## UNIVERZA V LJUBLJANI FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Peter Krapež

## ZMANJŠANJE NAPAK RADIJSKE LOKALIZACIJE V ZGRADBAH

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, 2021

Univerza *v Ljubljani* Fakulteta *za elektrotehnik*o



Tržaška cesta 25, p.p. 2999 1000 LJUBLJANA, Slovenija telefon: 01 476 84 11 faks: 01 426 46 30 www.fe.uni-Ij.si e-mail: dekanat@fe.uni-Ij.si

Spodaj podpisani študent, PETER KRAPEŽ, vpisna številka 64120043, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: ZMANJŠANJE NAPAK RADIJSKE LOKALIZACIJE V ZGRADBAH,

#### IZJAVLJAM,

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;
- 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;
- 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 sem od založnikov, na katere sem predhodno izključno prenesel materialne avtorske pravice na člankih, pridobil potrebna soglasja za vključitev člankov v tiskano in elektronsko obliko disertacije. Soglasja UL omogočajo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno hranjenje avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranje ter dajanje disertacije na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL.
- 8. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.
- 9. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V: Ljubljani Datum: 6. 9. 2021

Podpis študenta:

<sup>1</sup> Obkrožite varianto a) ali b).

## Zahvala

Za vse nasvete, pomoč in usmerjanje na moji raziskovalni poti kakor tudi med nastajanjem te doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Marku Munihu.

Zahvala gre vsem kolegom iz Laboratorija za robotiko, Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani za njihove nasvete in pomoč pri reševanju problemov tekom doktorskega študija, še posebej Petru Kmeclu za pomoč pri programiranju sistema za lokalizacijo.

Zahvaljujem se Gimnaziji Vič za izposojo telovadnice, kjer sem opravil del meritev za validacijo predstavljene metode, in Gašperju Štebetu za referenčne meritve pozicij svetilnikov, kar je omogočilo izračun rezultatov, predstavljenih v doktorski disertaciji.

Zahvalil bi se Laboratoriju za sevanje in optiko za opremo in pomoč pri meritvah moči, Sebastjanu Zorzutu, Instrumental Technologies, za meritve faznega šuma in podjetju RLS za pomoč pri strojni opremi.

Zahvala gre tudi Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), ki mi je omogočila izobraževanje na doktorskem študiju.

Zahvaljujem se svojim staršem in sestrama za podporo med študijem.

Nazadnje bi se zahvalil ženi Katarini za potrpežljivost in podporo v vseh trenutkih tekom študija.

Ireni

## Kazalo

Se	eznar	n uporabljenih kratic	xiii
Se	eznar	n uporabljenih simbolov	xv
Po	ovzet	ek	1
A	bstra	let	3
1	Uvo	od	5
	1.1	Avtomatska lokalizacija svetilnikov v lokalizacijskem sistemu	7
	1.2	Model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije med radij- skima enotama	9
	1.3	Cenilke sistemov za lokalizacijo	12
	1.4	Cilji	13
<b>2</b>	Me	rilni sistem za lokalizacijo	17
	2.1	UWB enote	17
	2.2	Meritev razdalje med UWB moduloma	20
	2.3	Sistem za lokalizacijo	23
	2.4	Geometrijski faktor GDOP	25
	2.5	Eksperimentalni postavitvi	27
		2.5.1 GDOP analiza	28
	2.6	Referenčne pozicije	32

2.6.1	Referenčne pozicije svetilnikov	33
2.6.2	Referenčna lega uporabnika	33
2.6.3	Združena referenčna sistema	33

\_\_\_\_\_

#### 3 Avtomatska lokalizacija svetilnikov v 3D prostoru z dodatnimi referenčnim enotami

rend	énim e	notami		35
3.1	Lokaliz	zacijske m	netode in cenilke	39
	3.1.1	Večdime	nzijsko skaliranje (MDS)	39
	3.1.2	Semidefi	nitno programiranje (SDP)	40
	3.1.3	Trilatera	cija (TRI)	40
	3.1.4	Napaka j	pozicije	41
3.2	Načrto	ovanje refe	erenčne plošče	42
	3.2.1	GDOP a	naliza referenčne plošče	42
	3.2.2	Simulaci	je	43
		3.2.2.1	Pozicija referenčne plošče in število referenčnih enot	44
		3.2.2.2	Višinska razlika med svetilniki in referenčno ploščo $\ .$ .	47
	3.2.3	Eksperin	nenti	50
		3.2.3.1	Meritve razdalj med svetilniki	52
		3.2.3.2	Umerjanje meritve razdalje med radijskimi moduli	53
		3.2.3.3	Referenčna plošča	54
		3.2.3.4	Postavitev svetilnikov in referenčne plošče	54
		3.2.3.5	Vpliv referenčne plošče na napako lokalizacije svetilnikov	55
		3.2.3.6	Neoptimalna pozicija referenčne plošče	59
		3.2.3.7	Avtomatska lokalizacija svetilnikov z referenčnimi eno-	
			tami v delovnem koordinatnem sistemu	60
	3.2.4	Razprava	a	61

4	Model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije uporab-			
	nika	a		65
	4.1	Upošt	evanje antene, ohišja in orientacije uporabnika z nevronsko mrežo	67
		4.1.1	Konfiguracija nevronske mreže	67
		4.1.2	Učna množica meritev	68
			4.1.2.1 Mehanizem za rotacijo uporabnika	68
			4.1.2.2 Meritve	69
		4.1.3	Učenje nevronske mreže	75
	4.2	Dodat	ni testi učne množice	81
		4.2.1	Zmanjšan obseg kotov učne množice	81
		4.2.2	Meritve moči	83
	4.3	Valida nika z	acija modela za upoštevanje antene, ohišja in orientacije uporab- nevronsko mrežo	84
		4.3.1	Izračun azimuta in elevacije	84
		4.3.2	Metoda za korekcijo izmerjene razdalje brez informacije o med- sebojni orientaciji uporabnika in svetilnika	86
		4.3.3	Eksperimentalne meritve	86
			4.3.3.1 Rezultati	88
			4.3.3.2 Uporaba modela v lokalizacijiskem sistemu	93
		4.3.4	Razprava	94
5	Zak	ljuček		97
Iz	virni	prispe	evki doktorske disertacije	103
Li	terat	ura		105
D	odate	ek A: ]	Dodatne približane meritve učne množice	115
D	odate	e <b>k B:</b> l	Dodatne meritve moči	125

Dodatek C: IEEE Transactions on Instrumentation	
and Measurements, 2020	133
Dodatek D: Sensors, 2021	147

\_\_\_\_\_

## Slike

2.1	Primer signala UWB impulznega radia	18
2.2	Zgradba fizične plasti paketa radia UWB po standardu IEEE 802.15.4 – 2011 UWB	19
2.3	Zgradba MAC plasti paketa po standardu IEEE 802.15.4 – 2011	19
2.4	Uporabniška enota z radijskim UWB modulom in ohišjem	21
2.5	Postavitev UWB enote v ohišju	21
2.6	Dvostranski dvosmerni prelet s štirimi sporočili	22
2.7	Uporabniški del merilnega sistema za lokalizacijo. Od leve proti desni: uporabniška enota, računalnik Raspberry Pi in baterija	23
2.8	Shema merilnega sistema za lokalizacijo skupaj z referenčnim sistemom Optotrak za meritve referenčne lege uporabnika.	24
2.9	Princip lokalizacije s trilateracijo v 2D	24
2.10	Primer dobre in slabe postavitve svetilnika	26
2.11	Lega 16 svetilnikov v telovadnici.	27
2.12	Postavitev svetilnikov na stojalih v telovadnici z referenčno ploščo v osrednjem delu prostora. Slika zajema levi del telovadnice s sredino	28
2.13	Postavitev svetilnikov na stojalih v telovadnici z referenčno ploščo v osrednjem delu prostora. Slika zajema desni del telovadnice s sredino	28
2.14	Lega 12 svetilnikov v Laboratoriju za robotiko	29
2.15	Faktor GDOP v odvisnosti od $x$ in $y$ pozicije uporabnika v telovadnici. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti faktorja	
	GDOP	30

2.16	Faktor GDOP v odvisnosti od $x$ in $y$ pozicije uporabnika v laboratoriju. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti faktorja GDOP	30
2.17	Faktor GDOP za uporabnika v središčni poziciji pri spremenljivi višini vsakega drugega svetilnika v telovadnici in laboratoriju.	31
2.18	Povprečni faktor GDOP za vse svetilnike pri spremenljivi višini vsakega drugega svetilnika v telovadnici in laboratoriju.	32
2.19	Uporabnik in infrardeče diode za referenčne meritve z Optotrakom. $\ .$ .	34
3.1	Primer popolne lokalizacije svetilnikov in umestitve dodatnih svetilnikov v obstoječ sistem.	36
3.2	Avtomatska lokalizacija svetilnikov z uporabo dodatnih referenčnih enot.	37
3.3	Blokovna shema postopka avtomatskege lokalizacije svetilnikov meril- nega sistema za lokalizacijo z uporabo dodatnih referenčnih enot. MER predstavlja matriko evklidskih razdalj in APE povprečno pozicijsko na- pako	38
3.4	Vrednosti faktorja $GDOP(x,y)$ za postavitev svetilnikov v telovadnici s štirimi referenčnimi enotami	43
3.5	Vrednosti faktorja $GDOP(x,y)$ za postavitev svetilnikov v laboratoriju s štirimi referenčnimi enotami.	44
3.6	Konfiguracije referenčnih enot, uporabljenih v simulacijah. Sivi kvadrati imajo dimenzije $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ .	45
3.7	Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče in konfiguracijo A0 za lokalizacijsko metodo MDS v telovadnici.	47
3.8	Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče in konfiguracijo A0 za lokalizacijsko metodo SDP v telovadnici	48
3.9	Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče in konfiguracijo A0 za lokalizacijsko metodo TRI v telovadnici.	49
3.10	Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče in konfiguracijo A0 za lokalizacijsko metodo MDS v laboratoriju	5(

e	3.11	Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče in konfiguracijo A0 za lokalizacijsko metodo SDP v laboratoriju.	51
e	3.12	Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče in konfiguracijo A0 za lokalizacijsko metodo TRI v laboratoriju.	52
e	3.13	Referenčna plošča s štirimi referenčnimi enotami za eksperimentalne me- ritve	54
e	3.14	Lega 16 svetilnikov v telovadnici z dimenzijama 28 m po os i $x$ in 20 m po osi $y$ z dvema pozicijama referenčn e plošče z dvema referenčnima enotama.	55
	3.15	Lega 12 svetilnikov v Laboratoriju za robotiko z dimenzijama 10 m po osi $x$ in 12 m po osi $y$ z dvema pozicijama referenčne plošče s štirimi referenčnimi enotami za namen popolne lokalizacije svetilnikov lokaliza- cijskega sistema	56
	3.16	Povprečne vrednosti APE, izračunane iz 40 ponovitev za vse lokaliza- cijske metode in za konfiguraciji A0 in A2 s standardnim odklonom za telovadnico.	57
ę	3.17	Povprečne vrednosti APE, izračunane iz 40 ponovitev za vse lokaliza- cijske metode in konfiguraciji A0 in A2 s standardnim odklonom za laboratorij.	58
2	4.1	Izmerjena razdalja med svetilnikom in uporabnikom pri različnih med- sebojnih orientacijah	66
2	4.2	Nevronska mreža, uporabljena za model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije med svetilnikom in uporabnikom.	68
2	4.3	Predstavitev orientacije po azimutu in elevaciji.	69
2	4.4	Mehanizem za rotacijo uporabnika po azimutu in elevaciji, uporabljen za meritve učnih razdalj pri različnih medsebojnih orientacijah uporabnika in svetilnika	69
2	4.5	Uporabnik v skrajnih orientacijah na mehanizmu za rotacijo	70
2	4.6	Shema merilnega eksperimenta za učno množico meritev	71
,	4.7	Množica meritev za učenje nevronske mreže.	72

