalja med lidarjem in preusmeritvijo svetlobe (a), razdalja med preusmeritvijo in tarčo (d) ter razdalja med oddajnikom in sprejemnikom (D). Ob upoštevanju zveze $l = c \cdot t$ lahko oddaljenost tarče izračunamo po enačbi (4.5), v kateri nastopajo iste spremenljivke.

$$d = \frac{(c \cdot t - D) \cdot (c \cdot t - 2a - D)}{2(c \cdot t - a - D)} \quad (4.5)$$

Do tu problemov še ni, nastopijo pa, ko pod drobnogled vzamemo svetlobne poti ob opazovanju realnih oblik tarče, ki so prikazane na sliki 4.19. Vidno polje in posamezne svetlobne poti sprejemnika so modre, svetlobne poti oddane svetlobe pa oranžne barve. V primeru (a) vidimo, da lahko tarčo doseže več žarkov svetlobe, a do sprejemnika pride le tista svetloba, ki je tarča ne zakriva. V ilustrirani situaciji je tarča na videz mnogo manjša od dejanske velikosti, minimalna razdalja med nadzorovano površino in tarčo pa je določena pravilno. Za nekatere oblike opazovanega objekta se lahko zgodi celo to, da sprejemnik ne vidi nobenega odboja, kot je prikazano na sliki 4.19b. V primeru uporabe sistema za varnost v robotiki takšne oblike ovire ni pričakovati, ker človeško telo nima ostrih robov. Več problemov pričakujemo z zakrivanjem vidnega polja, kot prikazuje slika 4.19c. V tem primeru majhen bližnji objekt zakriva velik del drugega objekta.



Slika 4.19: Svetlobne poti oddane in odbite svetlobe za različne oblike in postavitve tarč.

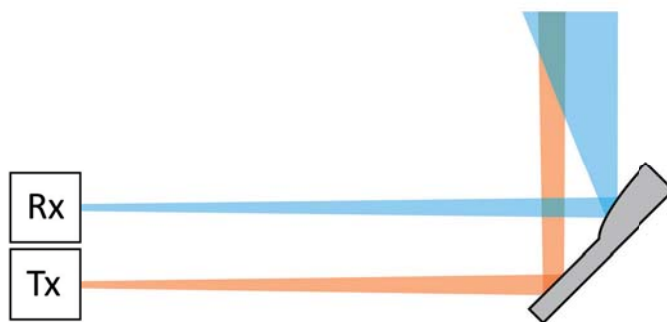
Iz teh treh primerov je razvidno, da je sistem s takšno ločitvijo svetlobnih poti nepraktičen. Za razliko od skenirajočega lidarja sicer ne uporablja gibljivih delov, a je optično kompleksnejši za postavitev in uporabo, hkrati pa je v zaznavanju tarč slabši. Največji problem je, da s tem pristopom izgubimo glavno prednost opazovanja okolice iz površine robota, torej imunost na zakrivanje vidnega polja.

4.3.2 Uporaba ločenih a podobnih svetlobnih poti

V prejšnjem poglavju smo ilustrirali problematiko uporabe znatno različnih svetlobnih poti za oddano in odbito svetlobo. Pristop je vse prej kot idealen, in ga ne priporočamo za praktično uporabo. Morda je boljša alternativa natančno oblikovanje vidnega polja sprejemnika, tako da

v njem ne bi videli odbojev od nečistoč na zrcalih. Pri tem je potrebno zagotoviti, da bo odboj svetlobe od tarče v vidnem polju sprejemnika. Morda bi za doseganje tega morali namesto ravnega zrcala uporabiti drugo obliko odbojne površine.

Primer preusmerjanja vidnega polja z uporabo oblikovanega zrcala je prikazan na sliki 4.2. Oblika oddane svetlobe je prikazana z oranžno, vidno polje sprejemnika z modro, zrcalo pa s sivo barvo. V tem primeru je vidno polje sprejemnika zelo ozko, in ne vidi morebitnega odboja od nečistoč na zrcalu ali dodatnih svetlobnih poti preko sosednjih zrcal. Zaradi oblike zrcala pa se nato razširi in s tem znatno zmanjša mrtvo polje za odbojem. Izvedljivost, prednosti in slabosti tega pristopa bi bilo smiselno preučiti v nadaljnjem delu.



Slika 4.20: Primer preusmerjanja vidnega polja z uporabo oblikovanega zrcala.

Alternativno lahko rešitev iščemo v smeri prerazporejanja vidnih polj z uporabo optičnih vlaken ali drugih optičnih vodnikov. Na tak način lahko zagotovimo, da se vidna polja oddajnikov in sprejemnikov premaknejo na poljubno lokacijo na robotu, oddani žarek in vidno polje pa se lahko tudi dobro prekrivata. Če se za premikanje navidezne lokacije oddajnika in sprejemnika uporabi gibljiva optična vlakna, je lahko celoten lidarski sistem na eni sami lokaciji, in ne na vsakem segmentu posebej, kot to zahteva preusmerjanje z zrcali. Takšen pristop ima svoje prednosti, nosi pa tudi svoje slabosti in neznanke, ki bi jih lahko podrobneje raziskali v nadaljnjem delu.

4.4 Sklepne misli o preusmerjanju vidnega polja

Z željo poiskati alternativo razporejanju množice individualnih lidarjev po površini robota, smo preučili možnost preusmerjanja vidnih polj več kanalov lidarskega sistema z uporabo zrcal v različnih konfiguracijah in stanjih, kakršne pričakujemo v praktični uporabi.

Pokazali smo, da čista zrcala nimajo opaznega vpliva na natančnost in točnost meritev lidarja s kompenzacijo hoda meritve na podlagi širine zaznanega pulza. To velja tako za klasična zrcala, kot tudi za zrcala z odbojem na sprednji površini. To je skladno z ugotovitvami, ki jih je mogoče povzeti po tujih študijah delovanja lidarja VLP-16 proizvajalca Velodyne Lidar. Zanj so meritve prek zrcala zelo podobne direktnim meritvah [56], [105].

V splošnem med obema tipoma zrcal za namene preusmerjanja vidnega polja lidarja nismo opazili razlik. V situaciji, ko so bila za preusmerjanje svetlobe uporabljena zaprašena zrcala, je opazen negativni merilni pogrešek, ki narašča z večanjem razdalje med zrcalom in tarčo, a upada z večanjem razdalje med lidarjem in zrcalom. Pojav pojasni opažanje, da gre pri tem za seštevanje odboja od tarče in od nečistoč na zrcalu. Dominantni efekt seštevanja odbojev je navidezno zmanjševanje časa preleta svetlobe med lidarjem in tarčo. Kot rešitev problema smo predlagali uporabo lidarja, ki oddaja krajše pulze svetlobe, da se lahko razloči med posameznima odbojema ali ločevanje svetlobnih poti oddane in odbite svetlobe, pri čemer morata potekati blizu druga drugi.

Uporaba pravokotne prizme namesto zrcala ni možna, ker že en procent odboja svetlobe od prizme drastično pokvari meritve. Odboj svetlobe od prizme je odvisen le od odbojnosti pri prehodu svetlobe med zrakom ter steklom in hitro preglaši jakost odboja od tarče, ki upada s kvadratom razdalje.

Drugačen tip težav povzroča uporaba več zrcal v neposredni bližini. Tu pride do vzpostavljanja dodatnih svetlobnih poti preko sosednjih zrcal, kar vpliva na čas preleta odbite svetlobe. Dodatne svetlobne poti so prisotne le na delu merilnega območja, ki se širi z večanjem razdalje med lidarjem in zrcali, ter oži z manjšanjem zrcal. Vpliv sosednjih zrcal lahko zmanjšamo tudi z oženjem vidnega polja sprejemnika. Za razliko od vpliva zaprašenih zrcal, pa se zdi, da ga je morda možno algoritmično kompenzirati.

S svojim delom smo preučili osnovne probleme, ki nastopijo pri prerazporejanju vidnih polj z uporabo enega ali več stacionarnih zrcal in služijo kot osnova za nadaljnje delo. Zanj vidimo primarno dve usmeritvi. Ena je izdelava lidarskega sistema, ki je sposoben razločiti med odbojem od nečistoč na zrcalu in odbojem od tarče, pri čemer se lahko odboja nahajata le nekaj centimetrov narazen. Druga usmeritev je celotna ločitev svetlobnih poti oddane in odbite svetlobe s poudarkom na postavitvi in obliki zrcal, pri čemer uporaba ravnih zrcal ni nujno najprimernejša. Največ možnosti za izboljšavo vidimo v uporabi oblikovanih zrcal, s katerimi lahko vplivamo na obliko vidnega polja lidarja.

5 Sprotna detekcija nepričakovanega posega v robotov delovni prostor

Zagotavljanje varnosti je pri robotskih aplikacijah ključnega pomena. Najenostavnejši način za preprečevanje poškodb je fizična ločitev med delavcem in robotom, kar pa znatno oteži kooperacijo. Z uporabo modernih varnostnih sensorjev, kot je linijski skenirajoči lidar, se lahko fizično pregrado nadomesti z mehko pregrado. Ko delavec prestopi navidezno steno, se mora robot zaustaviti. Možna je tudi implementacija več varnostnih con. Ko se delavec premika od zunanje cone proti robotu, se mora gibanje robota upočasnjevati.

Na podlagi standardov ISO 10218-2 [34] in ISO/TS 15066 [40] lahko glede na interakcijo človeka z robotom, delovanje delimo na tri kategorije: popolno avtomatizacijo, kooperacijo in sodelovanje. Kadar stik med človekom in robotom ni dovoljen, govorimo o popolni avtomatizaciji, pri čemer poznamo popolno in virtualno ločitev. Nekoliko bolj permissivna je kooperacija, pri kateri je stik med robotom in človekom dovoljen samo v mirovanju. Pri kooperaciji je možna varnostno nadzorovana zaustavitev ali nadzor hitrosti in varnostne razdalje (ang. Speed and Separation Monitoring, SSM). Najbolj permissivno je sodelovanje, pri čemer je stik med robotom in človekom dovoljen tudi med gibanjem robota, a je potrebno zagotoviti, da ne pride do poškodb. Primera tega sta omejevanje moči in sil (ang. Power and Force Limiting, PFL) ter vodenje z roko.

Pozicije varnostnih naprav glede na hitrost približevanja dela človekovega telesa določa standard ISO 13855 [35]. Varnostna razdalja (S) je po standardu določena kot funkcija hitrosti približevanja (K), ki zajema hitrost gibanja človeka in hitrost gibanja stroja, odzivnega časa sistema (T), ki zajema odzivni čas varnostnega sistema in čas zaustavljanja naprave, in dodatno razdaljo (C), ki zajema razdaljo, povezano z delovanjem varnostnega sistema in razdaljo, s katero se prepreči, da bi delavec zaobšel varnostni sistem. Varnostno razdaljo se izračuna po enačbi (5.1).

$$S = K \cdot T + C \quad (5.1)$$

Po ISO 13855 se kot hitrost približevanja delavca za hojo uporabi 1600 mm/s, za gibe z rokami pa 2000 mm/s, kar je bolj relevantno za sodelujoče aplikacije. Čas, ki ga robot potrebuje za zaustavitev je odvisen od modela robota, hitrosti gibanja in mase bremena. Kot primer lahko vzamemo robota UR5e proizvajalca Universal Robots. Po kataloških podatkih je pri maksimalni hitrosti gibanja in maksimalni masi bremena čas zaustavljanja UR5e do 180 ms,

tipična hitrost vrha robota pa je 1000 mm/s [110]. Z idealnim senzorjem, ki lahko poseg v varnostno območje zazna v trenutku, se varnostna razdalja, S , izračuna po enačbi (5.2). Pri tem je predpostavljeno, da se varnostnega sistema ne da zaobiti, torej ne potrebujemo dodatne varnostne razdalje.

$$S = (2000 \text{ mm/s} + 1000 \text{ mm/s}) \cdot 180 \text{ ms} + 0 \text{ cm} = 54 \text{ cm} \quad (5.2)$$

Ta varnostna razdalja je precej velika in ne omogoča tesne kooperacije med robotom in človekom. Pri 33 % maksimalne hitrosti gibanja in mase bremena se čas zaustavljanja zmanjša na 70 ms, s tem pa se zmanjša tudi zahtevana varnostna razdalja. V tem primeru se ob uporabi idealnega senzorskega sistema izračuna po enačbi (5.3). Ta varnostna razdalja je mnogo bolj primerna za tesno kooperacijo med človekom in robotom, a ni zares realistična, saj predpostavlja idealno detekcijo posega v bližino robota.

$$S = (2000 \text{ mm/s} + 330 \text{ mm/s}) \cdot 70 \text{ ms} + 0 \text{ cm} = 16 \text{ cm} \quad (5.3)$$

Po standardu ISO 13855 mora biti lidar namreč nameščen največ 30 cm nad tlemi. Kadar varnostno razdaljo določamo z lidarjem, je torej potrebno zagotoviti še dodatno varnostno razdaljo, da se delavec s trupom in rokami ne more stegniti do robota. To ponovno onemogoči tesno kooperacijo med robotom in človekom. S tem razlogom se za zagotavljanje SSM v sodelujoči robotiki uporablja drugačne načine določanja varnostne razdalje.

Kot je predstavljeno v uvodu, se za te namene lahko uporabijo zunanje globinske kamere, še novejši pristop pa je določanje varnostne razdalje iz površine robota samega. Z opazovanjem okolice iz površine robota dobimo natančnejšo sliko okolice, kot pri opazovanju iz zunanje perspektive. Med drugim to omogoči dinamično izogibanje oviram [48], [54], pri čemer pa naletimo na dve težavi. Prva je razlikovanje med detekcijo ovire in detekcijo statične okolice oziroma robota samega, druga pa je določanje dejanske pozicije zaznane ovire glede na robota. V obeh primerih je ključnega pomena natančno poznavanje pozicij senzorjev. Namesto tega, da senzorje precizno pritrđimo na vnaprej določena mesta, lahko njihove točne pozicije s kalibracijo določimo tudi naknadno. Primer tega je uporaba lidarjev z dodatno inercialno merilno enoto, s pomočjo katere je mogoče med kalibracijo z gibanjem robota določiti dejansko pozicijo senzorja [59].

Ob poznavanju geometrijskega modela robota je mogoče vnaprej izračunati pričakovano meritev razdalje [52], še en pristop pa je uporaba digitalnega dvojčka. Med preizkušanjem slednjega smo opazili veliko občutljivost na odstopanja v poziciji posameznih senzorjev.

Težave so povzročala tudi odstopanja med geometrijo vidnega polja fizičnega in virtualnega senzorja ter nelinearnostjo meritev predvsem na robu vidnega polja. Napake so bile najbolj očitne v bližini ostrih prehodov merjene razdalje.