4.8	Prikaz porazdelitve učnih meritev po azimutu in elevaciji za eno refe- renčno razdaljo med svetilnikom in uporabnikom	73
4.9	Približane učne meritve za referenčno razdaljo 4 m	74
4.10	Približane učne meritve za referenčno razdaljo 4,5 m	75
4.11	Učne meritve za referenčno razdaljo 4 m	76
4.12	Učne meritve za referenčno razdaljo 4,5 m	76
4.13	Prikaz spreminjanja izmerjene razdalje v odvisnosti od elevacije	77
4.14	Grafi povprečnih napak 10 različnih konfiguracij nevronskih mrež, pri- kazani za vsako lego uporabnika pri meritvah v laboratoriju.	78
4.15	Graf povprečne napake čez vse lege uporabnika, izračunan iz optimalnih nevronskih mrež v odvisnosti od števila nevronov v skriti plasti. Napake so izračunane na meritvah s sistemom za lokalizacijo.	79
4.16	Graf povprečne napake optimalnih nevronskih mrež v odvisnosti od števila nevronov v skriti plasti. Napake so izračunane na podmnožici učnih podatkov, ki niso bili uporabljeni pri učenju nevronskih mrež	80
4.17	Povprečna napaka nevronskih mrež z zmanjšanim obsegom elevacije v učnih množicah	82
4.18	Ocena moči prejetega signala prvega sporočila za 15 referenčnih razdalj učne množice	84
4.19	Izračun azimuta in elevacije.	85
4.20	Izmerjena in popravljena razdalja med svetilnikom in uporabnikom pri različnih medsebojnih orientacijah.	87
4.21	Napaka izmerjene in popravljene razdalje med svetilnikom in uporabni- kom pri različnih medsebojnih orientacijah	88
4.22	Lega 12 svetilnikov v laboratoriju in šest leg uporabnika pri meritvah za validacijo modela napake v odvisnosti od medsebojne orientacije uporabnik-svetilnik.	89
4.23	Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za prvo lego uporabnika	90

4.24	Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za drugo lego uporabnika	91
4.25	Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za tre- tjo lego uporabnika	91
4.26	Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za četrto lego uporabnika	92
4.27	Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za peto lego uporabnika	92
4.28	Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za šesto lego uporabnika	93
4.29	Povprečna napaka razdalj do 12 svetilnikov v eksperimentu s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju	94
A.1	Približane učne meritve za referenčni razdalji 1 m in 1,5 m	117
A.2	Približane učne meritve za referenčni razdalji 2 m in 2,5 m	118
A.3	Približane učne meritve za referenčni razdalji 3 m in 3,5 m	119
A.4	Približane učne meritve za referenčni razdalji 5 m in 5,5 m	120
A.5	Približane učne meritve za referenčni razdalji 6 m in 6,5 m $\ldots$	121
A.6	Približane učne meritve za referenčni razdalji 7 m in 7,5 m	122
A.7	Približane učne meritve za referenčno razdaljo 8 m	123
B.8	Ocena moči prejetega signala prvega sporočila za 15 referenčnih razdalj učne množice.	127
B.9	Postavitev sistema pri dodatnih meritvah moči.	128
B.10	Obsegi azimuta in elevacije pri dodatnih meritvah moči	128
B.11	Ocenjena moč prejetega signala z originalno anteno v plastičnem ohišju v vertikalni in horizontalni polarizaciji.	129
B.12	Ocenjena moč prejetega signala z originalno anteno brez plastičnega ohišja v vertikalni in horizontalni polarizaciji.	130
B.13	Ocenjena moč prejetega signala z lijak anteno z adapterjem HP G281A v vertikalni in horizontalni polarizaciji.	131

## Tabele

2.1	Središčne frekvence in pasovne širine UWB kanalov	18
2.2	Nastavitev komunikacijskega kanala UWB, ki je bila uporabljena pri meritvah.	20
2.3	Maksimalne razlike med pozicijami svetilnikov za scenarija v telovadnici in laboratoriju	29
3.1	Faktor GDOP za postavitev svetilnikov v telovadnici, kjer je bilo upo- rabljenih 16 svetilnikov (16S), in v Laboratoriju za robotiko, kjer je bilo uporabljenih 12 svetilnikov (12S), pri različnem številu referenčnih enot (1K, 2K, 3K in 4K).	37
3.2	Obsegi premikov referenčne plošče v simulacijah za scenarija v telova- dnici in laboratoriju.	45
3.3	Rezultati simulacij APE za konfiguracije referenčne plošče A0, A1, A2, A4, A9 ter A16 in tri lokalizacijske metode za scenarija v telovadnici in laboratoriju.	46
3.4	Rezultati simulacij APE z uporabo konfiguracije A2 referenčne plošče, kjer se je spreminjala višinska razlika med referenčno ploščo in najvišje ležečimi svetilniki	49
3.5	Povprečna napaka in standardni odklon meritev razdalj med svetilniki v telovadnici in laboratoriju za prvo pozicijo referenčne plošče	51
3.6	Maksimalne višinske razlike med svetilniki in referenčnimi enotami v telovadnici in laboratoriju.	55

3.7	Eksperimentalen APE za prvo pozicijo (P1) referenčne plošče za konfi- guraciji A0 in A2 ter oba scenarija. Rezultati so prikazani za tri lokali- zacijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1)	57
3.8	Eksperimentalen APE za drugo pozicijo (P2) referenčne plošče za kon- figuraciji A0 in A2 ter za oba scenarija. Rezultati so prikazani za tri lokalizacijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1)	60
3.9	Rezultati avtomatske lokalizacije svetilnikov z referenčnimi enotami v delovnem koordinatnem sistemu. Rezultati so prikazani za tri lokaliza- cijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1)	60
4.1	Količina podatkov v poslanem paketu za izmerjeno razdaljo, diagno- stične podatke in impulzni odziv kanala (CIR) za izbrano opremo – DWM1000 in konfiguracijo kanala.	67
4.2	Merilni parametri pri učni množici meritev razdalj in njihovi obsegi	71
4.3	Povprečna napaka za različna števila nevronov v nevronski mreži	78
4.4	Povprečni časi učenja nevronskih mrež za različna števila nevronov v skriti plasti	79
4.5	Napake izbrane nevronske mreže in meritve razdalj, izračunane na pod- množicah učnih meritev, ki niso bile uporabljene pri učenju nevronske	
	mreže	80
4.6	Povprečne napake nevronskih mrež z obsegom elevacije v učnih množicah $-80:80, -50:50$ in $-40:40$ pri eksperimentalnih meritvah s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju.	82
4.7	Razpon merjenih parametrov pri eksperimentu z merilnim sistemom za lokalizacijo v laboratoriju pri šestih legah uporabnika in 12 svetilnikih.	88
4.8	Povprečna, maksimalna in minimalna napaka za šest leg uporabnika z uporabljenim modelom, korekcijami brez informacije o medsebojni ori- entaciji uporabnika in svetilnika in surove meritve razdalje	93
4.9	Rezultat lokalizacije z in brez uporabe modela napake.	95
	o 1 T	-

# Seznam uporabljenih kratic

OPIS				
označbe konfiguracij referenčne plošče v simulacijah				
povprečna pozicijska napaka (ang. Average Positional				
Error)				
povratna nevronska mreža (ang. Backpropagation Neu-				
impulgni odziv kanala (ang. Channel Impulge Perpenge)				
impuisin odzīv kanala (ang. Channel impuise Response)				
ural Network)				
globalni pozicijski sistem				
radijska vidljivost (ang. Line-of-Sight)				
najmanjši kvadrat (ang. Least Squares)				
večdimenzijsko skaliranje (ang. Multidimensional Sca-				
ling)				
matrika evklidskih razdalj				
radijska zastrtost (ang. Non-line-of-sight)				
nevronska mreža (ang. Neural network)				
efektivna vrednost napake (ang. Root Mean Square				
ror)				
prejeta moč signala (ang. Received Signal Strength In-				
dicator)				
semidefinitno programiranje (ang. Semidefinite Pro-				
gramming)				
čas razlike prihoda (ang. Time-Difference-of-Arrival				

TOA	čas prihoda (ang. Time-of-Arrival)
TOF	čas preleta (ang. Time-of-Flight)
TRI	iterativna trilateracija
UWB	ultra široko pasovno (ang. Ultra-Wideband)

# Seznam uporabljenih simbolov

SIMBOL	ENOTA	OPIS
$\mathbf{a}_i$		pozicija <i>i</i> -tega svetilnika
$O_{delavni}$		delavni koordinatni sistem merilnega sistema za
		lokalizacijo
$\widehat{T}_{TOF}$	S	izračunan čas preleta
$T_{\check{c}akanje1}$	S	čas med oddajo prvega sporočila na napravi A
		in sprejemom prvega odgovora naprave B
$T_{\check{c}akanje2}$	S	čas med oddajo prvega sporočila na napravi B
		in sprejemom drugega odgovora naprave A
$T_{odgovor1}$	S	čas med sprejetjem prvega sporočila in oddajo
		prvega odgovora na napravi B
$T_{odgovor2}$	S	čas med sprejetjem prvega sporočila in oddajo
		drugega odgovora na napravi A
$T^A_{tx1}$	S	časovna značka ob oddaji prvega sporočila na
		napravi A
$T^A_{rx1}$	S	časovna značka ob sprejemu prvega odgovora na
		napravi A
$T^A_{tx2}$	S	časovna značka ob oddaji drugega odgovora na
		napravi A
$T^B_{rx1}$	S	časovna značka ob sprejmu prvega sporočila na
		napravi B
$T^B_{tx1}$	S	časovna značka ob oddaji prvega odgovora na
		napravi B
$T^B_{rx2}$	S	časovna značka ob sprejemu drugega odgovora
		na napravi B

d	m	izračunana razdalja med enotami
$\hat{d}$	m	popravljena razdalja med enotami
$\Delta h$	m	višinska razlika med enotami
$\Delta t$	S	časovna razlika med dvema časovnima kora-
		koma

## Povzetek

V doktorski disertaciji predstavljamo izboljšanje radijskega merilnega sistema za lokalizacijo v zgradbah. Merilni sistemi za lokalizacijo so sestavljeni iz dveh podsistemov: stacionarnih enot – svetilnikov, katerih položaje poznamo, in mobilnih enot – uporabnikov, katerih položaje določamo. Doktorska disertacija sega na področje obeh podsistemov, z zmanjšanjem napake lokalizacije svetilniških enot z uporabno dodatnih referenčnih svetilnikov in možnostjo enostavnega dodajanja novih svetilnikov v sistem ter z zmanjšanjem napake meritve razdalje med uporabnikom in svetilnikom zaradi njune medsebojne orientacije.

V prvem delu disertacije je opisan merilni sistem za lokalizacijo, ki smo ga razvili v Laboratoriju za robotiko. Predstavljen sistem temelji na širokopasovni radijski komunikaciji, ki za merjenje razdalje med dvema radijskima moduloma uporablja smer preleta. Za izide meritev simulacij in eksperimentalnih validacij smo načrtovali in realizirali dva scenarija. Prvega smo izvedli v telovadnici, v velikem, odprtem prostoru, drugega pa v Laboratoriju za robotiko, ki kot manjši prostor z ovirami predstavlja realno okolje za delovanje merilnih sistemov za lokalizacijo. Pri obeh je bila izvedena analiza geometrijskega faktorja postavitve svetilnikov in uporabnika. Tej sledi prikaz referenčnih sistemov in postopki meritev lege uporabnika in referenčnih položajev svetilnikov.

Drugi del disertacije se poglobi v hitro avtomatsko lokalizacijo svetilnikov, katerih položaj v delovnem koordinatnem sistemu ni znan. Za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov uporabimo dodatne referenčne enote. Postopek omogoča preprosto dodajanje svetilnikov v obstoječ sistem za lokalizacijo z izboljšano lokalizacijo novih svetilnikov. Predstavljena sta (i) postopek avtomatskege lokalizacije svetilnikov z uporabo dodanih referenčnih enot na referenčni plošči za izboljšanje lokalizacije svetilnikov in (ii) analiza vpliva referenčne plošče na lokalizacijo svetilnikov. Skozi poglavje se zvrstijo analize treh lokalizacijskih metod: večdimenzijsko skaliranje, semidefinitno programiranje in iterativna trilateracija. Vse analize so izvedene v dveh scenarijih, ki sta bila uporabljena tudi pri eksperimentalni validaciji metode avtomatske lokalizacije svetilnikov z dodatnimi referenčnimi enotami. V prvem delu simulacij je predstavljena analiza vpliva števila referenčnih enot in njihov položaj na lokalizacijo svetilnikov. S spreminjanjem položaja referenčni plošče je določen njen optimalen položaj. V drugem delu simulacij je opisana analiza vpliva višinske razlike med svetilniki in referenčno ploščo.

Sledi eksperimentalna validacija postopka avtomatske lokalizacije svetilnikov z referenčnimi meritvami položajev svetilnikov z uporabo elektronskega tahimetra. Prikazana je dodatna analiza vpliva pozicije referenčne plošče na lokalizacijo svetilnikov z meritvama referenčne plošče na dveh pozicijah. Na koncu je predstavljen celovit postopek avtomatske lokalizacije svetilnikov z referenčno ploščo v delovnem koordinatnem sistemu. Izveden je bil v drugem scenariju s štirimi referenčnimi enotami na referenčni plošči. Končni rezultat avtomatske lokalizacije svetilnikov je bil 0,32 m napake v 3D prostoru.

Tretji del doktorske disertacije sestavljajo opis in rezultati modela napake pri meritvi razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije svetilnika in uporabnika, zgrajenega z metodo nevronskih mrež. Za točnejšo lokalizacijo uporabnika potrebujemo točnejše meritve razdalje med svetilniki in uporabnikom. Manjšo napako izmerjene razdalje dosežemo s kompenzacijo napake razdalje v odvisnosti od orientacije. Opisan je mehanizem, ki omogoča rotacijo uporabnika po azimutu in elevaciji in ki je bil razvit za meritve učne množice za nevronsko mrežo. Predstavljena je analiza ustreznosti učnih meritev z nevronskimi mrežami, naučenimi s spremenjenimi učnim meritvami in z meritvami moči prejetega signala. Nato je prikazana izbira števila nevronov v nevronski mreži iz nabora mrež z različnimi konfiguracijami. Sledi validacija izbrane nevronske mreže s podmnožico učnih meritev, ki ni bila uporabljena pri učenju.

Postopek eksperimentalne validacije vključuje meritve v Laboratoriju za robotiko z merilnim sistemom za lokalizacijo. Validacija je izvedena s primerjavo z referenčnima sistemoma elektronski tahimeter in Optotrak. Predstavljeni so rezultati meritev uporabnika v šestih legah z uporabo modela za zmanjšanje napake pri meritvi medsebojne razdalje med uporabnikom in svetilnikom. Uporaba modela napake je izboljšala izmerjeno razdaljo za 0,02 m. Disertacija se zaključi s prikazom delovanja modela pri lokalizaciji uporabnika.

**Ključne besede:** 3D lokalizacija svetilnikov, avtomatska lokalizacija svetilnikov, referenčne enote, širokopasovni radio, merilni sistem za lokalizacijo, meritve razdalje, orientacija uporabnika, model napake meritve razdalje

### Abstract

I NDOOR localisation systems have two principal subsystems, stationary units – anchors, for which positions must be known and mobile units – tags, which positions are determined with the localisation system. In the doctoral thesis, both subsystems are addressed to overall improve the indoor localisation system.

In the first part of the thesis, a localisation system with Ultra-Wideband radio is described. The system measures the distance between anchor and tag with the time-of-flight method. Two scenarios used in simulations and experimental validations are presented. The first scenario was placed in a gym, presenting a big open space. The second was in the Laboratory of Robotics, presenting realistic conditions with obstacles and NLOS conditions, the environment in which localisation systems typically operate. Then an analysis of geometric dilution of precision for anchors and tag for both scenarios is performed. Reference systems and procedures for anchor position and tag pose are described.

For the anchor system, a quick calibration is desirable for the new anchors that are positionally undetermined in the working coordinate system. In the second part of the thesis, anchor calibration with an additional calibration unit for improving anchor localisation is presented, and its effect is analysed. Three localisation methods were tested for the anchor calibration: multidimensional scaling, semidefinite programming and iterative trilateration.

First anchor localisation accuracy was studied by simulating the change in the number of additional calibration modules and their positions. Analysis of the calibration unit's optimal position is presented. All analyses are conducted for both scenarios. In the second part of the simulations, an analysis of the effect of the height difference between anchors and the calibration unit is presented.

Experimental validation of anchor calibration was performed in two scenarios with reference measurements made by an electronic tachymeter. Additional analysis of the calibration unit's position effect on anchor localisation is presented. Finally, complete anchor calibration in a working coordinate system with four calibration modules on the calibration unit is conducted. Errors of less than 0,32 m are achieved in 3D.

In the third part of the doctoral thesis, orientation-induced distance error between anchor and tag is addressed. Model based on neural network is presented. A mechanism for rotation of the tag around the azimuth and elevation plane that is used in measurements for learning datasets is described. Analysis of the learning data set with additional neural networks and measurements of received power is presented, which confirmed the correctness of the measurements. For defining the number of neurons in the hidden layer of the neural network, many neural networks with different configurations were made. Validation of selected neural network configuration on a subset of training data not used in the learning process was performed.

For experimental validation of the neural network model, measurements were made with the localisation system in the Laboratory of Robotics. Reference measurements were made in combination with an electronic tachymeter and Optotrak reference system. Measurement results of tag in six poses with the use of the neural network model are presented. The use of the model improved the measured distances for 0,02 m. In the end, the effect of the model on tag localisation is presented.

**Key words:** 3D anchor localization, anchor calibration, calibration modules, position measurement, time-of-flight, ultra-wideband technology, real-time localization system, distance measurement, error mitigation, tag orientation

# 1 Uvod

L OKALIZACIJA je z razvojem brezžične tehnologije postala del naših življenj na vseh področjih. Radijska lokalizacija se je začela s sistemoma Gee in LORAN za vojaške namene lokalizacije ladij in letal, ki sta imela dosega do nekaj 1000 kilometrov, in z začetno točnostjo od sprva nekaj 10 kilometrov do kasneje nekaj 100 metrov. Razvoj radijske komunikacije in izdelava preciznih ur sta kasneje omogočila satelitsko komunikacijo. S tem smo dobili splošno rešitev za globalni navigacijski satelitski sistem (GNSS), ki nam omogoča točnost lokalizacije do nekaj metrov z uporabo široko uporabljenih GNSS naprav v naših mobilnih napravah [1]. GNSS lokalizacija je široko uporabljena pri vsakodnevnih aplikacije na naših mobilnih napravah. Uporaba GNSS pa je omejena na zunanje prostore, kjer satelitski signal ni prekinjen. Ta omejite onemogoča lokalizacijo mobilnih platform v notranjih prostorih, na primer v domovih, bolnišnicah, skladiščih in tovarnah. V primeru lokalizacije v zgradbah se je razširila uporaba radijskih tehnologij Wi-Fi [2], Bluetooth [3], GSM [4], RFID [5] in široko pasovni radio (ang. Ultra-Wideband, UWB) [6].

V lokalizaciji je UWB radijska tehnologija že široko uporabljena in je področje mnogih raziskav [7–11] ter dosegljiva kot končni produkt [12]. UWB radio ima zaradi široke pasovne širne nizko časovno ločljivost, kar omogoča točne meritve časov prejetja signala v primerjavi z ostalimi radijskimi tehnologijami. UWB radio je s svojimi lastnostmi zanimiv za mnoga področja uporabe v reševalnih aplikacijah [13], v domovih za ostarele [14], industrijskih okoljih za lokalizacijo osebja in stvari [15, 16], v rudnikih [17], za lokalizacijo električnih avtomobilov na polnilnih postajah [18] in lokalizacijo letečih dronov [19].

Pri lokalizaciji potrebujemo razdalje med stacionarnimi enotami – svetilniki (ang. Anchor), katerih pozicije so poznane, in mobilno enoto – uporabnikom (ang. Tag). Meritve razdalje med dvema radijskima enotama lahko izvedemo z metodo časa prihoda signala (ang. Time-of-Arrival, TOA) [20], razlike v času prihoda signala (ang. TimeDifference-of-Arrival, TDOA) [21], kota prihoda signala (ang. Angle-of-Arrival, AOA) in moči prejetega signala (ang. Received Signal Strength Indicator, RSSI) [22–24]. Pri metodi TOA poznamo čas preleta signala (ang. Time-of-Flight, TOF).

Kot omenjeno za delujoč lokalizacijski sistem potrebujemo svetilnike nameščene po prostoru na znanih pozicijah. Postopek določanja pozicij svetilnikov lahko izvedemo z uporabo geodetskih tahimetrov, ki lahko z veliko točnostjo izmerijo pozicijo odbojnih tarč v prostoru. Tak način sicer omogoča dobro določanje pozicije, a zahteva merilno opremo – tahimeter, namestitev odbojnih tarč na mesta kjer so postavljeni svetilniki in znanje za izvedbo meritev. V primeru enkratne postavitve lokalizacijskega sistema je lahko taka rešitev primerna. Nasprotno je pri dodajanju svetilnikov za razširitev delovnega področja lokalizacijskega sistema ali spremembi delovnega področja zaradi sprememb v delovnem okolju, kjer bi tak način določanja pozicije svetilnikov zmanjšal razširljivost sistema za lokalizacijo. V ta namen potrebujemo postopek, ki omogoča hitro lokalizacijo novih ali premaknjenih svetilnikov brez uporabe dodatne merilne opreme. Żeleno omogoča lokalizacija svetilnikov na podlagi razdalj med vsemi pari svetilnikov, kar je mogoče izvesti s svetilniki. Pri lokalizaciji se merijo razdalje med uporabnikom in svetilniki, na enak način lahko postopoma izmerimo razdalje med vsemi svetilniki. Tako lahko uporabimo že obstoječo opremo za nove meritve, s katerimi lokaliziramo svetilnike. Problem se pojavi pri točnosti lokalizacije zaradi geometrijske postavitve svetilnikov. Pri 3D lokalizaciji potrebujemo za dobro točnost lokalizacije približno enake razlike med pozicijami svetilnikov po vseh treh dimenzijah koordinatnega sistema. V realnem okolju smo po z – koordinatni (višini) omejeni z višino prostora, kot maksimalno možno višino postavitve svetilnikov, kot tudi z višinsko razliko med svetilnik saj svetilnikov ne moramo postaviti na višino tal namreč s tako postavitvijo povečamo verjetnost ovir med uporabnikom in svetilnikom ter zmanjšamo točnost meritve razdalje.

Drugi problem, ki ga doktorska disertacija rešuje je napaka pri izmerjeni razdalji med uporabnikom in svetilnikom, ki je odvisna zaradi njune medsebojne orientacije. Med meritvami s sistemom lokalizacijo smo opazili spremembe pri izmerjenih razdaljah med tem, ko se je uporabnik vrtel na mestu. Podobna opažanja so zapisana tudi v literaturi. Med tem ko se uporabnik premika po delovnem prostoru, se medsebojne orientacije med uporabniško radijsko enoto in svetilniškimi enotami spreminjajo. To pomeni, da je po celotnem delovnem prostoru uporabnika pri lokalizaciji prisotna dodatna napaka, ki je odvisna lega uporabnika. Ker do sedaj še ni bila izvedena korekcija te napake za namen izboljšanja lokalizacije uporabnika, smo zgradili model napak z nevronsko mrežo, ki je vključen v algoritme za meritve razdalj in lokalizacijo.

### 1.1 Avtomatska lokalizacija svetilnikov v lokalizacijskem sistemu

Avtomatska lokalizacija svetilnikov izhaja iz problema lokalizacije senzornih sistemov. Načine lokalizacije senzorjev in svetilnikov delimo glede na dva glavna pristopa. Prvi je globalni, kjer se pozicija že obstoječih enot in novih enot izračuna hkrati. Drugi je iterativni pristop, kjer se postopoma lokalizira nove enote.

Med globalne pristope spada večdimenzijsko skaliranje (ang. Multidimensional Scaling, MDS) [25, 26]. Za lokalizacijo senzorjev se uporabi njihove medsebojne razdalje, ki se jih predstavi kot matriko podobnosti. Shang in ostali [27] so predstavili metodo, ki za lokalizacijo izkorišča samo informacijo o povezljivosti med senzorji. Druga metoda z globalnim pristopom je semidefinitno programiranje (ang. Semidefinite Programming, SDP), ki s konveksno optimizacijo minimizira linearno funkcijo, ki definira problem lokalizacije senzorjev [28, 29]. Drusvyatskiy in ostali [29] predstavijo rešitev za dopolnjevanje manjkajočih razdalj med senzorji.