S tem ozadjem smo iskali nove načine, kako zaznati poseg v delovno območje robota. Cilj je bil razviti sistem, ki bo sposoben zaznati nepričakovan poseg v okolico robota brez potrebe po predhodnem poznavanju geometrije okolice ali poznavanja točne postavitve varnostnih senzorjev, in bo primeren za uporabo kot dodatni sloj varnosti za sodelujoče robote. Sekundarni cilj je bil, da bo ta sistem primeren ne le za uporabo, ko se robot samostojno giblje v popolnoma predvidljivem prostoru, ampak tudi za uporabo v aplikacijah, kjer pri izvajanju naloge sodelujeta robot in človek.

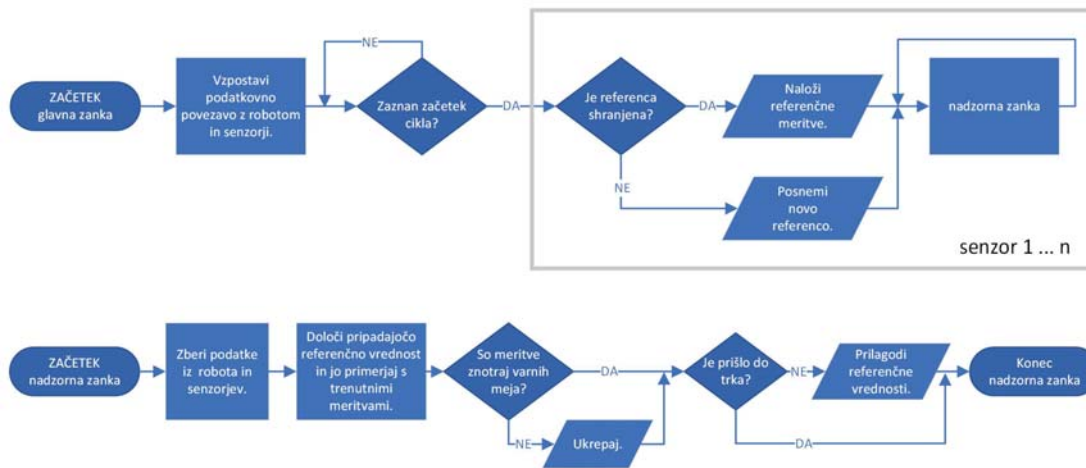
Osredotočili smo se na sistem, ki bi omogočal čim bolj preprosto implementacijo in zadosten vpogled v dogajanje v okolici za zagotavljanje vsaj osnovnih varnostnih funkcij za tesno sodelovanje med človekom in robotom. Kot najenostavnejšo in najbolj robustno rešitev smo identificirali primerjavo trenutnih meritev z vsebino prilagodljive tabele referenčnih meritev. Pri tem je potrebno izpostaviti, da predlagani pristop ne omogoča izogibanja oviram, temveč je namenjen le zmanjševanju možnosti za trk.

To poglavje je strukturirano na sledeč način: uvodu sledi podrobna predstavitev sistema za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor (SDNP), nato pa so predstavljeni eksperimenti za evalvacijo delovanja sistema. Rezultati in njihova interpretacija so zbrani v ločenih poglavjih, sekcija pa se zaključuje s predlogi za nadaljnje delo.

5.1 Delovanje sistema za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor

Predlagani sistem za SDNP najprej definira referenčne vrednosti meritev senzorjev, s katerimi med delovanjem primerja sveže meritve. Referenčne meritve se med delovanjem v vsakem trenutku določi na podlagi trenutnega stanja robota, torej kotov in hitrosti robotovih sklepov. Za boljše delovanje v okolju, ki se med ponovitvami robotskega cikla postopoma spreminja, se referenčne meritve sproti prilagajajo novemu stanju. To je uporabno predvsem pri sodelovanju med robotom in človekom. Prilagajanje se izvaja odsekoma in samo v primeru, da v zadnjem odseku ni prišlo do trka. V tej implementaciji je trk zaznan s primerjavo sil v sklepih robota s pričakovanimi. V tej specifični implementaciji pričakovane in dejanske sile v sklepih izračunava robotski krmilnik uporabljenega robota, UR5e proizvajalca Universal Robots.

Osnovno delovanje programa je v obliki diagrama poteka prikazano na sliki 5.1, natančneje pa je razloženo v nadaljevanju.



Slika 5.1: Diagram poteka programa za sprotno detekcijo sprememb v okolici robota.

Na začetku glavne zanke sistem vzpostavi podatkovno povezavo z robotom in senzorji, nato pa se sinhronizira z gibanjem robota. To stori tako, da počaka na začetek novega cikla izvajanja robotovega programa. Tekom naslednjega cikla, program meritve senzorjev in robotove kote in hitrosti sklepov shranjuje v referenčno tabelo. Če so bile referenčne meritve že posnete, lahko program shranjevanje novih podatkov v referenčno tabelo preskoči, in jo namesto tega napolni s podatki iz zunanje datoteke. S tem je sistem pripravljen na izvajanje glavne nadzorne zanke. To izvaja vse do zaustavitve izvajanja programa.

V glavni zanki program zbira podatke iz robota in senzorjev. Na podlagi podatkov iz robota, torej kotov in hitrosti robotovih sklepov, program nato določi pripadajoče referenčne meritve, s katerimi primerja najnovejše meritve senzorjev. Če so trenutne meritve izven varnih meja, mora sistem ukrepati z upočasnjevanjem gibanja robota. V nasprotnem primeru akcija ni potrebna. Da se lahko sistem prilagaja na počasi spreminjajoče okolje, se tekom izvajanja programa referenčne meritve posodablajo, da bolje odražajo dejansko stanje. Prilagajanje referenčnih vrednosti se sme izvesti le v primeru, da pred tem ni prišlo do trka med robotom in oviro ali delavcem.

Do tu je bil sistem predstavljen v poenostavljeni obliki. Pri implementaciji sistema naletimo na več težav in izzivov. Sistem mora delovati v realnem času, torej ne sme biti procesno preveč zahteven. Poleg tega mora delovati z množico senzorjev, ki lahko meritve izvajajo ob različnih

časih in v različnih intervalih. Nazadnje izpostavimo še najpomembnejši izziv, kako v vsakem trenutku določiti pripadajočo referenčno vrednost meritev?

5.1.1 Določanje pripadajoče referenčne vrednosti meritev

Definiranje začetnih referenčnih vrednosti meritev senzorjev je trivialno, manj jasno pa je kasnejše sprotno indeksiranje elementa referenčne tabele, ki pripada trenutni meritvi. Določanje zveze med trenutnimi meritvami in referenčnimi vrednosti na podlagi pretečenega časa bi bilo ustrezno, če bi se robot ves čas gibal z nominalno sprogramirano hitrostjo. Težave nastopijo pri upočasnjem gibanju ali celo vmesni ustavitvi. To sta dva najosnovnejša varnostna odziva, ki prekineta zvezo med pretečenim časom in robotovo lego. Tudi normaliziranje hitrosti teka navideznega časa glede na hitrost izvajanja programa je le pogojno uporabno. Da se bo robot na ukaze za spremembo hitrosti izvajanja programa vedno odzval v točno poznanem času namreč ni nujno zagotovljeno. Očitno je potrebno poiskati drug način za sinhronizacijo med trenutno lego in referenčnimi meritvami.

Določanje pripadajoče referenčne vrednosti smo realizirali z uporabo dveh vpoglednih tabel (LUT). Prva shranjuje robotske parametre, torej kote (ϕ_n) in normalizirane hitrosti ($\tilde{\omega}_n$) robotovih sklepov, in jo v tem delu imenujemo RLUT, druga pa shranjuje referenčne meritve senzorjev in jo imenujemo SLUT. Obe LUT za ključ uporabljata pretečeni čas, izmerjen med zbiranjem prvih referenčnih meritev. Poleg tega morata biti vzorčeni z zadostno frekvenco, da omogočata ustrezno primerjavo trenutnih meritev z referenčnimi. V naši implementaciji sta bili LUT vzorčeni s 1000 Hz.

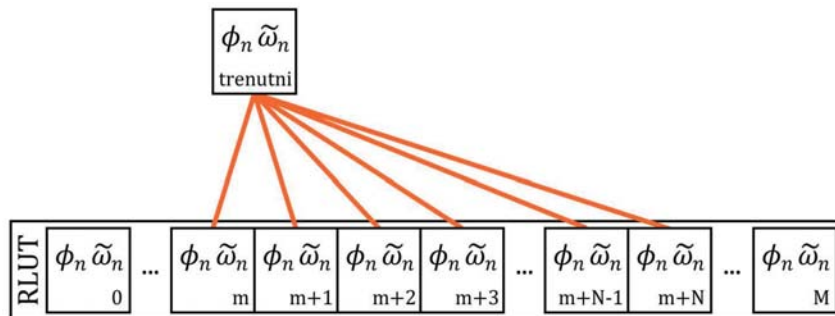
Med delovanjem, sistem določi najboljše ujemanje med trenutnimi pozicijami in hitrostmi sklepov ter vnosi v RLUT in vrne pripadajoči indeks. Z njim dobi pravo referenčno vrednost senzorjev iz SLUT. Pri tej metodi se za določanje pripadajočega indeksa uporablja izračun evklidske norme med trenutnim stanjem robota, torej trenutnimi koti in normaliziranimi hitrostmi sklepov, in vsebino RLUT v anizotropnem dvanajst dimenzijskem prostoru kotov in normaliziranih hitrosti robotovih sklepov. Norma med trenutnim stanjem in vnosi v RLUT se izračuna na enak način, kot bi se določila evklidska razdalja med točkama v izotropnem dvanajst dimenzijskem prostoru. Določanje minimalne evklidske norme med trenutno lego in vnosi v RLUT opisuje enačba (5.4), na sliki 5.2 pa je postopek tudi grafično prikazan. V enačbi je upoštevano tudi omejevanje iskalnega območja. Povod za omejevanje in nastopajoče spremenljivke so opisani v nadaljevanju.

Določanje ujemanja bi lahko računali na celotni vsebini RLUT, kar pa ne bi bilo učinkovito. Dolžina LUT se namreč z daljšanjem robotskega programa linearno povečuje. Za dolge cikle

bi lahko hitrost delovanja programa omejevalo iskanje najboljšega ujemanja med trenutno in referenčno lego robota. Pri omejevanju iskalnega območja v RLUT se lahko zanašamo na navzgor omejeno hitrost izvajanja programa. Ta se izvaja s hitrostjo med 0 % in 100 % nominalne hitrosti, torej je potrebno pregledati le vnose v LUT med zadnjim ujemanjem in toliko vzorcev naprej, kolikor časa je preteklo med enim in drugim izvajanjem glavne programske zanke. Upoštevanje tega znatno zmanjša računsko zahtevnost.

Za večjo imunost na merilne napake je vseeno smotno analizirati nekoliko večji del referenčne tabele, iskanje ujemajoče točke na celotnem območju pa lahko celo negativno vpliva na delovanje. To je izrazito predvsem v primerih, ko v istem programu robot večkrat potuje po isti trajektoriji. Pri določanju ujemanja se zato omejimo le na del RLUT od indeksa m do indeksa $m + N$. V naši implementaciji m predstavlja indeks zadnjega zaznanega ujemanja, N pa vrednost 1000. Iskanje ujemanja smo torej omejili na čas od zadnjega ujemanja do ene sekunde po njem, saj sta LUT vzorčeni s 1000 Hz.

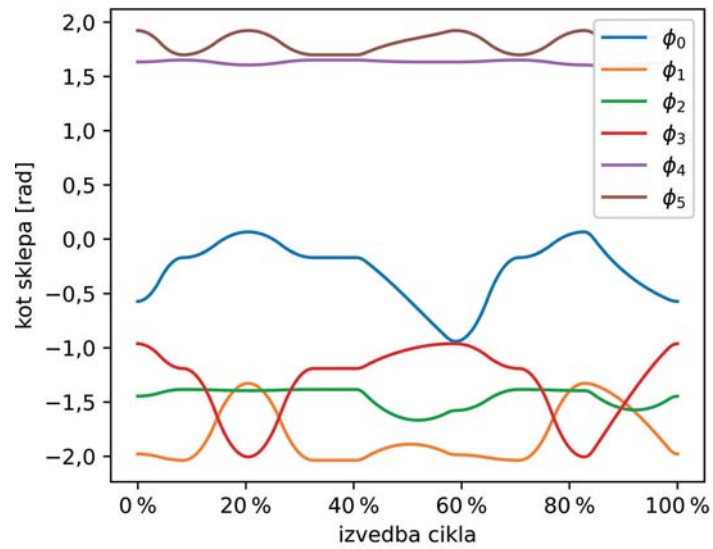
$$\text{indeks} = \operatorname{argmin}_{i \in [m, m+N]} \left(\sqrt{\sum_{n=0}^6 ((\phi_{n,i} - \phi_{n,\text{trenutni}})^2 + (\tilde{\omega}_{n,i} - \tilde{\omega}_{n,\text{trenutni}})^2)} \right) \quad (5.4)$$



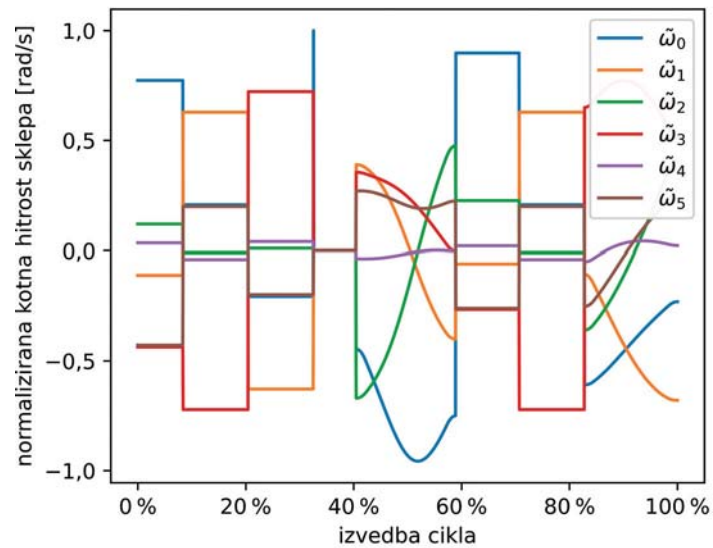
Slika 5.2: Grafični prikaz postopka določanja indeksa referenčne vrednosti, ki pripada trenutnemu stanju robota.

Vsebina RLUT je za primer aplikacije robotskega pobiranja in odlaganja kosov prikazana na sliki 5.3. Zaradi preglednosti je razdeljena na dva dela. Slika 5.3a prikazuje kote, slika 5.3b pa normalizirane hitrosti robotovih sklepov tekom izvajanja programa. V praksi so hitrosti zvezne, na sliki 5.3b pa zaradi normiranja navidezno izkazujejo skokovite preskoke. Za isti primer je na sliki 5.4 za izbrani trenutek z oranžno barvo prikazan izračun norme med trenutnim stanjem in vsemi vnosi v RLUT. Na sliki je za primerjavo z modro prikazan tudi izračun norme brez upoštevanja kotnih hitrosti sklepov. Z vertikalno sivo črto je na grafu označena lega, na kateri

se v trenutku izračuna norme nahaja robot. Slika 5.5 prikazuje še povečavo grafa v bližini te točke.