Iterativni pristop so uporabili Goldenberg in ostali [30] z algoritmom, imenovanim sweep. Metoda namesto iterativne trilateracije uporablja bilateracijo, ki omogoča lokalizacijo več senzorjev. Na ta način obstajata dve možni poziciji novega senzorja. Vse možnosti so dodane v nabor možnih rešitev, ki se uporabijo za lokalizacijo nadaljnjih senzorjev. Število možnih rešitev tako hitro naraste. Avtorji so pokazali način, kako zmanjšati število potencialnih pozicij senzorjev z odstranitvijo manj primernih. Savvides in ostali [31] so uporabili iterativno trilateracijo z možnostjo decentraliziranega izvajanja. Metoda omogoča povezovanje senzorjev, ki nimajo neposredne povezave, v skupno mrežo. Drug decentraliziran lokalizacijski algoritem so predstavil Priyantha in ostali [32] in za lokalizacijo senzorjev uporablja model masa-vzmet.

Lokalizacije svetilnikov kot stacionarne enote lokalizacijskega sistema so se lotili Kuang in ostali [33] s faktorizacijo informacijske matrike, ki vsebuje informacijo o razdaljah med svetilniki. Za rešitev problema mora biti znano število svetilnikov, ki oddajajo, in svetilnikov, ki sprejemajo signal. Batston in ostali [34] so uporabili faktorizacijo informacijske matrike z omejitvijo ranga matrike za detekcijo osamelcev. Glavni del raziskave je bil osredotočen na reševanje manjkajočih razdalj med svetilniki in iskanje osamelcev v meritvah razdalj. Z reševanjem problema grafov manjših dimenzij s kasnejšim združevanjem delnih rešitev s skupnimi svetilniki so prišli do globalne rešitve pozicij svetilnikov.

Zhou in ostali [35] so pristopili k reševanju lokalizacije svetilnikov z metodo rotacijske razlike v času prihoda signala (ang. Rotational Time-Difference-of-Arrival, RTDOA) za meritve medsebojnih razdalj in multidimenzionalnim skaliranjem kot lokalizacijskim algoritmom. Avtorji so pokazali hitro naraščanje točnosti lokalizacije s povečanjem števila svetilnikov na deset. Algoritem za lokalizacijo svetilnikov, predstavljen v [36], izračuna več rešitev z večdimenzijskimi nelinearnimi najmanjšimi kvadrati. Glede na tri cenilne funkcije je izbrana končna rešitev iz nabora rešitev z različnimi začetnimi vrednostmi.

Nakamura in ostali [37] so reševali problem lokalizacije svetilnikov z uporabo algoritma *sweep* iz [30], kjer se iterativno dodaja svetilnike v nabor razrešenih svetilnikov, če imamo meritev razdalje do izbranega svetilnika in predhodno znane pozicije vsaj štirih svetilnikov za 3D prostor.

Müller in ostali [38] ter Van de Velde in ostali [39] so v postopku lokalizacije svetilnikov uporabili dodatno enoto. Dodatna enota je uporabljena samo v času lokalizacije svetilnikov in ni del svetilniškega sistema med normalnim delovanjem merilnega sistema za lokalizacijo. Müller in ostali [38] so predstavili postopek lokalizacije svetilnikov, ki uporablja bilateracijo. Najprej se lokalizira začetne svetilnike, na osnovi katerih se nato lokalizira preostale svetilnike. Za vsako rešitev, ki nastane z različnimi začetnimi svetilniki, se izračuna napaka rekonstruiranih razdalj in nato se kombinacijo z najmanjšo napako razglasi za rešitev. Namen dodatne enote je v povezovanju svetilnikov, ki nimajo neposredne povezave z ostalimi svetilniki. Van de Velde in ostali [39] so predstavili tehniko lokalizacije svetilnikov, ki je podobna hkratni lokalizaciji in kartiranju (ang. Simultaneous Localization and Mapping, SLAM). Namesto senzorjev za zaznavanje okolice uporablja radijsko povezavo med svetilniki in dodatno enoto. Operater pri lokalizaciji svetilnikov premika dodatno enoto po prostoru in izmeri razdalje med enoto in svetilniki. Če se dodatna enota premika po ravni črti, je mogoče določiti vse razdalje med svetilniki.

### 1.2 Model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije med radijskima enotama

Pri meritvah razdalje med dvema radijskima enotama prihaja do odstopanja med oceno izmerjene razdalje in dejanske razdalje. Izmerjeno razdaljo skupaj z napakami lahko modeliramo z analitičnimi modeli ali metodami strojnega učenja na podlagi meritev. Prednost analitičnih modelov je v tem, da glede na izbran model radijskega kanala določimo njegove parametre in imamo delujoč model meritve razdalje. Na drugi strani pa je uspešnost delovanja modela odvisna od njegove kompleksnosti. Več individualnih virov napak meritve razdalje kot smo uspeli analitično opisati in jih vključiti v model, boljše rezultate lahko dosega model. Pogosto se vse ostale vire, ki jih ne znamo opisati zapišemo z naključnim členom v modelu. To pa privede do odstopanja modela v situacijah, ki niso analitično modelirane. Slaba stran modelov, ki imajo vključenih veliko virov napak, pa je povečana kompleksnost in povečano število parametrov.

V radijski lokalizaciji se pogosto uporablja določanje razdalje med radijskimi enotami na podlagi ocene moči prejetega signala. Tam se uporablja modele upadanja moči v radijskem kanal kot so: model upadanja moči v praznem prostoru, model upadanja moči pri širjenju v realnem prostoru, Nakagami model, Rayleigh model, Ricean model, itd. [40–44].

Naš sistem uporablja za lokalizacijo oceno razdalje med svetilniki in uporabnikom, ki jo izračunamo iz časa preleta radijskega signala med svetilnikom in uporabnikom. V takih sistemih se izmerjeno razdaljo pogosto modelira z [20]:

$$\hat{d}_i = d_i + b_i + n_i = ct_i, \tag{1.1}$$

kjer je  $t_i$  čas preleta časa med uporabnikom (u) in i-tim svetilnikom  $(a_i)$ , c je hitrost potovanja elektromagnetnega valovanja,  $d_i$  je pravilna razdalja med svetilnikom in uporabnikom,  $n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$  je dodan Gaussov beli šum z varianco  $\sigma_i^2$  in  $b_i$  je pozitivna dodana vrednost prisotna zaradi ovire med svetilnikom in uporabnikom podane z:

$$b_i = \begin{cases} & \text{ ``e } a_i \leftrightarrow u \text{ je } LOS \\ & \text{ ``e } a_i \leftrightarrow u \text{ je } NLOS, \end{cases}$$
(1.2)

kjer  $a_i \leftrightarrow u$  predstavlja radijsko povezavo med i-tim svetilnikom in uporabnikom. Vrednost napake zaradi NLOS pogojev je v literaturi modelirana z eksponentno porazdelitvijo [45, 46], enakomerno porazdelitvijo [47, 48], Gaussovo porazdelitvijo [49], s konstanto čez časovno okno [50] in glede na empiričen model pridobljen z meritvami [51, 52]. Alavi in ostali [53] so člena  $b_i$  in  $n_i$  iz enačbe 1.1 nadomestili:

$$e = e_M + \xi e_U, \tag{1.3}$$

kjer je  $e_M$  napaka razdalje zaradi odbitih poti radijskega signala,  $e_U$  je napaka zaradi nezaznavne direktne poti radijskega signala in  $\xi$  je spremenljivka ki ima vrednost 1 v primeru dogodka nezaznavne prve poti in 0 v nasprotnem.

Kljub temu, da je analitične modele lažje implementirat zaradi njihove enostavnosti in manjše računske zahtevnosti ne omogočajo točnosti, ki jo lahko dosežemo z metodami strojnega učenja. Z dovolj velikimi učnimi množicami, ki zajemajo različne razmere, lahko razširimo uporabnost takih modelov na različna okolja in razmere. Zaradi velikih računskih zmogljivosti strojne opreme, predstavljajo alternativo matematičnemu empiričnemu modeliranju napak meritev. V doktorski disertaciji smo se usmerili v nevronske mreže kot metode strojnega učenja zaradi široke sposobnosti modeliranja nelinearnih pojavov in velike možnosti prilagajanja kompleksnosti zgradbe modela.

Wu in ostali so v [54] uporabili nevronsko mrežo (NN) z RSSI ter barvno sliko s kamere kot vhodni signal in ocenjeno razdaljo med enotama kot izhodni signal. V odprtih scenarijih so dosegli napako ocenjene razdalje 0,5 m oziroma 0,9 m v scenarijih z objekti v bližini enot. Chen in ostali [41] so predstavili model meritve razdalje glede na RSSI (model izgube moči na poti), zgrajen iz povratne nevronske mreže (ang. Backpropagation Neural Network, BNN). Model je imel v simulacijah boljše rezultate kot klasični analitični modeli izgube poti in lastnost prilagajanja specifičnemu okolju s povprečno napako ocenjene razdalje 0,34 m.

Schmid in ostali v [55] so raziskali uporabo metode strojnega učenja pri zmanjševanju napake izmerjene razdalje z dodatnimi diagnostičnimi podatki, z namenom zmanjšanja vplivov odbojev signala. Z nevronsko mrežo in desetimi vhodnimi parametri, ki jih posreduje radijska enota, so zmanjšali napako razdalje s 0,08 m na 0,035 m. Pokazali so, da je napako mogoče zmanjšati že z uporabo samo dveh parametrov. Bregar in ostali [56] so uporabili dve konvolucijski nevronski mreži (CNN) z impulznim odzivom kanala (ang. Channel Impulse Response, CIR) kot vhodnim parameterom za zmanjševanje napake izmerjene razdalje in zaznavo pogojev radijske zastrtosti (ang. Non-Line-of-Sight, NLOS). Pokazali so, da model za zmanjšanje napake deluje bolje kot model zaznave pogojev NLOS. Skupno delovanje je izboljšalo lokalizacijo v primerjavi z metodo najmanjših kvadratov (ang. Least-Squares, LS) in uteženih najmanjših kvadratov (ang. Weighted-LS, WLS). S sistemom desetih svetilnikov WLS in obema CNN so dosegli povprečno napako lokalizacije 0,113 m.

Do zdaj smo predstavili dela, ki so uporabila metode strojnega učenja za zmanjševanje napake izmerjene razdalje in izboljšanje lokalizacije, in to brez uporabe informacije o orientaciji med radijskima enotama. Pri radijskih enotah je namreč prisotna napaka, ki je odvisna od medsebojne orientacije antene na obeh enotah. To napako so predstavili in odpravljali Merkl in ostali [57] pri sistemu za lokalizacijo TDOA. V simulacijah s pogoji radijske vidljivosti (ang. Line-of-Sight, LOS) in 1,24 mm šuma so dosegli pod milimetrsko napako v sistemu z desetimi svetilniki. V primeru uporabe manjšega števila svetilnikov napaka ni padla pod milimetrske vrednosti.

Sharma in ostali [58] so analizirali napako zaradi orientacije antene pri meritvi razdalje z metodo TOA. V eksperimentih so izmerili razdalje pri petih različnih orientacijah za dve ravnini. Izmerjene napake so bile različne za vsako orientacijo. Minimalna napaka razdalje, ki so jo izmerili, je bila 0,001 m in maksimalna 0,045 m. Napako zaradi različnih orientacij antene znotraj avtomobila so analizirali Blumenstein in ostali [59]. Vplive orientacije in odbojev so opazovali s CIR.

Modeliranja napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije UWB radijskih enot so z uporabo nevronske mreže prikazali Tiemann in ostali [60]. Za analizo napake pri rotaciji enote UWB po treh oseh so poleg izmerjene razdalje uporabili še CIR. Za uporabljeno enoto so predlagali os, v kateri je napaka v odvisnosti od orientacije enote najmanjša. Ko so rezultat nevronske mreže preverili na podmnožici učnih podatkov, ki jih niso uporabili v postopku učenja, so dosegli povprečno napako razdalje 0,01 m.

Napake izmerjene razdalje zaradi medsebojne orientacije dveh enot UWB je možno modelirati z metodami strojnega učenja. Potrebne so še raziskave za možnost implementacije takih modelov v merilne sisteme za lokalizacijo. V večini predhodnih raziskav so uporabljali CIR in dodatne diagnostične podatke, ki jih določni tipi enot UWB omogočajo. S tem se omejimo na specifično opremo, zato je smiselno raziskati možnosti modeliranja orientacijske napake s preprostejšim modelom, ki zaradi svojih vhodnih parametrov ni odvisen tipa uporabljene UWB enote.

#### 1.3 Cenilke sistemov za lokalizacijo

Lokalizacijski sistemi so uporabljeni v različnih aplikacijah, ki delujejo v različnih okoljih in pod različnimi pogoji [14–16, 19, 61–63]. Za vsako namembnost so določene lastnosti lokalizacijskega sistema bolj pomembne. Glede na potrebe aplikacije se lahko določi sisteme, ki po cenilkah najbolje ustrezajo. Cenilke, po katerih se ocenjuje lokalizacijske sisteme, so opisane v nadaljevanju [6, 23, 64–67].

- Točnost, kjer za matematičen opis kvalitete meritve (merilnega sistema) uporabljamo statistične izraze: pogrešek, standardni odklon [68]. S temi statističnimi pojmi lahko s številkami opišemo točnost meritve in jih primerjamo z ostalimi merilnimi sistemi. Te pojme opišemo s tremi izrazi: natančnost, pravilnost in točnost. Meritve so natančne, če imajo majhen naključni pogrešek. Meritve so pravilne, če je odstopanje povprečne vrednosti meritev od referenčne vrednost majhno. Končno so meritve točne, če so natančne in pravilne [69, 70].
- Dosegljivost, ki določa čas znotraj katerega je storitev lokalizacije mogoča za mobilnega uporabnika v odstotkih znotraj zahtevane točnosti. Splošno se deli dosegljivost v tri stopnje: nizka dosegljivost (pod 95 %), normalna dosegljivost (nad 99 %) in dobra dosegljivost (nad 99,9 %) [65].
- Delovno področje, ki dimenzijsko opisuje področje, v katerem lokalizacijski sistem deluje z najmanjšo delovno celico. Področja obstoječih sistemov so med 5 in 50 metrov.
- Razširljivost, ki določa sposobnost lokalizacijskega sistema glede povečanja števila uporabnikov v sistemu, njegove površine ali prostornine, v kateri se lahko lokalizirajo. Število uporabnikov oziroma gostota uporabnikov v sistemu določa število uporabnikov na geografsko enoto na časovno enoto, ki ga je sistem sposoben lokalizirati pri ohranitvi vseh ostalih lastnosti. Sistem se je sposoben razširiti na večje področje in pri tem ohraniti enake lastnosti, kot jih je imel pred razširitvijo. Oba primera se najlažje doseže z dodatnimi svetilniki v sistemu.
- *Cena*, ki vključuje ceno opreme, čas namestitve in vzdrževanja, porabo energije ter težo in dimenzije uporabniške in svetilniške enote.
- Varnost, ki določa dostopnost osebnih podatkov za zunanje uporabnike. Med te
podatke spadajo podatki, povezani z lokalizacijo, in drugi podatki, ki so posredovani preko radijske komunikacije.

 Frekvenca osveževanja, ki določa hitrost osveževanja novo izračunane pozicije uporabnika v lokalizacijskem sistemu. Sistemi se ločijo na tiste, kjer število uporabnikov ne vpliva na frekvenco osveževanja pozicije in na tiste, kjer povečano število uporabnikov zmanjša maksimalno frekvenco osveževanja.

V okvirih doktorske disertacije se bomo v prvem delu lotili izboljšanja točnosti avtomatske lokalizacije svetilnikov v izbranem delovnem koordinatnem sistemu. S predstavljeno metodo za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov, ki vključuje dodatne referenčne enote, povečamo točnost lokalizacije svetilnikov, omogočamo povečanje delovnega področja ter povečamo razširljivost lokalizacijskega sistema. V drugem delu povečamo točnost meritve razdalje in posledično točnosti ocene lokalizacije uporabnika v lokalizacijskem sistemu. Za ta namen uporabimo model zgrajen z nevronske mreže za korekcijo napake pri izmerjeni razdalji, ki je odvisna od medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika.

## 1.4 Cilji

Pri radijski lokalizaciji je veliko dejavnikov, ki vplivajo na končno točnost lege iskanega objekta – uporabnika. Vsaka izboljšava v lokalizacijskem sistemu prispeva h končni izboljšavi lokalizacije. Za namene izboljšanja sistema za lokalizacijo smo razvili sistem, ki temelji na UWB radijski tehnologiji. Z uporabo najnovejših metod smo izboljšali lokalizacijo in uporabnost takega sistema. V disertaciji bomo izvedli naslednje vmesne cilje:

1. Avtomatska lokalizacija stacionarnih modulov v 3D prostoru z referenčnimi enotami in evalvacija vpliva referenčnih enot na lokalizacijo stacionarnih enot. Za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov bomo primerjali tri lokalizacijske metode (MDS, SDP in iterativno trilateracijo). S simulacijami bomo analizirali metode in vplive različnih parametrov namestitve svetilnikov in referenčnih enot na točnost lokalizacije svetilnikov. Lokalizacijske metode, uporabljene pri simulacijah, se bodo uporabile na podatkih, pridobljenih iz meritev na UWB merilnem sistemu. Merilni sistem bo sestavljen iz enot s komunikacijskim modulom s tehnologijo UWB radia na svetilnikih, uporabnika in dodatnih referenčnih svetilnikih. Za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov bo razvita programska oprema za merjenje razdalj med enotami in pripravo meritev razdalj za lokalizacijske algoritme. Za evalvacijo avtomatske lokalizacije svetilnikov na UWB merilnem sistemu bodo uporabljene referenčne pozicije svetilnikov, pridobljene z geodetskimi meritvami z elektronskim tahimetrom. Meritve bodo izvedene v dveh različnih konfiguracijah. Prve meritve bodo izvedene v večjem praznem zaprtem prostoru s simetrično namestitvijo svetilnikov. Druge meritve bodo izvedene v manjšem prostoru z ovirami, svetilniki pa bodo nameščeni glede na omejitve prostora. Tako bomo dobili meritve iz kompleksnejšega okolja, ki predstavlja pogoje, kjer naj bi sistem za lokalizacijo deloval.

- 2. Upoštevanje vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote na meritev razdalje na podlagi meritev. Oblika in material ohišja, lastnosti antene in fizična zasnova UWB enote vnašajo merilno napako, vendar so časovno nespremenljivi, kar omogoča modeliranje njihovih vplivov. Za modeliranje skupnih vplivov na izmerjeno razdaljo bomo razvili merilni sistem, ki bo omogočal meritve razdalje med dvema enotama pri znani medsebojni orientaciji. Na podlagi meritev razdalj pri različnih medsebojnih orientacijah in razdaljah bomo z metodami strojnega učenja (ang. feedforward nerual network, FNN) pridobili model vpliva ohišja in sevalnega diagrama antene.
- 3. Validacija modela ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote v lokalizacijskem sistemu. Validacija modela vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote v lokalizacijskem sistemu bo narejena z referenčnim optičnim sistemom OptoTrak in geodetskimi meritvami referenčnih točk s tahimetrom. Model vplivov bomo validirali pri posamezni meritvi razdalje in v lokalizacijskem algoritmu. Za validacijo modela vplivov bo razvit lokalizacijski algoritem z vključenim modelom napake.

V okviru doktorske disertacije smo razvili sistem za lokalizacijo, ki temelji na široko pasovni radijski komunikaciji. Razvili smo metodo za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov v poljubno izbranem koordinatnem sistemu z uporabo dodatnih referenčnih enot. Izvedli smo analizo vpliva postavitve in števila dodatnih referenčnih enot na točnost ocene lokalizacije svetilnikov. Izvedli smo model za korekcijo napake izmerjene razdalje med svetilnikom in uporabnikom, ki je zgrajen iz nevronske mreže. V doktorski disertacij se ukvarjamo z lokalizacijo svetilnikov in lokalizacijo uporabnika v sistemu za lokalizacijo v 3D prostoru. Čeprav je v nekaterih aplikacijah potrebna lokalizacija uporabnika samo v 2D prostoru, saj je njegova višina znana ali pa se na sploh lokalizacija izvaja samo v 2D prostoru, je lokalizacija v 3D prostoru zanimiva za mnoge aplikacije, ki zahtevajo pozicioniranje uporabnika tudi po višini [17, 19, 71]. Možne izboljšave lokalizacije uporabnika v 3D prostoru pa lahko povečajo uporabnost sistemov za lokalizacijo v 3D prostoru.

Doktorska disertacija je razdeljena na tri poglavja. V poglavju 2 je opisana merilna oprema uporabljena skozi celotno doktorsko disertacijo ter eksperimentalna scenarija. Poglavje 3 opisuje tematiko avtomatske lokalizacije svetilnikov z uporabo dodatnih referenčnih enot. Končno poglavje 4 pa predstavlja korekcijo napake pri meritvi razdalje med svetilnikom in uporabnikom zaradi njune medsebojne orientacije.

# 2 Merilni sistem za lokalizacijo

V tem poglavju je predstavljen merilni sistem za lokalizacijo uporabnika. Opisali smo radijske module in vse sestavne dele celotnega lokalizacijskega sistema, uporabljenega v disertaciji. Opisana je analiza geometrijskega faktorja postavitve svetilnikov in uporabnika. Predstavljena sta sistema in postopki za meritve referenčnih pozicij svetilnikov in lege uporabnika, ki so bili nato uporabljeni pri vseh meritvah v dveh eksperimentalnih prostorih – telovadnica Gimnazije Vič in Laboratorij za robotiko.

## 2.1 UWB enote

Za meritve razdalj med uporabnikom in svetilniki smo uporabili ultra široko pasovni radio (ang. Ultra-Wideband, UWB). UWB radio uporablja sredinske frekvence večje od 2,5 GHz in pasovno širino vsaj 500 MHz oziroma 20 % sredinske frekvence. Regulativa za UWB določa omejitev oddane moči na -41,3 dBm/MHz in delovanje znotraj 3,1-10,6 GHz frekvenčnega pasu. Zaradi velike pasovne širine radio UWB dosega visoko časovno ločljivost – oddan signal je lahko v časovnem prostoru zelo ozek (kratek impulz) [72–74].

Poznamo tri glavne tipe radia UWB, prvi uporablja neprekinjeno oddajanje signala s spreminjajočo frekvenco znotraj izbranega frekvenčnega pasu – frekvenčna modulacija. Tovrsten način omogoča natančno določanje časa preleta, vendar so potrebne večje antene, kar zmanjšuje uporabnost v ročnih napravah, kot so npr. pametni telefoni.

Drugi tip je UWB impulzni radio, ki omogoča hitro določanje časa preleta med dvema napravama in ga uporablja naš UWB modul. Prenos informacije je s časovnimi impulzi, ki trajajo nekaj ns ali manj. Uporablja se *time-hopping* kodo, kjer vsak impulz leži na določenem intervalu  $T_C$ , ki je znotraj časovnega okvirja  $T_f$ , kar zmanjšuje možnost prekrivanja impulzov (slika 2.1). Pozicija impulza znotraj intervala  $T_f$  prenaša informacijo.



Slika 2.1: Primer signala UWB impulznega radia.

Tretji tip je uporaba več nosilnih frekvenc s kombinacijo CDMA (ang. Code-Division Multiple-Access), MC-CDMA (ang. Multicarrier Code-Division Multiple-Access), MC-DS-CDMA (ang. Multicarrier Direct-Sequence Code-Division Multiple-Access) in MT-CDMA (ang. Multitone Code-Division Multiple-Access). MC sistemi so zahtevni za implementacijo in so manj zanimivi za dostopno lokalizacijsko in komunikacijsko tehnologijo.