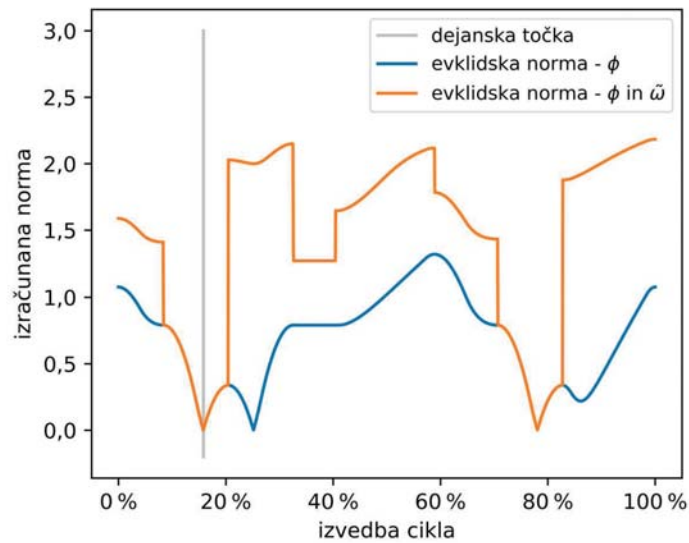


(a)

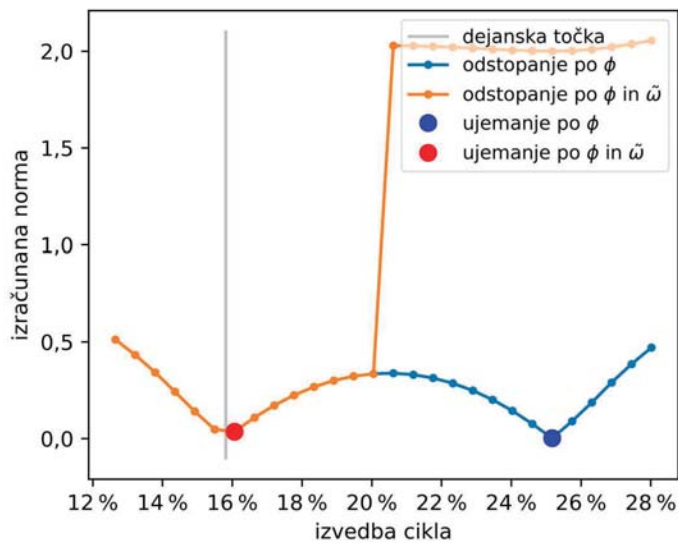


(b)

Slika 5.3: Graf vsebine RLUT, razdeljen na (a) kote in (b) normalizirane hitrosti robotovih sklepov za primer preproste aplikacije pobiranja in odlaganja kosov.



Slika 5.4: Izračun odstopanja med trenutno lego in vnosi v RLUT.



Slika 5.5: Izračun odstopanja med trenutno lego in vnosi v RLUT na izseku LUT v bližini spremembe smeri gibanja po isti trajektoriji.

Tekom cikla se koti sklepov spreminjajo zvezno, zato je takšen tudi graf izračunane norme brez upoštevanja hitrosti sklepov. Te lahko med posameznimi deli gibov skokovito poskočijo, kar se prenese tudi na graf izračunane norme z upoštevanjem hitrosti sklepov.

Za določanje trenutne lege robota na prvi pogled zadošča že poznavanje kotov sklepov, ob natančnejšem pomisleku pa hitro opazimo omejitve. Problem nastopi v situaciji, ko robot izvede gib, ki se po isti trajektoriji premika v različnih smereh. Pri pobiranju in odlaganju kosov je to pogost pojav. V tem primeru lahko brez upoštevanja hitrosti sklepov kot najboljše ujemanje sistem določi gib v napačni smeri, kot je to ilustrirano na sliki 5.5. Na njej je prikazana povečava grafa iz slike 5.4 v okolici ujemajoče točke. Z vertikalno sivo črto je ponovno označena lega, na kateri se nahaja robot. Z modro in oranžno črto sta označena izračuna evklidske norme med trenutno lego in vnosi v RLUT brez upoštevanja in z upoštevanjem hitrosti, moder in rdeč krog pa označujeta določeno ujemanje v enem in drugem primeru.

5.1.2 Prilagajanje na spremenljivo okolje

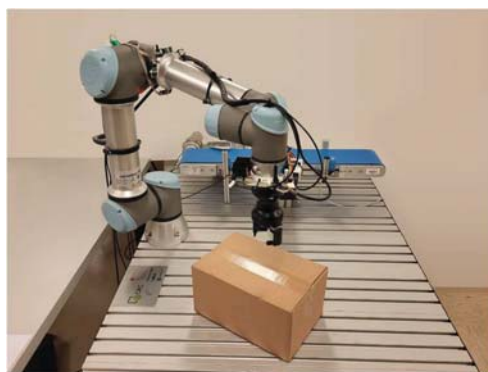
Primerjava trenutnih meritev z referenčnimi vrednostmi je ustrezna za uporabo v časovno nespremenljivem okolju, oziroma kadar se okolica robota popolnoma ponovljivo spreminja sinhronizirano z gibanjem robota. Kadar so spremembe sinhronizirane z gibanjem robota, a niso popolnoma ponovljive, temveč med več zaporednimi cikli izkazujejo postopno lezenje, se mora sistem na okolico sproti prilagajati.

Takšen značaj okolice zajema predvsem sodelovanje med robotom in človekom. Človeški gibi so mnogo manj ponovljivi, kot robotovi [111], vseeno pa so pri dolgotrajnem ponavljanju gibi ritmični in usklajeni z delovanjem strojev v okolici. S tem lahko učinkovito postanejo del robotove okolice. Variacije gibov so seveda opazne, poleg tega pa se lahko gibi s časom spreminjajo. Po daljšem opravljanju iste naloge bo delavec optimiziral svoje gibe, z utrujenostjo pa se bo začel premikati počasneje.

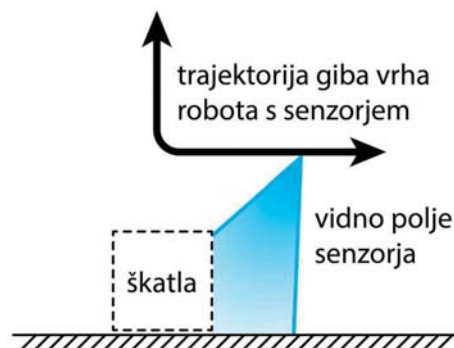
Predlagani sistem za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor (SDNP) to upošteva. Med delovanjem konstantno beleži meritve senzorjev in lahko ustrezno prilagaja vsebino referenčnih meritev v SLUT. Prilagajanje poteka odsekoma. Za namene preizkušanja delovanja sistema za SDNP so bili odseki dolgi eno sekundo. Če v zadnjem odseku ni prišlo do trka, se referenčne vrednosti prilagodijo tako, da bolje odražajo zadnje meritve. Za zaznavanje trka je bila v predstavljeni implementaciji uporabljena primerjava sil v sklepih robota s pričakovanimi vrednostmi, ki jih je izračunaval robotski krmilnik uporabljenega robota, UR5e proizvajalca Universal Robots.

Referenčne meritve senzorjev se po prilagajanju spremenijo na uteženo povprečje med starimi referenčnimi vrednostmi in meritvami na zadnjem odseku. V predstavljeni implementaciji je bilo ustrezno prilagajanje doseženo z uporabo utežnega koeficienta 0,5. Kadar so meritve vzorčene z nižjo vzorčno frekvenco, kot je privzeta v SLUT in RLUT, ali pa posamezne meritve iz katerega koli razloga manjkajo, se manjkajoče vrednosti izračunajo z linearno interpolacijo med najbližjima obstoječima meritvama. To je uporabljeno tudi v predstavljeni implementaciji, saj sta obe LUT vzorčeni s 1000 Hz, senzori pa razdalje vzorčijo s 50 Hz.

V nadaljevanju je na primeru preprostega giba prikazano prilagajanja na oviro. Robot se je gibal v preprostem prostoru, kasneje pa je bila v njegov delovni prostor postavljena škatla, kot je prikazano na sliki 5.6a. Robot je izvajal preprost gib, ki je z vrhom robota orisoval trajektorijo v obliki črke L. Za boljšo predstavljenost so trajektorija vrha robota, škatla in vidno polje senzorja razdalje ilustrirani na sliki 5.6b. Ilustracija predstavlja pogled v smeri od prijemala proti bazi robota.



(a)



(b)

Slika 5.6: (a) prikaz postavitve, na kateri je bilo zajeto prilagajanje referenčne meritve in (b) ilustracija giba, škatle in vidnega polja senzorja razdalje tekom zbiranja meritve.

Meritve senzorja tekom štirinajst izvedb sprogramiranega cikla so prikazane na sliki 5.7a. Serije meritev od prvega do zadnjega cikla so prikazane z različnimi barvami od modre do oranžne, pri čemer modra predstavlja meritve tekom najstarejšega cikla, oranžne pa meritve

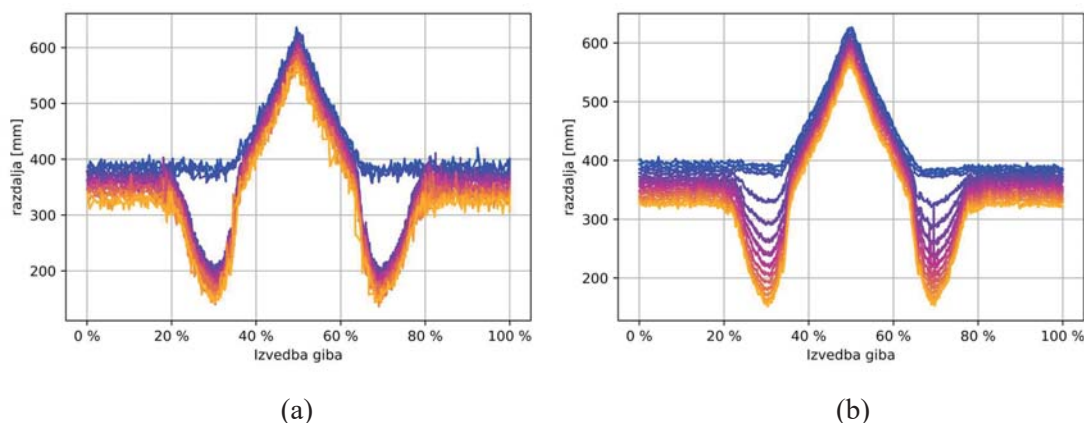
tekom najnovejšega cikla. Za lažje razločevanje med posameznimi serijami, je vsaka naslednja serija zamaknjena 5 mm meritve po vertikalni skali nižje od prejšnje.

Škatla je bila v robotov delovni prostor postavljena pred začetkom četrtega cikla, kar se na sliki 5.7a opazi kot znaten skok v obliki serije. Opaziti je mogoče, da so prve tri serije med seboj praktično identične, enako pa velja tudi za naslednjih enajst serij. Ker se geometrija okolice spremeni le med tretjim in četrtem ciklom, je to opažanje pričakovano.

Na sliki 5.7b je prikazano še prilagajanje referenčnih meritev tekom istih štirinajst ciklov. Pri tem grafu je uporabljena enaka barvna skala, kot v prejšnjem primeru. Barve od modre do oranžen torej predstavljajo cikle od najstarejšega do najnovejšega. Poleg iste barvne sheme je uporabljen tudi enak zamik grafov, vsaka naslednja serija je torej po vertikalni skali zamaknjena 5 mm meritve pod prejšnjo.

Tudi na tem grafu so meritve prvih treh ciklov med seboj praktično enake. To je skladno s pričakovanji, saj se v tem času geometrija okolice ni spreminjala. Od četrtega cikla dalje, ko je bila v delovno območje robota dodana škatla, se referenčne meritve postopoma prilagajajo na novo stanje. Za namene boljše ilustracije postopka so bile meritve zbrane z manjšim utežnim koeficientom prilagajanja referenčnih meritev, in sicer 0,25. Po postavitvi ovire v robotov delovni prostor, se pojavi odstopanje med zaporednimi meritvami. To je bilo sprva največje, z vsakim naslednjim ciklom pa se manjša. To je skladno s pričakovanji, saj glede na implementirani način prilagajanja referenčnih vrednosti te nosijo značaj geometrijske vrste z odmikom. V prikazanem primeru so referenčne vrednosti v desetem in enajstem ciklu med seboj praktično identične, kar je mogoče interpretirati kot končano prilagajanje referenčnih vrednosti meritev.

V primeru uporabe idealnega senzorja razdalje, se referenčne meritve ne bi nikoli dokončno prilagodile na novo okolico, temveč bi proti popolni prilagoditvi le limitirale. V realnem primeru, ko imajo meritve razdalje dano količino šuma, ta problematika ni opazna. S primerjavo zadnje, oranžne, serije meritev na sliki 5.7a in zadnje, oranžne, serije prilagojenih referenčnih meritev na sliki 5.7b, je mogoče opaziti tudi, da sta praktično identični, oziroma da so po končanem prilagajanju referenčne meritve napram dejanskim meritvam znotraj šumnega nivoja.



Slika 5.7: Graf (a) meritev razdalje opazovanega sensorja in (b) referenčnih meritve tekom prilagajanja na oviro v delovnem prostoru.

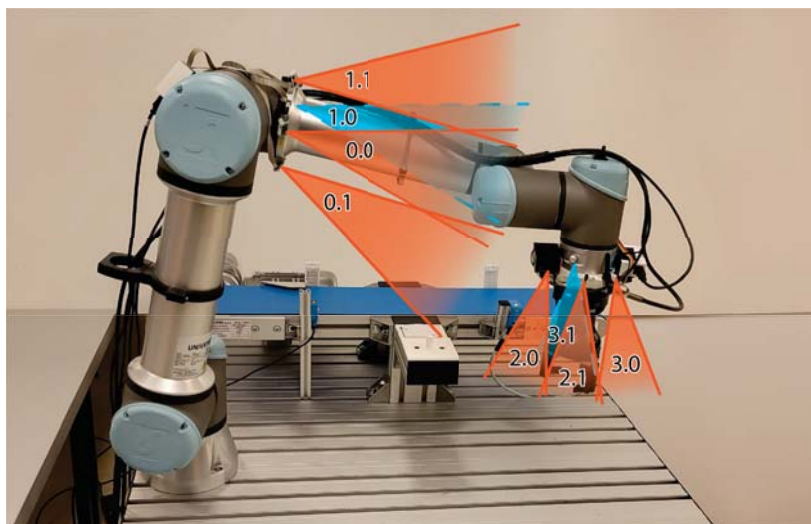
5.1.3 Implementacija sistema

Sistem za SDNP je bil zasnovan z mislijo na enostavno implementacijo na katero koli robotsko platformo. Program je trenutno realiziran v programskem jeziku Python in se izvaja na zunanjem računalniku. Za implementacijo na poljubnem sistemu je potrebno prilagoditi le kodo za zbiranje parametrov o stanju robota ter kodo za zbiranje podatkov iz sensorjev. Za namene razvoja in validacije sistema je bil uporabljen sodelujoči robot UR5e proizvajalca Universal Robots. Zanj obstaja knjižnica za komunikacijo z robotom, RTDE. Ta omogoča dostop do robotovih internih spremenljivk vključno s pozicijo in hitrostjo robotovih sklepov. Preko iste knjižnice je mogoče tudi spreminjati hitrost izvajanja robotskih gibov.

Posamezni senzori, s katerimi je robot opremljen, lahko meritve izvajajo ob različnih časih in v različnih časovnih intervalih. V SLUT so vnesene takoj, ko so izmerjene. Za senzore, ki vzorčijo z nižjo vzorčno frekvenco, kot jo omogoča ločljivost SLUT, se meritve linearno interpolirajo. To je bilo uporabljeno tudi v naši implementaciji, saj smo robotovo okolico nadzirali s senzorji, ki so meritve vzorčili s 50 Hz, LUT pa sta vzorčeni s 1000 Hz. Za preprečevanje sporadičnega obnašanja smo izločili posamezna odstopanja od referenčnih meritev in ukrepali šele, če je bil poseg zaznan v vsaj petih zaporednih meritvah. Pri tem je potrebno upoštevati, da senzori z nižjo vzorčno frekvenco ali daljšim filtriranjem meritev poseg v delovno območje zaznajo kasneje, torej negativno vplivajo na odzivnost na poseg v robotov delovni prostor. Sistem omogoča uporabo poljubnega števila in poljubnih vrst sensorjev. Sočasno bi lahko uporabili tudi različne tipe sensorjev, na primer lidarje in kapacitivne senzore bližine ali celo lidarje na robotu in zunanjo globinsko kamero.

5.2 Eksperimentalna postavitve

Za namene preizkušanja in validacije sistema smo uporabili kompaktne lidarje, VL53L1, proizvajalca STMicroelectronics. Te smo izbrali, ker so se v našem preizkušanju izkazali za najprimernejše. Pregled razpoložljivih senzorjev in preizkušanje senzorjev iz ožjega izbora je predstavljeno v poglavju 2.3. V stanju tehnike so posamezni senzori na robota običajno pritrjeni tako, da okolico opazujejo pravokotno na površino robota, z drugačno postavitvijo pa lahko primeren nadzor nad okolico robota dosežemo že z uporabo manjšega števila senzorjev. Tega smo se poslužili tudi v našem delu. Točne pozicije senzorjev niso pomembne, saj ne vplivajo na delovanje sistema. Pozicije, oznake in vidna polja senzorjev na robotu so prikazani na sliki 5.8. Tega poimenovanja senzorjev se držimo tudi v nadaljnjih poglavjih, ko predstavljamo in interpretiramo merilne rezultate.



Slika 5.8: Postavitve lidarjev na robotu in ilustracija njihovih vidnih polj.

Delovanje sistema za SDNP smo želeli preizkusiti v več situacijah, v katerih bi lahko bil uporabljen. Zato smo pripravili štiri scenarije naraščajoče kompleksnosti, s katerimi so bili preverjeni različni aspekti delovanja sistema.

Scenarij 1: V prvem scenariju je bila preizkušena osnovna funkcionalnost sistema. To zajema upočasnevanje v bližini ovire, prilagajanje na oviro, in zaznavanje trka med robotom in oviro oziroma operaterjem. Da bi preizkusili te tri funkcionalnosti, je robot izvajal preprost gib v praznem delovnem prostoru. Pred peto izvedbo robotskega cikla smo v robotov delovni prostor postavili škatlo. Medtem ko se je robot zaradi detekcije ovire gibal upočasnjeno, smo v petih zaporednih ciklih robota načrtno drezali z roko in s tem simulirali trk z oviro. Silo smo izvajali

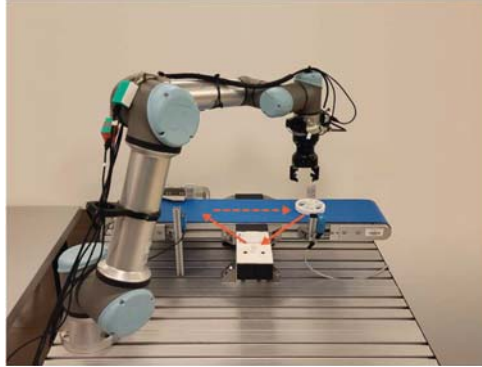
v smeri proti bazi robota, pravokotno na trajektorijo vrha robota, ki je ilustrirana na sliki 5.6b. Sila je bila pod pragom reakcije PFL varnostnih nastavitev robota. Med dreganjem je bila ciljna hitrost gibanja roke 50 mm/s, ciljna frekvenca trkov pa med 0,5 in 1 Hz, torej pogosteje od dolžine odseka za posodabljanje referenčnih meritev. Po petih ciklih smo z dražljaji prenehali, in dovolili, da se sistem za SDNP prilagodil novi okolici. Pred petindvajseto ponovitvijo cikla je bila škatla iz robotovega delovnega prostora odstranjena. Postavitev v tem eksperimentu je prikazana na sliki 5.6a.

Scenarij 2: Namen drugega scenarija je bil preizkusiti zaznavanje in odziv na oviro v bolj kompleksnem okolju. S tem namenom je bil sistem preverjen na primeru robotske manipulacije predmeta. Robot je iz konca tekočega traku pobiral zobnik in ga odlagal na odložišče ter iz njega spet nazaj na začetek tekočega traku. Tekom eksperimenta je bila med deseto izvedbo cikla v delovno območje robota ponovno postavljena škatla. Med sedemnajsto ponovitvijo cikla je bila nato odstranjena. Eksperimentalna postavitev je prikazana na sliki 5.9a. Vrh tekočega traku in odložišče sta bila 17 cm nad osnovno ravnino, na katero je bil pritrjen robot. Razen premikajočega zobnika na tekočem traku se okolica robota ni spreminjala. To se je spremenilo v naslednjem scenariju.

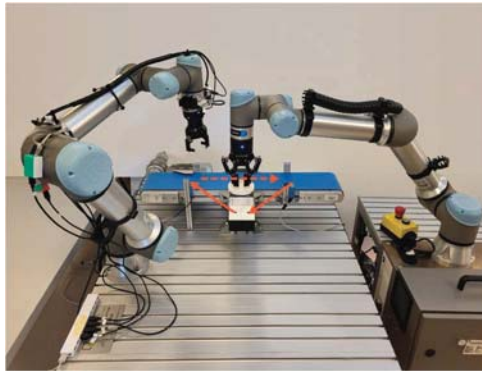
Scenarij 3: Namen tretjega scenarija je bilo preizkusiti delovanje sistema v časovno spremenljivem okolju, pri čemer pa so bile spremembe sinhronizirane z gibanjem robota. Pozornost je bila usmerjena predvsem v morebitne neželene zaustavitve. S tem namenom je bil prejšnji scenarij prilagojen za delo z dvema robotoma. Prvi robot je zobnik prelagal iz konca tekočega traku na odložišče. Ta robot je predstavljal časovno spremenljivi del okolice. Drugi robot, ki je bil opremljen s sistemom za SDNM, je zobnik iz odložišča prelagal nazaj na tekoči trak. Eksperimentalna postavitev je prikazana na sliki 5.9b. Prilagajanje na dodajanje ovire v robotov delovni prostor je bilo preverjeno v prvih dveh scenarijih, zato ga v tem scenariju nismo preverjali. S tem scenarijem je mogoče demonstrirati ustrezno delovanje sistema v časovno spremenljivi okolici, dokler so spremembe ponovljive in sinhronizirane z robotom. Za gibanje človeka pri sodelovanju z robotom ta opis velja le delno.

Scenarij 4: V četrtem scenariju je bilo preizkušeno delovanje sistema za SDNP, ko pri izvajanju naloge v neposredni bližini sodelujeta robot in človek. V tem scenariju je delavec zobnik prelagal iz konca tekočega traku na odložišče, robot pa ga je od tam pobiral in odlagal na začetek tekočega traku, kot je to prikazano na sliki 5.9c. Da bi preverili prilagajanje na znatno spremembo v delavčevem načinu opravljanja naloge, je delavec nalogo najprej izvajal z desno roko, od šestnajstega cikla dalje pa z levo. Poleg tega se je zadrževal bližje robota. Pri

tem se ni trudil ohraniti čim bolj podobnih gibov, temveč je nalogo ves čas izvajal tako, kot mu je najbolj ustrezalo.



(a)



(b)



(c)

Slika 5.9: Eksperimentalna postavitve za preverjanje delovanja sistema (a) v preprosti aplikaciji robotske manipulacije izdelka, (b) sodelujoči manipulaciji objekta, kjer sodelujeta dva robota in (c) sodelujoči manipulaciji objekta, kjer sodelujeta robot in človek.

5.3 Rezultati

V tem poglavju so predstavljeni rezultati izvedenih eksperimentov. Za vsak scenarij so podana relativna normalizirana odstopanja (Δ_r) trenutnih meritev ($m_{trenutna}$) od referenčnih vrednosti iz SLUT ($m_{referenčna}$), kot to opisuje enačba (5.5), tekom izvajanja posameznega cikla.

$$\Delta_r = 1 - \frac{m_{trenutna}}{m_{referenčna}} \quad (5.5)$$

Meritve so podane v odvisnosti od normaliziranega časa izvajanja cikla pri nominalni hitrosti izvajanja gibov. Individualni grafi na slikah 5.10 do 5.13 so označeni z identifikatorjem senzorja, s katerim so bile meritve zbrane. Lokacije senzorjev s pripadajočimi identifikatorji so ilustrirane na sliki 5.8. Na teh grafih so z različnimi barvami prikazana normalizirana relativna odstopanja trenutnih meritev od referenčnih, obrezana na območje $[-1, 1]$. Pozitivno odstopanje je označeno rdeče, negativno pa modro, kot prikazuje tudi barvna skala na pripadajočih slikah. Tiste meritve, ki povzročijo upočasnitev robota, so na grafih dodatno označene zeleno. Deli cikla, ko robot odpira ali zapira prijemalo in se robot ne premika, nimajo podatkov. Za lažje ločevanje med perfektnim ujemanjem z referenčnimi meritvami in mirovanjem, so deli ciklov med čakanjem ter odpiranjem in zapiranjem prijemala označeni sivo in šrafirani. Za večjo preglednost je barvna legenda podana tudi v tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Barvna legenda, uporabljena v predstavitvi rezultatov.

Barva	Pomen
Bela	Trenutna meritev se ujema z referenčno
Rdeča	Trenutna meritev je manjša od referenčne
Modra	Trenutna meritev je večja od referenčne
Zelena	Trenutna meritev je povzročila upočasnjevanje gibanja
Siva	V tem času se robot ne giblje

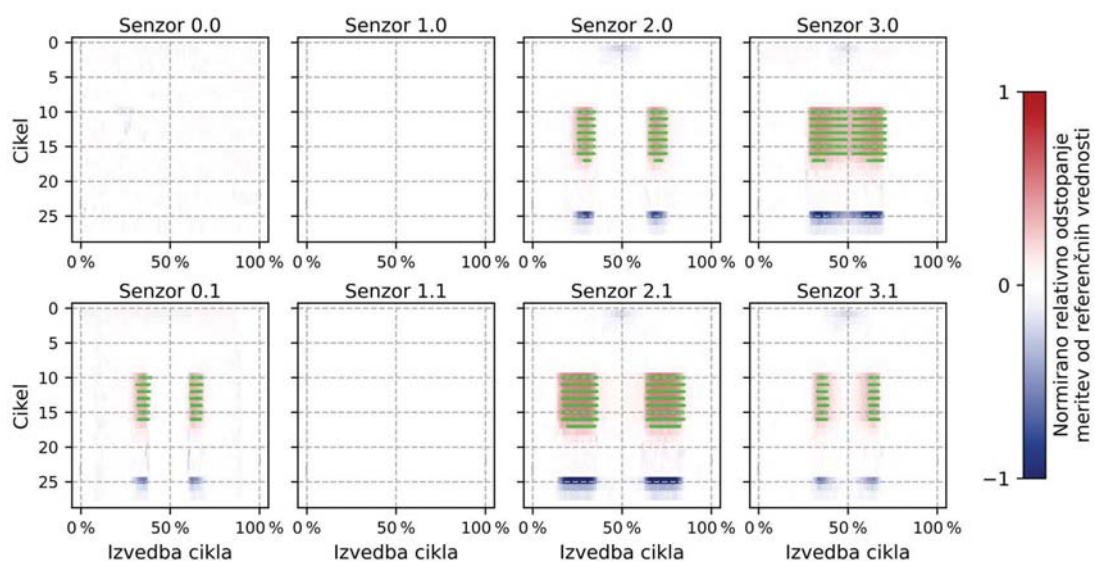
Za večjo preglednost so štirje scenariji, v katerih smo preizkusili delovanje sistema za SDNP predstavljeni v ločenih poglavjih.

5.3.1 Scenarij 1 – preizkus osnovnih funkcionalnosti v praznem okolju

Najprej so predstavljeni rezultati prvega scenarija, torej ko je robot v praznem prostoru izvajal preprost gib. Postavitev in gib sta prikazana na sliki 5.6. Grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev senzorjev napram referenčnim vrednostim so prikazani na sliki 5.10. Za

senzorje 2.0, 2.1, 3.0 in 3.1 je na začetku v okolici 50 % izvedenega cikla opazna nežna modra barva. Ta predstavlja rahlo negativno odstopanje, ki je posledica nepopolno zapolnjene tabele referenčnih meritev. V nadaljnjih ciklih se referenca izpopolni, odstopanje pa posledično izgine.

Na grafih, ki pripadajo senzorjem 0.1, 2.0, 2.1, 3.0 in 3.1 so med desetim in sedemnajstim ciklom ponekod opazne izmenjujoče rdeče in zelene horizontalne črte. Pri tem gre zgolj za način prikaza. Zelena oznaka za upočasnjeno gibanja robota je tanjša od oznake relativnega odstopanja trenutnih meritev od referenčnih. Kadar je trenutna meritev manjša od referenčne (rdeče ozadje), in ta meritev povzroča upočasnitev robota (zeleno), pride do izmenjujočih rdečih in zelenih horizontalnih črt.