V doktorski disertaciji uporabljamo široko pasovni impulzni radijski modul Deca-Wave DWM1000, ki deluje po IEEE 802.15.4-2011 standardu. Izbran radio omogoča 6 komunikacijskih kanalov, prikaznih v tabeli 2.1, z dvema pasovnima širinama 500 MHz oziroma 900 MHz. Preko UWB radia se pošlje IEEE 802.15.4 – 2011 standarden paket,

Kanal	Srednja frekvenca / GHz	Pasovna širina / MHz
1	3494,4	499,2
2	3993,6	499,2
3	4492,8	499,2
4	3993,6	900,0
5	6489,6	499,2
7	6489,6	900,0

Tabela 2.1: Središčne frekvence in pasovne širine UWB kanalov.

ki je sestavljen iz preambule, začetka mejnika okvirja (ang. Start Frame Delimiter, SFD), glave fizične plasti (PHR) in poljubnih podatkov, kot je prikazano na sliki 2.2. Sprejemnik filtrira sprejete signale in išče izbrano preambulo. Ob uspešno zaznani preambuli, se nadaljuje branje in dekodiranje sporočila. Začetek mejnika okvirja označuje začetek fizične plasti paketa. Po standardu je sestavljen iz 8 ali 64 znakov. Preambula in SFD, ki sta del sinhronizacije glave, sta zakodirana z enojnimi UWB impulzi. Algoritem DWM1000 modula ob trenutku zaznave SFD označi čas prejetja ali oddaje sporočila, ki se ga uporabi za izračun razdalje med sprejemnikom in oddajnikom. PHR <u>določa do</u>lžino in hitrost nadaljnjih podatkov. Za del paketa PHR in PODATKI se uporabi kombinacijo BPM (angl. Burs Position Modulation) in BPSK (angl. Binary Phase Shift Keying) za modulacijo simbolov, ki so sestavljeni iz zaporedja UWB impulzov. Po IEEE 802.15.4 – 2011 standardu so določene hitrosti prenosa podatkov za podatkovni del paketa: 110 kb/s, 850 kb/s, 6,8 Mb/s ter 27 Mb/s.



Slika 2.2: Zgradba fizične plasti paketa radia UWB po standardu IEEE 802.15.4 – 2011 UWB

IEEE 802.15.4 – 2011 standard določa tudi povezovalno plast MAC (angl. Medium Access Control)(slika 2.3), ki zaseda del PODATKOV v UWB paketu. DWM1000 nima izvedene implementacije povezovalne plasti MAC, ampak je to naloga programa, ki se izvaja na mikroprocesorju, ki kontrolira DW1000 radijski modul. So pa znotraj DWM1000 enote pripravljene funkcije, za lažjo izvedbo MAC povezovalne plasti (preverjanje ciklične redundance, filtriranje okvirja, avtomatska potrditev).

Glava MAC plasti					C plas	sti	MAC podatki	Noga MAC plasti	
	Kontrola okvirja	Zap. številka	Ciljni PAN ID	Ciljni naslov	Izvorni PAN ID	vrni I ID naslov Varnostni protokol Okvir podatkov		Okvir podatkov	FCS
	2 okteta	1 oktet	0 ali 2 okteta	0,2,8 oktetov	0 ali 2 okteta	0,2,8 oktetov	0,5,6,10,14 oktetov	Spremenljivo število oktetov	2 okteta

Slika 2.3: Zgradba MAC plasti paketa po standardu IEEE 802.15.4 – 2011

Komunikacija med DWM1000 radii ima osem nastavitvenih parametrov. Številka kanala določa frekvenčno območje. PRF parameter (ang. Pulse Repetition Frequency) določa frekvenco impulzov pri oddajanju preambule in podatkov. PLEN parameter določa število simbolov v preambuli. PAC parameter (ang. Preamble Acquisition Chunk) predstavlja število simbolov v preambuli, ki so korelirani med seboj. TX PC in RX PC parametra predstavljata izbrano kodo preambule, ki je namenjena samo za oddane in prejete pakete. SFD parameter pove, ali je izbrana standardna opcija, določena po standardu IEEE 802.15.4 – 2011, ali nestandardna, določena s strani proizvajalca Decawave, ki omogoča bolj robustno meritev smeri preleta. Parameter hitrost določa hitrost prenosa podatkov. Parametri, uporabljeni pri eksperimentalnih meritvah, so prikazani v tabeli 2.2.

Tabela 2.2: Nastavitev komunikacijskega kanala UWB, ki je bila uporabljena pri meritvah.

Parameter	Vrednost		
Kanal	4		
PRF	64 MHz		
PLEN	128 simbolov		
PAC	8 simbolov		
TX PC	18		
RX PC	18		
SFD	1		
Hitrost	$6,8 \mathrm{~Mb/s}$		

Svetilniki in uporabniki so zgrajeni iz UWB modulov. Moduli so sestavljeni iz tiskanega vezja, na katerem je široko pasovni impulzni radijski modul DecaWave DWM1000, STM32L4 mikroprocesorski čip in USB vhod (slika 2.4 (a)). UWB moduli so zaščiteni v ohišju iz ABS plastike z debelino sten 1,5 mm, ki je zasnovano tako, da omogoča pritrjevanje UWB modula na pripravljena držala (slika 2.4 (b)), ki jih lahko namestimo na stojala ali stenska držala. Postavitev UWB enote z anteno je simetrična glede na širino ohišja (sliki 2.5 (a)). Ohišje je zasnovano tako, da se UWB enota čvrsto pritrdi v ohišje in preprečuje premik antene znotraj ohišja (slika 2.5 (b)).

## 2.2 Meritev razdalje med UWB moduloma

Za izračun razdalje med svetilnikom in uporabnikom potrebujemo čas preleta  $\widehat{T}_{TOF}$ , ki ga izračunamo z metodo za dvosmerno določanje smeri preleta, kot je prikazano na sliki 2.6 [75]. Svetilnik in oddajnik si izmenjata tri sporočila, pri katerih se zabeleži skupaj šest časovnih značk (trenutek, ko je sporočilo sprejeto in oddano). Četrto sporočilo je za pošiljanje značk s svetilnika k uporabniku. Enota A odda prvo sporočilo in si zabeleži trenutek, v katerem je bilo sporočilo oddano  $T_{tx1}^A$ . Ko sprejme odgovor enote B, si zabeleži trenutek prejetja sporočila v časovno značko  $T_{rx1}^A$ . Pri zadnjem oddanem



Slika 2.4: (a) Uporabniška/svetilniška enota z radijskim UWB modulom; (b) zaščitno ohišje za tiskano vezje.



Slika 2.5: (a) Prikaz postaviteve UWB antene znotraj ohišja; (b) prikaz ohišja od zadaj brez UWB enote.

sporočilu si zabeleži čas oddaje sporočila v časovno značko  $T_{tx2}^A$ . Na drugi strani enota B pri sprejemu prvega sporočila s strani enote A shrani čas prejetja sporočila v časovno značko  $T_{rx1}^B$ , ko odda odgovor, si čas oddaje sporočila shrani v  $T_{tx1}^B$ . Pri sprejemu zadnjega sporočila enote A si shrani čas sprejema v  $T_{rx2}^B$ . Iz časovnih značk se izračuna čas za pripravo odgovora  $T_{odgovor}$  in čas čakanja na odgovor  $T_{čakanje}$  za obe enoti:

$$T_{\check{c}akanje1} = T_{rx1}^{A} - T_{tx1}^{A}$$

$$T_{\check{c}akanje2} = T_{rx2}^{B} - T_{tx1}^{B}$$

$$T_{odgovor1} = T_{tx1}^{B} - T_{rx1}^{B}$$

$$T_{odgovor2} = T_{tx2}^{A} - T_{rx1}^{A}.$$
(2.1)



Slika 2.6: Dvostranski dvosmerni prelet s štirimi sporočili.

Čas preleta se nato izračuna [75]:

$$\widehat{T}_{TOF} = \frac{T_{\check{c}akanje1} \times T_{\check{c}akanje2} - T_{odgovor1} \times T_{odgovor2}}{T_{\check{c}akanje1} + T_{\check{c}akanje2} + T_{odgovor1} + T_{odgovor2}},$$
(2.2)

razdalja med enotama UWB je nato:

$$d = \widehat{T}_{TOF} \times c_0, \tag{2.3}$$

kjer je  $c_0$  hitrost potovanja elektromagnetnega valovanja.

Prednost uporabljene enačbe je v tem, da ne potrebujemo enakih časov  $R_c$  in  $R_d$  med sprejetjem in oddajo sporočila na obeh napravah. Poleg izbrane metode za izračun časa preleta poznamo še dve predhodni metodi: simetrično določanje smeri preleta in osnovno verzijo dvosmernega določanja smeri preleta [76]. Pri prvi se napaka izračunanega časa preleta povečuje z večanjem razlike med časoma  $R_c$  in  $R_d$ , od koder tudi ime metode. Druga metoda uporablja izmenjavo dveh sporočil, napaka pa je odvisna od časa med sprejemom in oddajo sporočila na drugi napravi [75].

Na točnost meritve razdalje pri času preleta kot omenjeno poleg natančnost ure, ki se uporablja za izračun časa sprejema sporočila vpliva tudi izbira metode za izračun časa preleta. Močen vpliv na napako izmerjene razdalje predstavljajo razmere v radijskem kanalu med dvema radijskima enotama. Razmere v radijskem kanalu delimo na radijsko vidljive v primeru ko med radijskim oddajnikom in sprejemnikom ni prisotne ovire in radijska zastrtost, ko je med njima prisotna ovira. V primeru ovir na poti radijskega kanala pride do povečanja izmerjene razdalje med radijskima moduloma, saj je hitrost širjenja radijskega signala v ovirah počasnejše kot v zraku. Na točnost izmerjene razdalje lahko vplivajo tudi odboji v primeru, ko je moč direktnega signala med radijskima enotama zmanjšan do te mere, da v impulznem odzivu kanale ni več prepoznaven in je odbit signal prepoznan kot direktni signal. Vzrok za napako pri meritvi razdalje je tudi smerni sevalni diagram antene, namreč antena ne seva na vse strani enakomerno. To pomeni, da že samo zaradi neenakomernih sevalnih diagramov pridobimo napako pri meritvi razdalje pri različni orientaciji antene. Na napako izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije uporabnika vpliva tudi vse kar je trdno pritrjeno okoli radijske antene, to so vsa električna vezja za delovanje radijskega modula in obdelavo signalov ter zaščitno ohišje.

## 2.3 Sistem za lokalizacijo

Merilni sistem za lokalizacijo je sestavljen iz stacionarnih enot – svetilnikov in mobilne enote – uporabnika. Svetilniški moduli so napajani z baterijo preko USB povezave. Vsa komunikacija med svetilniki in uporabnikom poteka preko UWB radijske povezave. Uporabniška enota UWB modula je povezana z Raspberry Pi računalnikom preko USB povezave. Raspberry Pi računalnik je napajan z USB povezavo preko baterije (slika 2.7). Z osebnega računalnika lahko preko Wi-Fi-ja dostopamo do podatkov na Raspberry Pi računalniku (slika 2.8). Za namen sinhronizacije meritev sistema za lokalizacijo in referenčnega sistema Optotrak za meritve referenčnih pozicij uporabnika smo zajem meritev izvajali v Simulinku.



Slika 2.7: Uporabniški del merilnega sistema za lokalizacijo. Od leve proti desni: uporabniška enota, računalnik Raspberry Pi in baterija.

Za lokalizacijo uporabljamo metodo trilateracije oziroma multilateracije. Za izračun pozicije potrebujemo meritve razdalj med svetilniki in uporabnikom ter pozicije svetilnikov. Za lokalizacijo v 2D prostoru potrebujemo vsaj 3 svetilnike, tako s sekanjem



Slika 2.8: Shema merilnega sistema za lokalizacijo skupaj z referenčnim sistemom Optotrak za meritve referenčne lege uporabnika.

treh krožnic dobimo sečišče, ki določa pozicijo uporabnika (slika 2.9). V 3D prostoru potrebujemo vsaj 4 svetilnike, da se štiri krogle sekajo v eni točki.



Slika 2.9: Princip lokalizacije s trilateracijo v 2D.