Slika 5.10: Grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev senzorjev od referenčnih vrednosti, ko se robot giblje v praznem prostoru. Med eksperimentom je bila v prostor dodana škatla, robota smo tekom naslednjih pet ciklov med upočasnjenim gibanjem dregali in kasneje škatlo odstranili.

V desetem ciklu je bila v robotov delovni prostor dodana škatla, tekom sledečih pet ciklov pa smo robota med upočasnjenim gibanjem načrtno dregali, kot je opisano v opisu prvega scenarija v poglavju 5.2. Sistem je oviro zaznal, kar se na sliki 5.10 vidi v rdeče obarvanih delih grafov. V bližini ovire je sistem upočasnil gibanje robota. Meritve, ki povzročijo upočasnjevanje

gibanja, so na grafih označene z zeleno barvo. Ker se referenčne meritve senzorjev posodablja le, če v zadnjem odseku sistem ne zazna trka, se SLUT v okolici škatle zaradi dreganja sprva ne posodablja. Zaradi tega se v njeni bližini robot konstantno upočasnjuje, odstopanja meritev od referenčnih pa so si med temi petimi cikli efektivno enaka. Po prenehanju trkov se sistem v treh ciklih dovolj prilagodi na novo okolico, da se robot ne upočasnjuje več. Še dva cikla kasneje se dokončno prilagodi na novo okolico, kar vidimo v odsotnosti obarvanih celic v kasnejših ciklih. V 24. ciklu je bila škatla odstranjena, meritve senzorjev pa zaradi tega večje od referenčnih. To na grafih vidimo kot modro barvo. Za meritve, ki presegajo referenčne, se robot ne upočasnjuje.

Iz grafov odstopanj meritev od referenčnih na sliki 5.10 je razvidno, da je bila ovira vidna le petim od osmih senzorjev. To zajema vse štiri senzorce na robotovem zapestju in spodnji senzor na robotovem komolcu, torej senzorce 0.1, 2.0, 2.1, 3.0 in 3.1. Ostali trije senzorji opazujejo okolico levo, desno in nad robotom, kot je razvidno iz slike 5.8. Nekoliko povečano prisotnost kratkotrajnih nepričakovanih odstopanj meritev opazimo ob robu zaznave ovire, ki se na grafih vidijo kot slabo vidne vertikalne črte spreminjajoče barve. To je še najbolj vidno na grafu meritev senzorca 0.1 v času po končanem prilagajanju na škatlo in preden je bila ta odstranjena. Na istem intervalu je pojav opazen tudi na grafih odstopanja meritev senzorca 2.1 in 3.0, čeprav je na teh dveh senzorzih viden mnogo slabše.

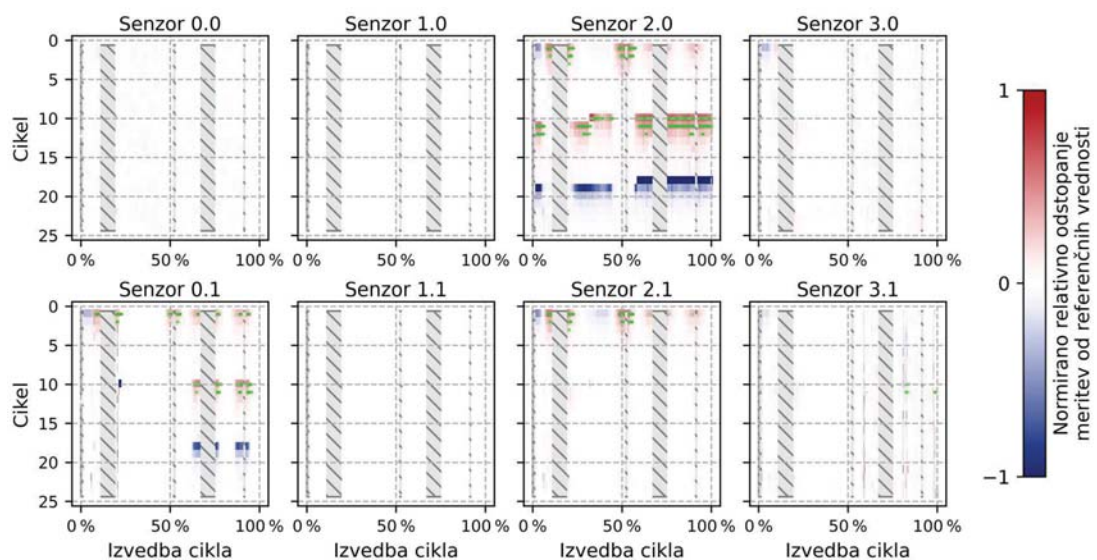
5.3.2 Scenarij 2 – preizkus delovanja v kompleksnejšem okolju

V naslednjem eksperimentu smo imitirali robotsko sestavljanje oziroma pakiranje kosov v vedno časovno nespremenljivem, a geometrijsko bolj kompleksnem delovnem okolju. Robot je s konca tekočega traku pobiral zobnike in jih prelagal na odložišče. Iz njega jih je nato ponovno pobiral in odlagal nazaj na začetek tekočega traku. Za posamezne senzorce so normalizirana relativna odstopanja meritev od referenčnih vrednosti za ta eksperiment prikazana na sliki 5.11. Sivo so označena obdobja robotovega mirovanja. V tem času odstopanja meritev senzorjev napram referenčnim niso pomembna, saj upočasnjevanje izvajanja programa ne vpliva na hitrost gibanja mirujočega robota.

Na grafih odstopanja meritev senzorjev 0.1, 2.0 in 2.1 je mogoče opaziti, da v prvih ciklih prihaja do upočasnjevanja med gibanjem v bližini tekočega traku in odložišča. Tam se robot giblje tik pred in takoj po odpiranju in zapiranju prijemala, torej delih, ki so na grafih označeni sivo. Tekoči trak in odložišče sta bila na isti višini, a 17 cm nad osnovno ravnino, prehod med

njimi pa je bil skokovit. Že majhen zamik v trenutku izvajanja meritve razdalje je lahko zato med premikanjem v bližini tekočega traku oziroma odložišča povzročil velik preskok v izmerjeni razdalji. Uporabljeni senzori so podatke zbirali s 50 Hz, njihovo vzorčenje pa ni bilo sinhronizirano z gibanjem robota. S tem razlogom so meritve razdalje, ko se je robot gibal v bližini tekočega traku in odložišča, znatno variirale tudi v našem primeru. Tekom več ciklov so referenčne vrednosti meritve v SLUT v bližini skokovitega preskoka meritev zasedle povprečne vrednosti dejanskih meritev. Med eksperimentom je še vedno občasno prihajalo do odstopanj, ki pa niso povzročala upočasnjevanja gibanja.

V desetem ciklu je bila v delovni prostor robota dodana škatla, ki jo zaznavata senzorja 0.1 in 2.0. Zaradi nje se v naslednjih treh ciklih gibanje robota upočasnjuje. Škatla je bila odstranjena v sedemnajstem ciklu, na kar se sistem prav tako hitro prilagodi.



Slika 5.11: Grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev senzorjev od referenčnih vrednosti, ko robot samostojno kos prelaga med tekočim trakom in odložiščem. Med eksperimentom je bila v robotov delovni prostor dodana škatla, kasneje pa je bila tudi odstranjena.

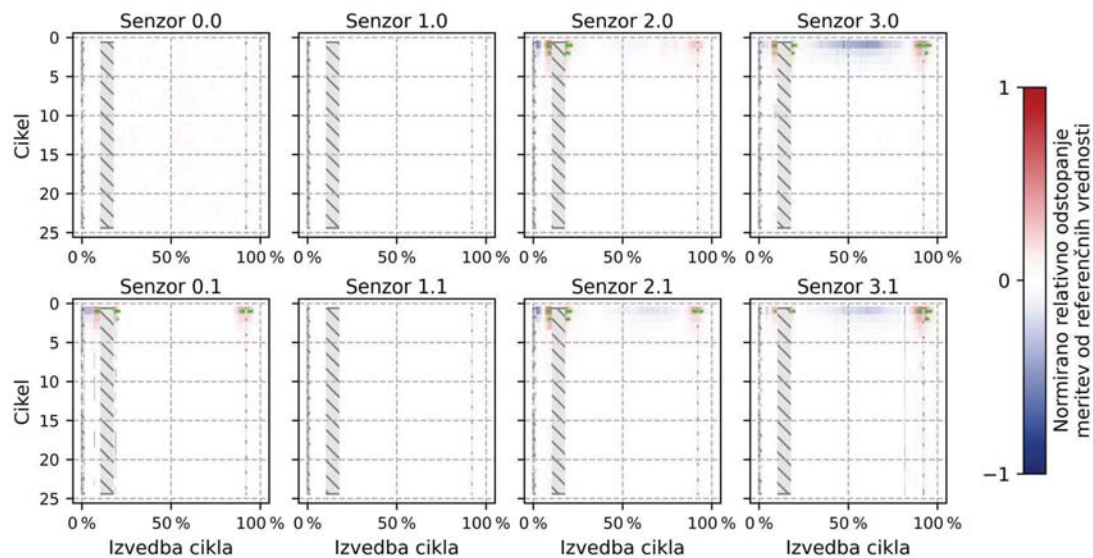
5.3.3 Scenarij 3 – preizkus delovanja v časovno spremenljivem okolju

Naslednji scenarij je bil podoben prejšnjemu, le da sta pri manipulaciji sodelovala dva robota. Prvi robot je zobnik prelagal iz konca tekočega traku na odložišče, poleg tega pa je tudi

predstavljal časovno spremenljivi del okolice za drugega robota. Ta je bil opremljen s sistemom za SDNP in je zobnik pobiral iz odložišča ter ga odlagal nazaj na začetek tekočega traku. Za ta scenarij so grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev od referenčnih vrednosti prikazani na sliki 5.12.

V prvih petih ciklih je mogoče opaziti enak vzorec kot v prejšnjem primeru. Predvsem v bližini tekočega traku in odložišča lahko prihaja do opaznih odstopanj meritev od referenčnih vrednosti. Tam se robot giblje tik pred in takoj po odpiranju in zapiranju prijemala, kar je na grafih označeno s sivo barvo. Zeleno označeni deli grafov relativnih odstopanj meritev senzorjev 0.1, 2.0, 2.1, 3.0 in 3.1 pokažejo, da se robot v bližini odložišča in tekočega traku najprej upočasnjuje, ko pa se referenčne meritve dokončno vzpostavijo, se robot giblje nemoteno.

Tekom več ponovitev se v bližini tekočega traku in odložišča še vedno občasno pojavljajo posamezna manjša odstopanja od referenčnih vrednosti. Te so še najbolj vidne na grafu za senzor 0.1, kar se okrog 10 % in 20 % izvedenega cikla vidi kot prekinjeni vertikalni črti spreminjajoče barve.

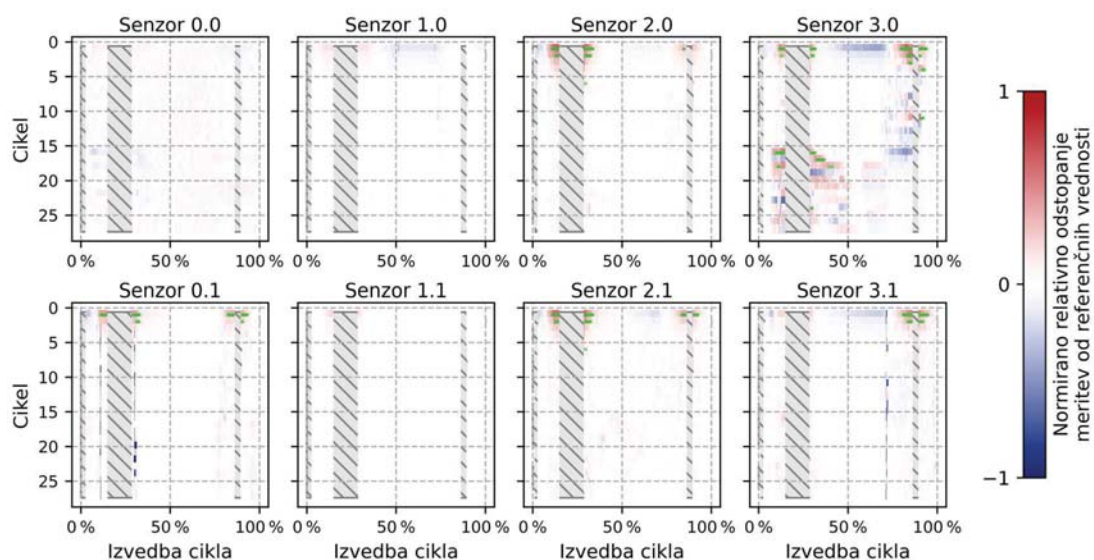


Slika 5.12: Grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev senzorjev od referenčnih vrednosti, ko robot v sodelovanju z drugim robotom kos prelaga med tekočim trakom in odložiščem.

5.3.4 Scenarij 4 – preizkus delovanja pri sodelovanju med robotom in človekom

V naslednjem scenariju smo enega robota nadomestili z delavcem. Delavec je zobnik prelagal iz konca tekočega traku na odložišče, robot, opremljen s sistemom za SDNP, pa je zobnik prelagal iz odložišča nazaj na začetek tekočega traku. Za ta scenarij so grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev od referenčnih vrednosti prikazani na sliki 5.13.

Tako kot v prejšnjih dveh primerih, je tudi tu možno v prvih petih ciklih med gibanjem robota v bližini tekočega traku in odložišča pri senzorjih 0.1, 2.0, 2.1, 3.0 in 3.1 opaziti postopno izgradnjo SLUT. V tem času se robot nekajkrat zaustavi, navidezno brez razloga. Po končani izgradnji referenčnih meritev se mestoma, predvsem na grafu za senzor 0.1, še vedno pojavljajo posamezna večja odstopanja od referenčnih vrednosti, ki pa ne povzročajo upočasnitev gibanja. To se okrog 15 % in 30 % izvedenega cikla vidi kot prekinjeni vertikalni črti spreminjajoče barve.



Slika 5.13: Grafi normaliziranih relativnih odstopanj meritev senzorjev od referenčnih vrednosti, v sodelujoči aplikaciji, ko robot in operater kos skupaj prelagata med tekočim trakom in odložiščem.

Delavec je najbolj viden na senzorju 3.0, ki je pritrjen na robotovem zapetju spredaj. Čeprav je v teh meritvah prisotno veliko odstopanja od referenčnih vrednosti v pozitivni in negativni smeri, ki po svoji strukturi spominja na šum, se robot po končanem prilagajanju, razen izjemoma, ne upočasnjuje. Tekom eksperimenta se je robot po končanem prilagajanju SLUT le dvakrat upočasnil takoj po pobiranju oziroma odlaganju kosa. To se je zgodilo v enajstem in štiriindvajsetem ciklu.

Delavčevo gibanje smo po petnajstih ciklih načrtno spremenili, z namenom demonstracije prilagajanja na bolj znatno spremembo. Delavec se poleg drugačnega načina rokovanja z zobnikom tudi načrtno zadrževal bližje robotu, kar se na sliki 5.13 pozna v povečani količini variacije dostopanja med meritvami sensorja 3.0 in vsebino SLUT, ki je prisotna na večjem delu cikla. Po spremembi načina delavčevega gibanja je sprva prihajalo do upočasnjevanja gibanja robota. Tekom naslednjih treh ciklov se sistem na spremembo dovolj prilagodi, da gibanja robota ne upočasnjuje več.

5.4 Diskusija

V prejšnjem poglavju so bili predstavljeni rezultati eksperimentov, s katerim je bilo preverjeno delovanje predlaganega sistema za SDNP, v tem poglavju pa so rezultati postavljeni v širši kontekst. Sistem je tudi primerjan s stanjem tehnike.

Cilj sistema za SDNP je bila detekcija nepričakovanega posega v okolico robota, ki bo deloval tako v časovno nespremenljivem okolju, kot tudi za tesno sodelovanje med robotom in človekom. Rezultati preizkušanja v različnih scenarijih kažejo, da zasnovani sistem deluje ne le v teoriji, ampak tudi v praksi.

V najbolj preprosti konfiguraciji, torej ko se meritve sensorjev spreminjajo počasi in zvezno, so odstopanja med trenutnimi in pričakovanimi meritvami minimalna. To je vidno v prvih devetih ciklih na sliki 5.10. Odstopanja med trenutnimi in referenčnimi meritvami so majhna tudi v geometrijsko bolj razgibanem okolju, če je geometrija okolice konstantna ali pa se predvidljivo spreminja sinhronizirano z gibanjem robota. To se na grafih na slikah 5.10, 5.11 in 5.12 vidi kot pretežna zastopanost bele barve oziroma le nežni odtenki modre ali rdeče, ko se sistem ne prilagaja na spremenjeno okolico.

Še največ odstopanja je opaziti, kjer pride do skokovite spremembe v izmerjeni razdalji, kot je vidno na slikah 5.11, 5.12 in 5.13 na grafu normaliziranih relativnih odstopanj meritev od referenčnih za senzor 0.1 tik pred in takoj po prvem mirovanju (označeno sivo). V danih primerih odstopanja niso povzročala nepotrebnih upočasnitev izvajanja programa. To je predvsem zato, ker so imela majhno amplitudo in bila zato pod pragom reakcije na detekcijo posega v robotov delovni prostor. Z uporabo sensorjev z večjo vzorčno frekvenco pričakujemo, da bi se tovrstna odstopanja še zmanjšala, z zadostno vzorčno frekvenco pa jih morda sploh ne bi opazili oziroma bi jih lahko enostavno izločili s preprostim filtriranjem meritev.

Opažanja v prvih dveh scenarijih, torej pri gibanju v praznem prostoru in samostojnem manipuliranju predmeta na tekočem traku, so si zelo podobna v treh ključnih pogledih. Sistem v nekaj ciklih dopolni nepopolno SLUT, po tem deluje brez nepričakovanih zaustavitev, na novo dodano stacionarno oviro pa se sistem prilagodi v nekaj ciklih. Enako je mogoče reči tudi za manipulacijo z dodatnim robotom, le da je bil v tem scenariju cilj eksperimenta demonstracija delovanja v časovno spremenljivem okolju in nismo eksplicitno preverjali prilagajanja na dodano oviro. Pokazali smo tudi, da je mogoče zaznati tudi trk, ki še ne sproži zaustavitve preko robotovega vgrajenega varnostnega mehanizma, in na podlagi tega preprečiti prilagajanje na situacijo, ki je privedla do trka.

Nekoliko drugače izgledajo meritve med scenarijem, v katerem sta pri izvajanju naloge sodelovala robot in človek. Ključna razlika med temi in ostalimi meritvami je znatno večji raztros odstopanj od referenčnih meritev, kar pripisujemo manjši ponovljivosti človeških gibov [111]. Temu navkljub sistem nepričakovan poseg v robotovo delovno območje zaznava pravilno in ne upočasnjuje hitrosti robotovega gibanja cikla brez razloga. Sistem se primerno prilagaja na delavčeve postopne spremembe gibanja, tako da le redko prihaja do posameznih upočasnitev. Na večje spremembe v delavčevem načinu izvajanja naloge se prilagodi podobno hitro kot na stacionarno oviro.

Čeprav predstavljeni sistem za zaznavanje nepričakovanega posega v delovno območje robota deluje skladno z zastavljenimi cilji, pa se je potrebno zavedati njegovih omejitev. Kot vsi SSM sistemi, tudi ta ne omogoča fizične interakcije oziroma sodelovanja med robotom in človekom, saj takrat varnostne razdalje ni, torej se robot ne sme gibati. Nekateri konkurenčni sistemi informacijo o oklici uporabljajo za izogibanje oviram [48], [54], predstavljeni sistem pa v trenutni obliki le zaznava poseg v delovno območje in prilagaja hitrost gibanja robota ter s tem zmanjšuje verjetnost za trk. Kot tak, predlagani sistem za SDNP ni primeren za samostojno zagotavljanje varnosti, saj opravlja le vlogo pomožnega varnostnega sistema. Ta lahko v sodelovanju z drugimi varnostnimi mehanizmi izboljša delovanje.

Varnostni standard ISO 13849-1 [112] določa najnižjo zahtevano raven zmogljivosti varnostnih funkcij (ang. required Performance Level, PLr) glede na oceno tveganja. Glede na resnost, pogostost in trajanje ter možnost izogibanja nevarnosti zahtevani PLr razvrsti v pet skupin od a, ki je najnižja, do e, ki je najvišja raven. Implementacija predlaganega sistema za sprotno

zaznavanje posega v delovno območje robota poenostavi izogibanje nevarnosti in s tem potencialno za en razred zniža zahtevani PLr glavnega varnostnega sistema. Določanje PLr namreč poteka po binarnem odločitvenem drevesu, ki se začne pri oceni resnosti poškodbe, nadaljuje z oceno pogostostjo poškodbe oziroma trajanja nevarnosti, v zadnji fazi pa se oceni še možnost izogibanja nevarnosti. Vsaka naslednja kategorija ima manjši vpliv na končno oceno. Možnost izogibanja nevarnosti lahko na skupno oceno vpliva le za en razred. Podobno kot PLr, lahko uporaba predlaganega sistema zniža tudi zahtevani nivo varnostne integritete (ang. System Integrity Level, SIL) po standardu IEC 62061 [113] za funkcionalno varnost. Podobno kot PLr, je SIL odvisen od resnosti možne poškodbe, pogostosti nevarnosti, verjetnosti za nastanek poškodbe in enostavnosti za izogibanje nevarnosti. Tudi tu lahko predlagani sistem zahtevani SIL znižuje s povečevanjem enostavnosti za izogibanje nevarnosti. Pred implementacijo v realnem industrijskem okolju bi bilo seveda potrebno še natančno ovrednotiti zanesljivost delovanja sistema in senzorjev ter odpornost na okvare (ang. Hardware Fault Tolerance, HFT) in delež varnih odpovedi (ang. Safe Failure Fraction, SFF).

Predlagani sistem za SDNP je smiselno umestiti tudi v kontekstu standarda ISO 13855 [35], ki določa pozicije varnostnih naprav glede na hitrost približevanja dela človekovega telesa. Varnostno razdaljo se izračuna po enačbi (5.1), za primer uporabe robota UR5e pa sta izračuna varnostne razdalje s predpostavko uporabe idealnih senzorjev podana v enačbah (5.2) in (5.3).

V predstavljeni implementaciji sistema za SDNP so lidarji razdalje vzorčili s 50 Hz, za izločanje šuma meritev pa je bila zaznava posega v robotov delovni prostor potrjena šele po petih zaporednih vzorcih, ko je bila razdalja manjša od pričakovane. Poseg je torej mogoče zaznati v najmanj 100 ms. Z upoštevanjem tega časa, se varnostna razdalja poveča. Za maksimalno hitrost gibanja z največjim dovoljenim bremenom se za robota UR5e izračuna po enačbi (5.6).

$$S = (2000 \text{ mm/s} + 1000 \text{ mm/s}) \cdot (170 \text{ ms} + 100 \text{ ms}) = 81 \text{ cm} \quad (5.6)$$

Pri tem je predpostavljeno, da varnostni sistem zanesljivo zazna poseg v bližino robota in da dodatna varnostna razdalja (C) ni potrebna. Zahteva po tolikšni varnostni razdalji seveda onemogoči tesno sodelovanje med robotom in človekom. Varnostna razdalja je nekoliko manjša a še vedno nepraktična tudi, ko se robot giblje s 33 % maksimalne hitrosti in manipulira le 33 % maksimalnega bremena. V tej situaciji se varnostna razdalja izračuna po enačbi (5.7).

$$S = (2000 \text{ mm/s} + 330 \text{ mm/s}) \cdot (70 \text{ ms} + 100 \text{ ms}) = 40 \text{ cm} \quad (5.7)$$

Na podlagi teh dveh izračunov je razvidno, da senzorni sistem v trenutni obliki ni primeren za praktično uporabo, saj je zahtevana varnostna razdalja prevelika. Potrebovali bi senzorje z večjo vzorčno frekvenco, s čimer bi se zahtevana varnostna razdalja približala idealnim vrednostim iz enačbe (5.3). Če bi namesto uporabljenih senzorjev uporabili senzorje z vzorčno frekvenco 1 kHz, bi se zahtevana varnostna razdalja zmanjšala na 17 cm, kot je razvidno iz enačbe (5.8)

$$S = (2000 \text{ mm/s} + 330 \text{ mm/s}) \cdot (70 \text{ ms} + 5 \cdot 1 \text{ ms}) = 17 \text{ cm} \quad (5.8)$$

Dodaten problem s katerim se srečamo v našem primeru, je pretvarjanje meritev senzorjev v dejanske varnostne razdalje. Za namene predstavljenih eksperimentov senzorji niso bili pritrjeni pravokotno na površino robota, zato posamezne meritve ne odgovarjajo dejanski razdalji med robotom in oviro. Ker senzorji razdaljo merijo pod širšim kotom, meritve predstavljajo množico možnih lokacij zaznane tarče, ki se v vidnem polju sensorja na izmerjeni razdalji.

Opisani sistem za SDNP je predvsem preprost za implementacijo. Robota je mogoče opremiti s poljubno količino različnih senzorjev, kot so to storili že [48], [50], [51], [52], [53]. Senzorji morajo biti fiksno pritrjeni na robota ali okolico, točna pozicija pa je za doseganje osnovne funkcionalnosti popolnoma nepomembna. Senzorji morajo zagotoviti le primerno pokritost okolice, da lahko še pred trkom zanesljivo zaznajo poseg v robotov delovni prostor. Opisani sistem za SDNM je tudi prilagodljiv, tako da ob počasnih spremembah okolice ne prihaja do nepotrebnih zaustavitev. Brez točnega poznavanja varnostnih razdalj in hitrosti sistem seveda ni primeren za uporabo kot glavni varnostni sistem, pripomore pa k povečanju varnosti primarnega varnostnega sistema, kot je na primer PFL varnostni sistem sodelujočega robota.

5.5 Nadaljnje delo

V okviru tega poglavja je bil predstavljen predlog enostavnega sistema za zaznavanje nepričakovanega posega v delovno območje robota. Ta je lahko uporabljen kot dodatni sloj varnosti pri aplikacijah, kjer v neposredni bližini pri izvajanju naloge sodelujeta robot in človek. Delovanje predlaganega sistema za SDNP je bilo demonstrirano tako v časovno nespremenljivem, kot tudi v časovno spremenljivem delovnem okolju.

Sistem v trenutni obliki sicer deluje po pričakovanjih, a funkcionira le za aplikacije, kjer robot konstantno izvaja identičen gib. V primeru zlaganja predmetov iz palete ali na njo, bi torej morali referenčne meritve zajeti za celotni postopek. Izpuščanje posameznih elementov na

paleti ni mogoče. Sistem bi bilo smiselno nadgraditi, da bi lahko gib in pripadajoče referenčne meritve razdelili na posamezne osnovne enote in jih med seboj nizali skladno z zahtevami trenutne naloge.

Kadar uporabljeni robot omogoča sodelovanje, torej varnost zagotavlja že s PFL, bi lahko sistem nadgradili tudi tako, da bi bilo med izbranimi deli robotovega programa omogočeno sodelujoče vodenje robota. Za tovrstno delovanje bi morali predlagani sistem za SDNP za trajanje sodelovanja izklopiti. Po končanem sodelovanju se mora pred ponovnim vklopom sistema za SDNP robot vrniti v znano lego, da lahko sistem ponovno določa pripadajoče referenčne vrednosti meritev senzorjev.

Za bolj tekoče delovanje bi se lahko izpopolnilo tudi prilagajanje referenčnih vrednosti v primeru trka. V trenutni izvedbi vsakršni trk prekine prilagajanje referenčnih meritev na novo okolico, z upoštevanjem informacije o smeri trka pa je mogoče potencialno skrajšati čas prilagajanja. Če se trk zgodi v smeri gibanja robota, torej če delavec robota odrine v smeri njegovega gibanja, se je robot očitno premikal prepočasi in je prilagajanje referenčnih meritev kljub zaznanemu trku ustrezen odziv. Na podoben način bi lahko s poznavanjem okvirnih lokacij posameznih senzorjev glede na smer gibanja robota prilagajali prag reakcije na zaznavo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor po posameznih senzorjih. Če se robot od delavca oddaljuje, ni potrebe, da se gibanje upočasnjuje. Pri tem je potrebno izpostaviti, da je ta način delovanja primeren le za uporabo s sodelujočimi roboti, ki varnost zagotavljajo že z uporabo PFL pristopov.

V študijske namene bi bilo morda zanimivo tudi četrti scenarij nadgraditi tako, da bi pomočjo zunanjega merilnega sistema spremljali dejanske razdalje med robotom in operaterjem. S tem bi bilo mogoče dobiti boljši vpogled v odzivnost predlaganega sistema za SDNP na spremembe v delavčevem načinu izvajanja naloge.

Za praktično uporabo bi bilo smiselno tudi podrobno preučiti, kje in katere senzorje je potrebno pritrditi na robota in okolico za zadosten vpogled v dogajanje v bližini robota, da je mogoče zagotoviti pravočasno in ustrezno reakcijo v različnih tipih sodelujoče robotske celice. Neustrezen izbor in postavitve senzorjev lahko namreč negativno vplivata na delovanje sistema. S premalo senzorji lahko posega v robotov delovni prostor sistem ne zazna, preveč senzorjev pa lahko zmanjša efektivno vzorčno frekvenco senzorjev [50].