Pri znanih pozicijah svetilnikov in razdaljah do uporabnika za 2D prostor zapišemo tri enačbe z dvema neznankama:

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{a}_1\|^2 = d_1^2$$
  

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{a}_2\|^2 = d_2^2$$
  

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{a}_3\|^2 = d_3^2,$$
  
(2.4)

kjer so  $\mathbf{a}_i$  koordinate svetilnikov,  $\mathbf{u}$  so iskane koordinate uporabnika oziroma v našem trenutnem primeru še ne lokaliziranega svetilnika in  $d_i$  razdalje od svetilnika  $\mathbf{a}_i$  do uporabnika. Sistem enačb preoblikujemo v linearni sistem dveh enačb z dvema neznankama:

$$2\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1 \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} d_1^2 - d_2^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_2\|^2 \\ d_1^2 - d_3^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_3\|^2 \end{pmatrix},$$
(2.5)

ki nam poda koordinate za najbolj verjetno pozicijo svetilnika. Sistem enačb 2.5 predstavlja situacijo lokalizacije z minimalno potrebnim številom svetilnikov. Z dodajanjem svetilnikov lahko 2.5 spremenimo v predoločen sistem, kjer imamo n svetilnikov:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{2} - \mathbf{a}_{1} \\ \mathbf{a}_{3} - \mathbf{a}_{1} \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{n} - \mathbf{a}_{1} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} d_{1}^{2} - d_{2}^{2} - \|\mathbf{a}_{1}\|^{2} + \|\mathbf{a}_{2}\|^{2} \\ d_{1}^{2} - d_{3}^{2} - \|\mathbf{a}_{1}\|^{2} + \|\mathbf{a}_{3}\|^{2} \\ \vdots \\ d_{1}^{2} - d_{n}^{2} - \|\mathbf{a}_{1}\|^{2} + \|\mathbf{a}_{n}\|^{2} \end{pmatrix},$$
(2.6)

pozicija uporabnika  $\mathbf{u}$  se nato izračuna [77]:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{b}. \tag{2.7}$$

Za 3D prostor v sistem dodamo tretjo neznanko – koordinato z.

## 2.4 Geometrijski faktor GDOP

Geometrijski faktor (ang. Geometric dilution of precision, GDOP) opisuje vpliv geometrije svetilnikov na pravilnost lokalizacije uporabnika [78]. Uporablja se ga pri določanju kakovosti lokalizacije v GPS: manjši kot je faktor, boljša je postavitev GPS satelitov in sprejemnika – in posledično je napaka lokalizacije sprejemnika na zemlji manjša. Primer dobre postavitve dveh svetilnikov je prikazan na sliki 2.10 (a), kjer sta prikazana dva svetilnika z meritvami razdalje do uporabnika in območjem napake razdalje. Pri dobri postavitvi svetilnikov, ki ima majhne vrednosti faktorja GDOP, je območje možne pozicije uporabnika majhno. V nasprotnem primeru, ko je postavitev svetilnikov glede na uporabnike slaba (slika 2.10 (b)) in faktor GDOP velik, je območje, kjer se uporabnik lahko nahaja, veliko.



Slika 2.10: Primera dobre in slabe postavitve svetilnikov. Crne pike predstavljajo svetilnike z izmerjeno razdaljo do uporabnika, s pasom napake. (a) prikazuje primer dobre postavitve svetilnikov z majhnim območjem, kjer se lahko nahaja uporabnik (zeleno območje). (b) Prikazuje slabšo postavitev svetilnikov, pri kateri je območje, kjer se lahko nahaja uporabnik, zelo povečano (zeleno območje).

Za izračun faktorja GDOP potrebujemo najprej [78]

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_i - x}{R_i} & \frac{y_i - y}{R_i} & \frac{z_i - z}{R_i} & -1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix},$$
(2.8)

kjer je  $R_i$  razdalja med svetilnikom in uporabnikom,  $x_i$ ,  $y_i$  in  $z_i$  so koordinate *i*-tega svetilnika in x, y in z so koordinate uporabnika. Nato izračunamo kovariančno matriko Q

$$Q = (A^T A)^{-1}, (2.9)$$

ki ima elemente

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}.$$
 (2.10)

Faktor GDOP nato izračunamo

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}.$$
(2.11)

## 2.5 Eksperimentalni postavitvi

V doktorskem delu smo izvajali meritve z merilnim sistemom za lokalizacijo. V ta namen smo pripravili dve eksperimentalni postavitvi sistema. Prva se je nahajala v telovadnici Gimnazije Vič (telovadnica), ki predstavlja velik in odprt prostor, z malo možnosti za odboje radijskega signala od bližnjih ovir. Prostor ima dimenzije  $32 \text{ m} \times 26 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ . Na robovih igrišča dimenzij  $28 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  smo simetrično postavili 16 svetilnikov na različne višine, po pet svetilnikov na daljšo stranico in tri na krajšo stranico (slika 2.11). Svetilniki so bili pritrjeni na lesene podstavke, ki so bili nameščeni na teleskopskih stojalih.



Slika 2.11: Lega 16 svetilnikov v telovadnici.

Druga postavitev sistema je v Laboratoriju za robotiko (laboratorij), ki je manjši prostor s prisotnimi ovirami, kar nam omogoča testiranje merilnega sistema v prostoru z možnimi odboji radijskega signala in ovirami med UWB moduli. Prostor ima dimenzije  $12 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ . Na stene laboratorija smo namestili 12 svetilnikov s stenskimi stojali (slika 2.14). Laboratorij za robotiko nam omogoča meritve v okolju, ki predstavlja razmere, v katerih merilni sistemi delujejo.

Maksimalne razlike pozicij svetilnikov so predstavljene po koordinatah v tabeli 2.3.



Slika 2.12: Postavitev svetilnikov na stojalih v telovadnici z referenčno ploščo v osrednjem delu prostora. Slika zajema levi del telovadnice s sredino.



Slika 2.13: Postavitev svetilnikov na stojalih v telovadnici z referenčno ploščo v osrednjem delu prostora. Slika zajema desni del telovadnice s sredino.

## 2.5.1 GDOP analiza

Za scenarija v telovadnici in laboratoriju smo izračunali vrednosti faktorja GDOP za uporabnika po celotnem prostoru. Vrednosti faktorja GDOP v telovadnici so simetrično porazdeljene po prostoru zaradi simetrične postavitve svetilnikov (slika 2.15). Opazimo, da so najmanjše vrednosti v bližini svetilnikov na sredini stranic pravokotnika,



Slika 2.14: Lega 12 svetilnikov v Laboratoriju za robotiko.

Tabela 2.3: Maksimalne razlike med pozicijami svetilnikov za scenarija v telovadnici in laboratoriju.

	Telovadnica	Laboratorij
$\Delta x / m$	28	10
$\Delta y / m$	20	12
$\Delta z$ / m	$1,\!45$	$0,\!50$

ki ga določajo svetilniki na xy ravnini. V osrednjem delu je veliko področje s srednjo vrednostjo faktorja GDOP. Scenarij v laboratoriju s svojo nesimetrično postavitvijo svetilnikov ima vrednosti faktorja GDOP za uporabnika nesimetrično porazdeljene po prostoru (slika 2.16). Najmanjše vrednosti dosega v okolici svetilnikov. Na slikah 2.15 in 2.16 nismo podali sten in ovir v prostoru, saj je faktor GDOP geometrijska ocena stanja svetilnikov in uporabnika, na katero ne vpliva stanje v prostoru.



Slika 2.15: Faktor GDOP v odvisnosti od x in y pozicije uporabnika v telovadnici. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti faktorja GDOP.



Slika 2.16: Faktor GDOP v odvisnosti od x in y pozicije uporabnika v laboratoriju. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti faktorja GDOP.

Nato smo analizirali vpliv dviga vsakega drugega svetilnika na faktor GDOP uporabnika (slika 2.17). V situaciji, ko so svetilniki na enaki višini, ima faktor veliko vrednost. Z dvigovanjem svetilnikov vrednost faktorja hitro pade v obeh scenarijih. V telovadnici se vrednost prepolovi pri višinski razliki svetilnikov $0,57\,\mathrm{m}$ in v laboratoriju pri 2,1 m.



Slika 2.17: Faktor GDOP za uporabnika v središčni poziciji pri spremenljivi višini vsakega drugega svetilnika v telovadnici in laboratoriju.

Ker je GDOP geometrijski faktor, ki nam pove geometrijsko stanje svetilnikov in enega uporabnika ter opisuje kvaliteto pozicioniranja uporabnika, smo za vsak svetilnik izračunali lasten GDOP, pri čemer smo ga pri tem obravnavali kot uporabnika. Iz vseh vrednosti faktorja GDOP za posamezne svetilnike smo izračunali povprečno vrednost faktorja GDOP, ki smo jo uporabljali za primerjavo z različnimi postavitvami svetilnikov in referenčnih enot. Povprečni faktor GDOP za svetilnike je v situaciji, ko so svetilniki v isti ravnini, zelo velik (slika 2.18). Vrednost GDOP hitro pada s povečevanjem višinske razlike svetilnikov. V telovadnici se vrednost GDOP spusti na 11,2 pri višinski razliki 0,5 m in na 5,9 pri višinski razliki 1 m. V laboratoriju se pri višinski razliki 0,5 m faktor GDOP spusti na 7 in pri 1 m na 4,1.



Slika 2.18: Povprečni faktor GDOP za vse svetilnike pri spremenljivi višini vsakega drugega svetilnika v telovadnici in laboratoriju.

# 2.6 Referenčne pozicije

Za eksperimentalne validacije metod in algoritmov za izboljšanje delovanja merilnega lokalizacijskega sistema potrebujemo razliko med pozicijo, ki je bila izmerjena z našim sistemom in predlaganimi metodami, ter referenčno pozicijo. Eksperimenti v doktorski disertaciji obsegajo merjenje razdalj med svetilniki in uporabnikom ter pozicij svetilnikov na večjem področju ter meritve lege uporabnika v realnem času, kar je zahtevno za en sam referenčni merilni sistem.

Meritve referenčnih poziciji svetilnikov in uporabnika so razdeljene na dva dela in dva referenčna merilna sistema. Pozicije svetilnikov so bile izmerjene z geodetskimi meritvami z uporabo elektronskega tahimetra, ki omogočajo natančne meritve pozicij na večjem delovnem področju. Ne omogočajo pa meritev lege objekta z veliko dinamiko, kar potrebujemo pri referenčnih meritvah uporabnika. Za ta del je bil uporabljen referenčni merilni sistem Optotrak (Northern Digital Inc., Waterloo, Kanada), ki s tremi linijskimi kamerami meri 3D pozicijo infrardečih diod. Referenčne razdalje za analize modela kompenzacije napake razdalje zaradi medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika smo izračunali iz referenčnih poziciji uporabnika in svetilnika.

#### 2.6.1 Referenčne pozicije svetilnikov

Referenčne meritve pozicije svetilnikov so bile izvedene z uporabo certificiranega elektronskega tahimetra LeicaTPS 1201+. V ta namen so bile na pozicije, kjer so bili pritrjeni svtilniki nameščene referenčne odbojne tarče, katerih pozicija v 3D prostoru se je merila. Transformacija med pozicijo tarče in središčem UWB antene je poznana in je uporabljena pri izračunu referenčne pozicije UWB modula. Referenčne meritve pozicij obojnih tarč so bile izmerjene z natančnostjo pod 1 mm za oba eksperimenta.

#### 2.6.2 Referenčna lega uporabnika

Referenčne meritve lege uporabnika so bile izvedene z referenčnim merilnim sistemom Optotrak Certus. Na uporabnika so bile nameščene tri infrardeče svetilne diode v formaciji enakostraničnega trikotnika (slika 2.19). Iz pozicij treh infrardečih diod smo izračunali referenčno orientacijo uporabnika v oblik rotacijske matrike <sup>R</sup>**R** [79].

$${}^{R}\mathbf{x} = \frac{\mathbf{p}_{D2} - \mathbf{p}_{D3}}{|\mathbf{p}_{D2} - \mathbf{p}_{D3}|}$$
$$\mathbf{o} = \frac{\mathbf{p}_{D1} - \mathbf{p}_{D3}}{|\mathbf{p}_{D1} - \mathbf{p}_{D3}|}$$
$${}^{R}\mathbf{z} = \frac{{}^{R}\mathbf{x} \times \mathbf{o}}{|{}^{R}\mathbf{x} \times \mathbf{o}|}$$
$$(2.12)$$
$${}^{R}\mathbf{y} = \frac{{}^{R}\mathbf{z} \times {}^{R}\mathbf{x}}{|{}^{R}\mathbf{z} \times {}^{R}\mathbf{x}|}$$
$${}^{R}\mathbf{R} = \left[{}^{R}\mathbf{x} {}^{R}\mathbf{y} {}^{R}\mathbf{z}\right],$$

kjer so  $\mathbf{p}_{D1}$ ,  $\mathbf{p}_{D2}$  in  $\mathbf{p}_{D3}$  pozicije treh infrardečih diod. Relacija med središčem UWB antene in infrardečimi diodami je bila poznana. Pozicije diod so bile zajete v realnem času v globalnem koordinatnem sistemu združenih treh kamer Optotrak z natančnostjo pod 1 mm. Kasneje je bil koordinatni sistem Optotraka poravnan s koordinatnim sistemom referenčnih koordinat svetilnikov, kar je opisno v naslednjem podpoglavju.