6 Zaključek

Dela smo se lotili z željo po izboljšanju varnosti v sodelujočih aplikacijah, kjer pri izvajanju naloge v neposredni bližini sodelujeta človek in robot. Specifični poudarek je bil na kooperaciji človeka z robotom z uporabo SSM. S svojim delom smo izboljšali dva ključna aspekta in sicer izvajanje meritev varnostne razdalje in razločevanje med pričakovanimi meritvami in nepričakovanim posegom v bližino robota.

V okviru dela je bil razvit pristop, s katerim je mogoče imitirati razporeditev množice kompaktnih lidarjev vzdolž robotovega segmenta in pri tem ohraniti visoko vzročno frekvenco. Za preučevanje možnih efektov je bil razvit in izdelan lasten lidar, ki je omogočil večji vpogled v dogajanje na svetlobni poti. Poleg tega je nudil tudi višjo vzorčno frekvenco, kot jo omogočajo komercialno dostopni kompaktni lidarji.

Izdelani lidar je zasnovan modularno. Združuje eno matično ploščo, na kateri se nahajajo mikrokrmilnik ter napajalniki, in do šestnajst satelitov. Ti vsebujejo vezja za oddajanje in sprejemanje svetlobe ter merjenje časa preleta. Izdelani lidar omogoča točnost meritve ± 1 cm in standardno deviacijo meritev 12 mm. Maksimalna teoretična vzorčna frekvenca je 10 kHz, zaradi omejene hitrosti komunikacije med mikrokrmilnikom in računalnikom pa je bila med eksperimenti omejena na 500 Hz.

Vidno polje lidarja je mogoče preusmerjati s pomočjo uporabe zrcal, pri čemer pa lahko nastopijo nove težave. Kadar je bilo vidno polje lidarja preusmerjeno s čistim zrcalom, so bile meritve primerljive direktnim, težave pa so bile opažene pri uporabi nekoliko zaprašenih zrcal. Izvor merilne napake je bil identificiran v parazitnem odboju svetlobe od nečistoč. Tudi če je sam po sebi nezaznaven, vpliva na obliko zaznanega signala. To posledično vpliva na izmerjeni čas preleta svetlobe ter s tem pokvari meritve. Za odpravljanje napake na tej točki rešitev ni bila implementirana, kot možnost pa vidimo uporabo izjemno kratkih svetlobnih pulzov, ki bi omogočili razločevanje med parazitnim in koristnim odbojem svetlobe, ali pa ločevanje svetlobnih poti oddane in odbite svetlobe.

Varianto s kratkimi pulzi smo želeli preizkusiti, realizacija pa ni bila možna. Izdelani lidar zaradi tehnoloških omejitev ni zmožen oddati zadovoljivo kratkih pulzov svetlobe. Omejevalni faktor je vezje za oblikovanje in proženje laserskega pulza. Tudi brez težav na oddajni strani, bi meritve z ekstremno kratkimi pulzi onemogočil sprejemnik. Transimpedančni ojačevalnik, ki je uporabljen v izdelanem lidarju, namreč ni bil zasnovan za doseganje ustrezno velike

pasovne širine. Poleg sprememb na oddajniku in sprejemniku, bi bilo potrebno uporabiti tudi drug časovnik. TDC7200 namreč za svoje delovanje zahteva širino pulza za zaustavitev meritve vsaj 10 ns, za razločevanje med parazitnim in koristnim odbojem pa bi bilo potrebno oddajati mnogo krajše pulze svetlobe. Za merjenje razdalje z uporabo izjemno kratkih svetlobnih pulzov bi bilo torej potrebno korenito spremeniti vse ključne dele lidarja.

Poleg nečistoč na zrcalu na meritev vplivajo tudi dodatne svetlobne poti, ki se lahko vzpostavljajo preko sosednjih zrcal. Kadar se odboj svetlobe v sprejemnik sklaplja preko le ene, primarne poti, je izmerjena razdalja preprosto vsota razdalje med lidarjem ter zrcalom in med zrcalom ter tarčo, meritve pa so primerljive z direktnimi. V nasprotnem primeru lahko nastane merilni pogrešek. S pomočjo simulacije je bilo ugotovljeno, da je zaznani signal vsota odbojev svetlobe od tarče, ki pa se v sprejemnik sklaplja preko več možnih poti. Te so lahko krajše ali daljše od primarne svetlobne poti, kar ponovno vpliva na obliko zaznanega pulza in izmerjeni čas preleta svetlobe. V okviru tega dela rešitev opisanega problema ni bila implementirana, identificirane pa so bile tri možne rešitve. Vplive sklapljanja svetlobe preko več svetlobnih poti je mogoče omiliti z uporabo lidarja z ožjim vidnim poljem ali manjših zrcal, potencialno pa je uporabno tudi oblikovanje vidnega polja z uporabo neravnih zrcal.

Poleg načina za prerazporejanje vidnih polj lidarja vzdolž robotovega segmenta je bila razvita tudi metoda za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor. Ta deluje na podlagi primerjave trenutnih meritev z referenčnimi. Ne glede na spreminjanje hitrosti izvajanja sprogramiranih gibov, se v vsakem trenutku pripadajoče referenčne meritve določijo na podlagi ujemanja robotovih notranjih spremenljivk, torej kotov ter normaliziranih hitrosti robotovih sklepov z vsebino referenčne tabele. Predlagana metoda je bila na robotu UR5e tudi preizkušena v več scenarijih. V vseh je bilo demonstrirano ustrezno delovanje.

Pri uporabi sistema za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor je probleme povzročala nizka vzorčna frekvenca uporabljenih senzorjev. Problemi so bili vidni predvsem v okolici hitrih preskokov merjene razdalje. Tam so senzorji mestoma zgrešili večjo razdaljo in zaznali manjšo, kar se je odrazilo kot negativno odstopanje od referenčnih meritev oziroma detekcija posega v robotov delovni prostor, zgodi pa se lahko tudi obratno. V času priprave sistema so bili sicer na razpolago tudi drugi kompaktni lidarji, med njimi so nekateri ponujali vzorčne frekvence do 1 kHz, a so delovali na principu AMCW. Takšni lidarji izkazujejo intenzivno medsebojno interferenco, razpoložljivi moduli pa niso omogočali enostavne sinhronizacije meritev za vzpostavitev prepletenega delovanja. S tem razlogom jih

za potrebe nadzora okolice robota ni bilo mogoče uporabiti. Možna ni bila niti uporaba lidarja, ki smo ga razvili za namene raziskav v smeri preusmerjanja vidnega polja, saj za potrebe uporabe na robotu ni bil dovolj kompakten.

Napram konkurenčnim rešitvam je opisani pristop za sprotno detekcijo nepričakovanega posega v robotov delovni prostor manj napreden in manj fleksibilen, vendar izjemno enostaven za implementacijo. Opazna omejitev v trenutni obliki je shranjevanje referenčnih vrednosti za celoten cikel in ne za posamezne gibe. Preskakovanje določenih delov programa torej ni mogoče, kar bi bilo potencialno problematično v primeru prelaganja predmetov iz palete, kadar je določene kose potrebno izpustiti iz nabora manipulacije. Problem je mogoče zaobiti s prilagoditvijo programa. Referenčne table bi morale shranjevati za vsak del cikla robotskih gibov posebej. Poleg te modifikacije v prihodnosti predlagamo tudi analizo dejanskih varnostnih razdalj med uporabo predlaganega varnostnega sistema s pomočjo zunanjega merilnega sistema.

Izvirni prispevki doktorske disertacije

- Izdelan raziskovalni modularni lidarski sistem z možnostjo opazovanja internih signalov.
- Preučeni vplivi nečistoč na zrcalih na meritve razdalje z uporabo lidarja pri preusmerjanju svetlobe izven lidarjevega mrtvega polja.
- Preučeni vplivi zrcal iz sosednjih preusmerjanjih svetlobnih poti lidarja na meritev razdalje.
- Razvit učinkovit algoritem za določanje pripadajočih referenčnih vrednosti meritev ne glede na hitrost izvajanja robotskih gibov

Literatura

- [1] E. H. Synge, „XCI. A method of investigating the higher atmosphere“, *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, let. 9, št. 60, str. 1014–1020, maj 1930, doi: 10.1080/14786443008565070.
- [2] E. A. Johnson, R. C. Meyer, R. E. Hopkins, in W. H. Mock, „The Measurement of Light Scattered by the Upper Atmosphere from a Search-Light Beam“, *JOSA*, let. 29, št. 12, str. 512–517, dec. 1939, doi: 10.1364/JOSA.29.000512.
- [3] G. S. Kent in R. W. H. Wright, „A review of laser radar measurements of atmospheric properties“, *J. Atmospheric Terr. Phys.*, let. 32, št. 5, str. 917–943, maj 1970, doi: 10.1016/0021-9169(70)90036-X.
- [4] M. Pickett, „Review of LIDAR for Air Quality Studies“, let. 52, str. 11–12, sep. 2018.
- [5] J. R. Smith, „Geodimeter“. Spectra Precision, julij 1998. Pridobljeno: 22. maj 2024. [Na spletu]. Dostopno na: http://www.geotronics.it/public/geodimeter_story.pdf
- [6] E. Bergstrand, „The geodimeter system: A short discussion of its principal function and future development“, *J. Geophys. Res.*, let. 65, št. 2, str. 404–409, feb. 1960, doi: 10.1029/JZ065i002p00404.
- [7] B. Saleh, „The Laser“, v *Optics in Our Time*, M. D. Al-Amri, M. El-Gomati, in M. S. Zubairy, Ur., Cham: Springer International Publishing, 2016, str. 71–85. doi: 10.1007/978-3-319-31903-2_4.
- [8] A. Javan, W. R. Bennett, in D. R. Herriott, „Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture“, *Phys. Rev. Lett.*, let. 6, št. 3, str. 106–110, feb. 1961, doi: 10.1103/PhysRevLett.6.106.
- [9] W. Koechner, „Q-Switching“, v *Solid-State Laser Engineering*, W. Koechner, Ur., Berlin, Heidelberg: Springer, 1999, str. 469–519. doi: 10.1007/978-3-662-14219-6_8.
- [10] F. J. McClung in R. W. Hellwarth, „Giant Optical Pulsations from Ruby“, *Appl. Opt.*, let. 1, št. S1, str. 103, jan. 1962, doi: 10.1364/AO.1.S1.000103.
- [11] C. Weitkamp, Ur., *Lidar*, let. 102. v Springer Series in Optical Sciences, vol. 102. New York: Springer-Verlag, 2005. doi: 10.1007/b106786.
- [12] „COLIDAR“, *J. Am. Soc. Nav. Eng.*, let. 73, št. 4, str. 681–684, nov. 1961, doi: 10.1111/j.1559-3584.1961.tb03324.x.
- [13] L. D. Smullin in G. Fiocco, „Optical Echoes from the Moon“, *Nature*, let. 194, št. 4835, str. 1267–1267, jun. 1962, doi: 10.1038/1941267a0.
- [14] G. Fiocco in L. D. Smullin, „Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60–140 km) by Optical Radar“, *Nature*, let. 199, št. 4900, str. 1275–1276, sep. 1963, doi: 10.1038/1991275a0.
- [15] Yu. L. Kokurin, „Laser Ranging of the Moon“, v *Lasers and Their Applications in Physical Research*, N. G. Basov, Ur., Boston, MA: Springer US, 1979, str. 161–226. doi: 10.1007/978-1-4757-0010-7_5.
- [16] J. O. Dickey *idr.*, „Lunar Laser Ranging: A Continuing Legacy of the Apollo Program“, *Science*, let. 265, št. 5171, str. 482–490, jul. 1994, doi: 10.1126/science.265.5171.482.
- [17] F. Peck in S. Walters, „New laser applications are reported in communications and medicine“, *Electr. Eng.*, let. 82, št. 6, str. 419–419, jun. 1963, doi: 10.1109/EE.1963.6541409.

- [18] K. Owczarz, „A review of geodetic and remote sensing methods used for detecting surface displacements caused by mining“, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, let. 609, št. 1, str. 012076, dec. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/609/1/012076.
- [19] S. Kumar Singh, B. Pratap Banerjee, in S. Raval, „A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining“, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, let. 33, št. 2, str. 133–154, feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.
- [20] W. Sun, Z. Wei, H. Sun, in H. He, „Review on the Application of Airborne LiDAR in Active Tectonics of China: Dushanzi Reverse Fault in the Northern Tian Shan“, *Front. Earth Sci.*, let. 10, jul. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.895758.
- [21] C. Glennie, W. Carter, R. Shrestha, in W. Dietrich, „Geodetic imaging with airborne LiDAR: The Earth's surface revealed“, *Rep. Prog. Phys. Phys. Soc. G. B.*, let. 76, str. 086801, jul. 2013, doi: 10.1088/0034-4885/76/8/086801.
- [22] J. Churnside, „Review of profiling oceanographic lidar“, *Opt. Eng.*, let. 53, str. 051405, maj 2013, doi: 10.1117/1.OE.53.5.051405.
- [23] W. Chen, P. Chen, H. Zhang, Y. He, J. Tang, in S. Wu, „Review of airborne oceanic lidar remote sensing“, *Intell. Mar. Technol. Syst.*, let. 1, št. 1, str. 10, okt. 2023, doi: 10.1007/s44295-023-00007-y.
- [24] J. Zhou, „A Review of LiDAR sensor Technologies for Perception in Automated Driving“, *Acad. J. Sci. Technol.*, let. 3, str. 255–261, nov. 2022, doi: 10.54097/ajst.v3i3.2993.
- [25] M. Elhousni in X. Huang, „A Survey on 3D LiDAR Localization for Autonomous Vehicles“, v *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, okt. 2020, str. 1879–1884. doi: 10.1109/IV47402.2020.9304812.
- [26] H. A. Ignatious, H.-E.- Sayed, in M. Khan, „An overview of sensors in Autonomous Vehicles“, *Procedia Comput. Sci.*, let. 198, str. 736–741, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procs.2021.12.315.
- [27] D. Costantino, G. Voza, M. Pepe, in V. S. Alfio, „Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges“, *Appl. Syst. Innov.*, let. 5, št. 4, Art. št. 4, avg. 2022, doi: 10.3390/asi5040063.
- [28] A. R. M. Cuperschmid, G. Neves de Oliveira, in Y.-A. Froner, „Exploring the Use of LiDAR in Smartphones: Documenting the Frontispiece of Saint Francis of Assisi Church in Ouro Preto, Brazil“, *Int. J. Archit. Herit.*, let. 0, št. 0, str. 1–18, 2024, doi: 10.1080/15583058.2024.2344163.
- [29] S. Sami, Y. Dai, S. R. X. Tan, N. Roy, in J. Han, „Spying with your robot vacuum cleaner: eavesdropping via lidar sensors“, v *Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Virtual Event Japan: ACM, nov. 2020, str. 354–367. doi: 10.1145/3384419.3430781.
- [30] P. Rybski, P. Anderson-Sprecher, D. Huber, C. Niessl, in R. Simmons, „Sensor fusion for human safety in industrial workcells“, v *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, okt. 2012, str. 3612–3619. doi: 10.1109/IROS.2012.6386034.
- [31] M. Bill, C. Müller, W. Kraus, in S. Bieller, „World Robotics 2023“, 2023.
- [32] International Organization for Standardization, *ISO 10218-1:2011*, 1. september 2011.
- [33] International Organization for Standardization, *ISO 12100:2010*, 1. september 2011.

- [34] International Organization for Standardization, *ISO 10218-2:2011*, 1. september 2011.
- [35] International Organization for Standardization, *ISO 13855:2010*, maj 2010.
- [36] S. Robla-Gómez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. González-Sarabia, C. Torre-Ferrero, in J. Pérez-Oria, „Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments“, *IEEE Access*, let. 5, str. 26754–26773, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773127.
- [37] M. Fechter, P. Foith-Förster, M. S. Pfeiffer, in T. Bauernhansl, „Axiomatic Design Approach for Human-robot Collaboration in Flexibly Linked Assembly Layouts“, *Procedia CIRP*, let. 50, str. 629–634, jan. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.04.186.
- [38] Z. Zhu in H. Hu, „Robot Learning from Demonstration in Robotic Assembly: A Survey“, *Robotics*, let. 7, št. 2, Art. št. 2, jun. 2018, doi: 10.3390/robotics7020017.
- [39] E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio, in G. Rosati, „Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review“, *Robotics*, let. 8, št. 4, Art. št. 4, dec. 2019, doi: 10.3390/robotics8040100.
- [40] International Organization for Standardization, *ISO/TS 15066:2016*, 15. februar 2016.
- [41] International Organization for Standardization, *ISO/DIS 10218-1:2020*, 1. februar 2021.
- [42] International Organization for Standardization, *ISO/DIS 10218-2:2020*, 1. februar 2021.
- [43] M. J. Rosenstrauch, T. J. Pannen, in J. Krüger, „Human robot collaboration - using kinect v2 for ISO/TS 15066 speed and separation monitoring“, *Procedia CIRP*, let. 76, str. 183–186, jan. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.01.026.
- [44] P. Chemweno in R.-J. Torn, „Innovative safety zoning for collaborative robots utilizing Kinect and LiDAR sensory approaches“, *Procedia CIRP*, let. 106, str. 209–214, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.180.
- [45] M. Fischer in D. Henrich, „3D Collision Detection for Industrial Robots and Unknown Obstacles Using Multiple Depth Images“, v *Advances in Robotics Research: Theory, Implementation, Application*, 2009, str. 111–122. doi: 10.1007/978-3-642-01213-6_11.
- [46] S. Pasinetti, C. Nuzzi, M. Lancini, G. Sansoni, F. Docchio, in A. Fornaser, „Development and Characterization of a Safety System for Robotic Cells Based on Multiple Time of Flight (TOF) Cameras and Point Cloud Analysis“, v *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, apr. 2018, str. 1–6. doi: 10.1109/METROI4.2018.8439037.
- [47] S. Tsuji in T. Kohama, „Proximity Skin Sensor Using Time-of-Flight Sensor for Human Collaborative Robot“, *IEEE Sens. J.*, let. 19, št. 14, str. 5859–5864, jul. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2905848.
- [48] Y. Ding, F. Wilhelm, L. Faulhammer, in U. Thomas, „With Proximity Servoing towards Safe Human-Robot-Interaction“, v *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, nov. 2019, str. 4907–4912. doi: 10.1109/IROS40897.2019.8968438.
- [49] M. Strong, C. Escobedo, in A. Roncone, „Volumetric Data Fusion of External Depth and Onboard Proximity Data For Occluded Space Reduction“, *ArXiv Prepr. ArXiv211011512*, 2021.
- [50] O. A. Adamides, A. S. Modur, S. Kumar, in F. Sahin, „A Time-of-Flight On-Robot Proximity Sensing System to Achieve Human Detection for Collaborative Robots“,

- v 2019 *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, avg. 2019, str. 1230–1236. doi: 10.1109/COASE.2019.8842875.
- [51] S. Tsuji in T. Kohama, „Proximity and Contact Sensor for Human Cooperative Robot by Combining Time-of-Flight and Self-Capacitance Sensors“, *IEEE Sens. J.*, let. 20, št. 10, str. 5519–5526, maj 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2969653.
- [52] U. B. Himmelsbach, T. M. Wendt, N. Hangst, in P. Gawron, „Single Pixel Time-of-Flight Sensors for Object Detection and Self-Detection in Three-Sectional Single-Arm Robot Manipulators“, v *2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, feb. 2019, str. 250–253. doi: 10.1109/IRC.2019.00046.
- [53] Z. Tong *idr.*, „An Ultrasonic Proximity Sensing Skin for Robot Safety Control by Using Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs)“, *IEEE Sens. J.*, let. 22, št. 18, str. 17351–17361, sep. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3068487.
- [54] C. Escobedo, M. Strong, M. West, A. Aramburu, in A. Roncone, „Contact anticipation for physical human–robot interaction with robotic manipulators using onboard proximity sensors“, v *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2021, str. 7255–7262.
- [55] K. Matsubara in K. Nagatani, „Improvement in Measurement Area of Three-Dimensional LiDAR Using Mirrors Mounted on Mobile Robots“, v *Field and Service Robotics*, G. Ishigami in K. Yoshida, Ur., v Springer Proceedings in Advanced Robotics. Singapore: Springer, 2021, str. 85–99. doi: 10.1007/978-981-15-9460-1_7.
- [56] K. Matsubara, K. Nagatani, in Y. Hirata, „Improvement in Measurement Area of 3D LiDAR for a Mobile Robot Using a Mirror Mounted on a Manipulator“, *IEEE Robot. Autom. Lett.*, let. 5, št. 4, str. 6350–6356, okt. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3013942.
- [57] R. Kümmerle, M. Ruhnke, B. Steder, C. Stachniss, in W. Burgard, „Autonomous Robot Navigation in Highly Populated Pedestrian Zones“, *J. Field Robot.*, let. 32, sep. 2014, doi: 10.1002/rob.21534.
- [58] T.-N. Nguyen, H.-H. Huynh, in J. Meunier, „3D Reconstruction With Time-of-Flight Depth Camera and Multiple Mirrors“, *IEEE Access*, let. 6, str. 38106–38114, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2854262.
- [59] K. Watanabe *idr.*, „Self-Contained Kinematic Calibration of a Novel Whole-Body Artificial Skin for Human-Robot Collaboration“, v *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2021, str. 1778–1785.
- [60] H. Alagi *idr.*, „Evaluation of On-Robot Capacitive Proximity Sensors with Collision Experiments for Human-Robot Collaboration“, v *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, okt. 2022, str. 6716–6723. doi: 10.1109/IROS47612.2022.9981490.
- [61] P. Maiolino, G. Cannata, A. Ascia, M. Maggiali, L. Natale, in G. Metta, „Large Scale Capacitive Skin for Robots“, v *Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges*, IntechOpen, 2012. doi: 10.5772/50468.
- [62] S. Phan *idr.*, „Capacitive skin sensors for robot impact monitoring“, v *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, sep. 2011, str. 2992–2997. doi: 10.1109/IROS.2011.6095083.

- [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.semanticscholar.org/paper/Photonic-Integrated-Circuit-FMCW-Lidar-On-A-Chip-Suni-Colosimo/0a47ca029bbbf11cacfc7c1f08338b7be95f4c5d>
- [79] F. Gindele, „Photonic Integrated Circuit based FMCW LiDAR for Automotive and Industrial Applications“, predstavljeno na EPIC meeting on CMOS Compatible Integrated Photonics, leuven, Belgija, september 2022.
- [80] F. Giovinazzo, F. Grella, M. Sartore, M. Adami, R. Galletti, in G. Cannata, „From CySkin to ProxySKIN: Design, Implementation and Testing of a Multi-Modal Robotic Skin for Human–Robot Interaction“, *Sensors*, let. 24, št. 4, Art. št. 4, jan. 2024, doi: 10.3390/s24041334.
- [81] C. Callenberg, Z. Shi, F. Heide, in M. B. Hullin, „Low-cost SPAD sensing for non-line-of-sight tracking, material classification and depth imaging“, *ACM Trans. Graph.*, let. 40, št. 4, str. 1–12, avg. 2021, doi: 10.1145/3450626.3459824.
- [82] „Importance of Beam Circularization“. Thorlabs. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Elliptical_Beam_Circularization_Lab_Fact.pdf
- [83] J. Ning *idr.*, „Collimation of laser diode beams for free space optical communications“, *Infrared Phys. Technol.*, let. 102, str. 102996, nov. 2019, doi: 10.1016/j.infrared.2019.102996.
- [84] „Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface“. ASTM, 15. avgust 2023. Pridobljeno: 22. februar 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/26795/a2e98d8ad97444ce9554a4c295fba45c/ASTM-G173-03.pdf>
- [85] M. Chevrier in G. Campanella, „How to build a LIDAR system with a time-to-digital converter“, *Analog Appl. J.*, 2017.
- [86] S. Piatek, „What is an SiPM and how does it work? | Hamamatsu Photonics“. Pridobljeno: 14. februar 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>
- [87] S. Piatek, „SiPM (silicon photomultipliers) and SPAD (single-photon avalanche photodiodes): Emerging applications for single-photon detection“, 17. januar 2019. Pridobljeno: 25. marec 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/resources/webinars/detectors/SiPM-and-SPAD.html>
- [88] „Photodetectors for LiDAR“. Hamamatsu Photonics k.k., marec 2023. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/Photodetector_lidar_kapd0005e.pdf
- [89] International Electrotechnical Commission, *IEC 60825-1:2014*, 2014. Pridobljeno: 14. februar 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://webstore.iec.ch/publication/3587>
- [90] P. E. Ciddor, „Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared“, *Appl. Opt.*, let. 35, št. 9, str. 1566–1573, mar. 1996, doi: 10.1364/AO.35.001566.
- [91] R. W. Austin in G. Halikas, „The Index of Refraction of Seawater“., Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, jan. 1976. doi: 10.21236/ADA024800.

- [92] S. Cherian, „What you need to know about transimpedance amplifiers – part 1“, maj 2016.
- [93] N. Quintero in T. Pirc, „How to Effectively Design and Optimize the TIA Interfaces of LIDAR Systems“, 2021.
- [94] S. Tancock, E. Arabul, in N. Dahnoun, „A Review of New Time-to-Digital Conversion Techniques“, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, let. 68, št. 10, str. 3406–3417, okt. 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2936717.
- [95] D. Guidry, „LIDAR-Pulsed Time-of-Flight Reference Design Using High-Speed Data Converters“. avgust 2017. Pridobljeno: 13. julij 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ti.com/lit/ug/tiduc73b/tiduc73b.pdf>
- [96] M. Adamič, „Časovno digitalni pretvornik visoke ločljivosti na čipu Xilinx Zynq-7010“.
- [97] J. Yang *idr.*, „A double threshold correction method for walk error in pulsed laser ranging system“, *Infrared Phys. Technol.*, let. 100, str. 28–36, avg. 2019, doi: 10.1016/j.infrared.2019.03.023.
- [98] K. H. Choe, U. C. Choe, in I. J. Ri, „Correction method for walk error based on the shape of reflective surface in LiDAR“, *Optik*, let. 279, str. 170527, maj 2023, doi: 10.1016/j.ijleo.2023.170527.
- [99] Willimas, George M., Jr., „Range-Walk Correction Using Time Over Threshold“. Allegro MicroSystems, 2021. Pridobljeno: 20. februar 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/p0179-tot-range-walk-correction>
- [100] iliasam, „Самодельный лидар: OpenTOFLidar“, Habr. Pridobljeno: 1. marec 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://habr.com/ru/articles/485574/>
- [101] A. Shpunt, N. Gilboa, in R. Upton, „Prism-based scanner“, US10488652B2, 26. november 2019
- [102] Daniel, Nelson CAROTHERS, „Compact Chip Scale LIDAR Solution.“, WO2017087951A1 Pridobljeno: 8. marec 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/058717979/publication/WO2017087951A1?q=pn%3DWO2017087951A1>
- [103] H. XIAOPING, H. HUAI, in X. JIEBIN, „Lidar Sensing System with Small Form Factor.“ [Na spletu]. Dostopno na: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/063669200/publication/CN110199204A?q=pn%3DCN110199204A>
- [104] L. Pogačnik in M. Munih, „Towards a Multi-Perspective Time of Flight Laser Ranging Device Based on Mirrors and Prisms“, *Appl. Sci.*, let. 12, št. 14, Art. št. 14, jan. 2022, doi: 10.3390/app12147121.
- [105] J. Kidd, „Performance Evaluation of the Velodyne VLP-16 System for Surface Feature Surveying“, *Masters Theses Capstones*, jan. 2017, [Na spletu]. Dostopno na: <https://scholars.unh.edu/thesis/1116>
- [106] Schott AG, „Schott N-BK7 datasheet“. Schott AG, 1. december 2023. Pridobljeno: 4. marec 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://media.schott.com/api/public/content/41e799d0bf874807a0bb8e702fbb75b5?v=54856406>
- [107] L. Pogačnik in M. Munih, „Modular Lidar System for Multiple Field-of-View Ranging“, *Sensors*, let. 24, št. 1, str. 84, dec. 2023, doi: 10.3390/s24010084.
- [108] R. Tu, „Ray Optics Simulation“, Ray Optics Simulation. Pridobljeno: 2. avgust 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://phydemo.app/ray-optics/>

- [109] A. Aalerud, J. Dybedal, in D. Subedi, „Reshaping Field of View and Resolution with Segmented Reflectors: Bridging the Gap between Rotating and Solid-State LiDARs“, *Sensors*, let. 20, št. 12, Art. št. 12, jan. 2020, doi: 10.3390/s20123388.
- [110] Universal Robots A/S, „Universal Robots e-Series User Manual“. 2020. Pridobljeno: 13. april 2024. [Na spletu]. Dostopno na: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/68265/99455_UR5e_User_Manual_en_US.pdf
- [111] J. Zupančič in T. Bajd, „Comparison of position repeatability of a human operator and an industrial manipulating robot“, *Comput. Biol. Med.*, let. 28, št. 4, str. 415–421, jul. 1998, doi: 10.1016/S0010-4825(98)00019-5.
- [112] International Organization for Standardization, *ISO 13849-1:2023*. Pridobljeno: 3. april 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.iso.org/standard/73481.html>
- [113] International Electrotechnical Commission, *IEC 62061:2021*. Pridobljeno: 3. april 2024. [Na spletu]. Dostopno na: <https://webstore.iec.ch/publication/59927>