### 2.6.3 Združena referenčna sistema

Za namen evalvacije metod zmanjševanja napak v merilnem lokalizacijskem sistemu, sta bila koordinatna sistema referenčnih koordinat svetilnikov in Optotrak sistema poravnana. S tem smo združili referenčne meritve pozicije svetilnikov in uporabnika. Poravnavo smo dosegli s skupnimi točkami, ki so bile izmerjene pri geodetskih meritvah



Slika 2.19: Uporabnik in infrardeče diode za referenčne meritve z Optotrakom.

in z Optotrak sistemom. Pri vsaki novi meritvi z merilnim sistemom za lokalizacijo so bile najprej s sistemom Optotrak izmerjene poravnalne točke. Pri analizi rezultatov se je nato izračunala transformacijska matrika med koordinatnim sistemom Optotrak in referenčnimi koordinatami svetilnikov [80]. Na ta način smo dosegli združen referenčni sistem pozicij svetilnikov in uporabnika, ki nam omogoča večkratne ponovitve meritev pri spremenjenih postavitvah Optotrak kamer, kar omogoča spreminjanje delovnega področja, v katerem lahko Optotrak sistem deluje.

# **3** Avtomatska lokalizacija svetilnikov v 3D prostoru z dodatnimi referenčnim enotami

Z<sup>A</sup> delovanje sistema za lokalizacijo potrebujemo svetilnike na znanih pozicijah. Nji-NjiNove pozicije lahko določimo z uporabo zunanje merilne opreme, kar nam sicer omogoča natančno določanje pozicije, a predstavlja omejitve zaradi dodatne opreme in potrebnega znanja za uporabo. Za boljšo razširljivost in lažje povečanje in spreminjanje delovnega področja predstavlja avtomatska lokalizacija svetilnikov z uporabo dodatnih referenčnih enot boljšo alternativo. Pri tem postopku izkoristimo obstoječo opremo v sistemu za lokalizacijo in izmerimo razdalje med vsemi svetilniki in referenčnimi enotami. Z dodanimi referenčnimi enotami lahko postavimo svetilnike v poljuben deloven koordinatni sistem in pridobimo na točnosti ocene pozicije svetilnikov.

Avtomatska lokalizacija svetilnikov z dodatnimi referenčnimi enotami se deli na dva različna primera: (i) popolna lokalizacija, kjer se na novo določa pozicijo vseh svetilnikov, in (ii) dodajanje novih svetilnikov v obstoječ lokalizacijski sistem. V obeh primerih uporabimo dodatne referenčne enote, ki so nameščene na referenčno ploščo tako, da so poznane relacije med referenčnimi enotami in robovi referenčne plošče.

V primeru popolne lokalizacije (slika 3.1 (a)) je potrebno določiti pozicije vseh svetilnikov in jih postaviti v izbran koordinatni sistem. Za to potrebujemo transformacijo med referenčnim koordinatnim sistemom, ki ga določa referenčna plošča, in izbranim delovnim koordinatnim sistemom. To dosežemo z referenčnimi enotami, ki so nameščene na referenčno ploščo. Ker so relacije med refernčnimi enotami in robovi referenčne plošče znane, lahko postavimo referenčno ploščo na pozicijo v prostoru, ki nam določa delovni koordinatni sistem; posledično je transformacija med koordinatnim sistemom referenčne plošče in delovnega prostora znana. Za umestitev na novo lokaliziranih svetilnikov v obstoječ sistem (slika 3.1 (b)) ni potrebno postavljati referenčne plošče na pozicijo, ki določa delovni koordinatni sistem, ampak jo postavimo tako, da najbolje izkoristimo prostor z referenčnimi enotami in izboljšamo lokalizacijo novih svetilnikov. Umestitev dodanih svetilnikov se nato izvede s poravnavo z obstoječimi svetilniki.



Slika 3.1: (a) Primer popolne lokalizacije, kjer je potrebno določiti pozicijo vseh svetilnikov. (b) Primer umestitve novo dodanih svetilnikov v obstoječ sistem svetilnikov.

Prednost uporabe referenčne plošče se dobro pojasni z izračunom faktorja GDOP. Uporablja se pri določanju kakovosti lokalizacije v GPS: manjši, kot je faktor, boljša je postavitev GPS satelitov in sprejemnika – in posledično je lahko minimalna napaka lokalizacije sprejemnika na zemlji manjša. Podobno naredimo v primeru avtomatske lokalizacije svetilnikov. Svetilniki, uporabljeni v sistemu za lokalizacijo, tvorijo svoj volumen enotskega telesa; glej sliko 3.2, zgornji kvader z višino  $h_1$ . Ko dodamo referenčne enote, se skupni volumen poveča; glej sliko 3.2, zgornji in spodnji kvader z višino  $h_1 + h_2$ . Posledično se zmanjša faktor GDOP. Na ta način izboljšamo lokalizacijo svetilnikov, saj smo izboljšali geometrijsko postavitev vseh enot, uporabljenih v lokalizaciji. Za scenarija v telovadnici in laboratoriju smo izračunali skupni faktor GDOP po postopku, ki je opisan v poglavju 2.4. Izračunane vrednosti so za različna števila referenčnih enot predstavljena v tabeli 3.1. Pri vsaki dodani referenčni enoti se pri obeh scenarijih GDOP zmanjšuje. Največja razlika je pri prvi dodani enoti, nato zmanjševanje faktorja GDOP postopoma upade. V laboratoriju je ta preskok izrazit, saj se zmanjša za 60%, v telovadnici pa se zmanjša za 13%.



Slika 3.2: Avtomatska lokalizacija svetilnikov (rdeči krogi) z uporabo dodatnih referenčnih enot (zeleni krogi). Ponazoritev razširitve prostora, ki ga zasedajo svetilniki (višina  $h_1$ ), z dodatnimi referenčnimi enotami(višina  $h_2$ ).

Tabela 3.1: Faktor GDOP za postavitev svetilnikov v telovadnici, kjer je bilo uporabljenih 16 svetilnikov (16S), in v Laboratoriju za robotiko, kjer je bilo uporabljenih 12 svetilnikov (12S), in sicer pri različnem številu referenčnih enot (1K, 2K, 3K in 4K).

	0K	$1\mathrm{K}$	2K	3K	$4\mathrm{K}$
$\stackrel{\text{fd}}{\bigcirc}$ Telovadnica (16S)	$^{3,7}$	3,2	2,9	2,7	2,6
$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \end{array} \end{array}$ Laboratorij (12S)	8,1	3,2	2,8	2,4	2,3

Relativne pozicije referenčnih enot na referenčni plošči  $P_{UE}$  so poznane glede na referenčno ploščo in so določene v koordinatnem sistemu referenčne plošče  $P_{UE}^{UP}$ . Tako so koordinate novo lokaliziranih svetilnikov določene v koordinatnem sistemu  $O_{UP}$ . Ko je referenčna plošča postavljena na referenčne točke delovnega koordinatnega sistema  $O_{delovni}$ , je transformacija T med  $O_{UP}$  in  $O_{delovni}$  poznana.  $P_{UE}^{delovni} = TP_{UP}$  transformira koordinate svetilnikov in referenčnih enot v delovni koordinatni sistem.

Postopek avtomatskege lokaliacije svetilnikov z referenčno ploščo je predstavljen z blokovno shemo na sliki 3.3 in vključuje šest glavnih sklopov:

- *Parametri* za določanje zasnove merilnega sistema, ki vplivajo na število svetilnikov in njihovo postavitev.
- *Simulacije*, kjer se glede na parametre prostora določi optimalne pozicije referenčne plošče.

- *Delovni koordinatni sistem* za določitev relacije do referenčne plošče pri avtomatski lokalizaciji svetilnikov.
- *Meritve*, ki zajemajo celoten postopek postavitve sistema in referenčne plošče, ter zajem razdalj med vsemi svetilniki in referenčnimi enotami.
- *Lokalizacija svetilnikov* z izbranim lokalizacijskim algoritmom v relativnem koordinatnem sistemu.
- *Poravnava relativnega koordinatnega sistema* svetilnikov na delovni koordinatni sistem preko referenčne plošče.



Slika 3.3: Blokovna shema postopka avtomatskege lokalizacije svetilnikov merilnega sistema za lokalizacijo z uporabo dodatnih referenčnih enot. MER predstavlja matriko evklidskih razdalj in APE povprečno pozicijsko napako.

V naslednjih poglavjih so najprej predstavljene lokalizacijske metode, ki smo jih uporabili pri lokalizaciji svetilnikov ter cenilke za določanje uspešnosti lokalizacije svetilnikov. Sledi analiza faktorja GDOP za scenarij v telovadnici in laboratoriju z namenom iskanja optimalne pozicije referenčne plošče glede na geometrijo svetilnikov. Optimalno pozicijo, ki smo jo uporabili v eksperimentalnem delu smo nato iskali s simulacijam v katerih smo spreminjali pozicijo referenčne plošče. Dalje so predstavljeni rezultati simulacij kjer smo spreminjali število porabljenih referenčnih enot na referenčni plošči ter višinsko razliko med svetilniki. Nato sledi eksperimentalni del kjer je opisan postopek meritve razdalje med vsemi svetilniki ter opis referenčne plošče uporabljene v eksperimentalnem delu in njena postavitev v prostoru. Na koncu so predstavljeni eksperimentalni rezultati, kjer smo merili razdalje med vsemi svetilniki in referenčnimi enotami, ki so bile nato uporabljene pri lokalizaciji svetilnikov. Meritve razdalje smo izvedli v telovadnici in laboratoriju z referenčno ploščo na dveh pozicijah. Primerjani so rezultati lokalizacije, ko so pri postopku lokalizacije uporabljene dodatne referenčne enote in brez njih. Za zaključek so predstavljeni rezultati popolne avtomatske lokalizacije svetilnikov v delovnem koordinatnem sistemu z uporabo referenčne plošče na dveh pozicijah v laboratoriju.

### 3.1 Lokalizacijske metode in cenilke

Lokalizacija svetilnikov je inverzni problem geometrije razdalje, kjer imamo izmerjene samo razdalje med točkami in iz njih izračunamo njihovo lokacijo v prostoru. Imamo podan neusmerjeni graf G = (V, E, d), napet na ogliščih  $1, \ldots, n$  v prostoru dimenzije r, kjer moramo poiskati nabor točk  $x_1, \ldots, x_n$  v  $\mathbb{R}^r$ , tako da zadostimo pogoju [29]:

$$\|x_i - x_j\|^2 = d_{ij}, za \quad vse \quad robove \quad ij \in E,$$

$$(3.1)$$

kjer  $\|.\|$  predstavlja evklidsko normo na  $\mathbb{R}^r$ . V večini primerov so vrednosti razdalj v matriki evklidskih razdalj netočne zaradi napak meritev ali nepovezljivosti svetilnikov. Slednje je znano kot reševanje matrike Evklidskih razdalj [27,81] in je pogosto uporabljeno v brezžičnih omrežjih, statistiki, robotiki, rekonstrukciji proteinov in redukciji dimenzij v analizi podatkov [82].

### 3.1.1 Večdimenzijsko skaliranje (MDS)

Večdimenzijsko skaliranje je matematična metoda prikazovanja mere podobnosti med pari objektov, kot je na primer razdalja med točkami v 1D, 2D in 3D prostorih [83]. V primeru lokalizacije je podatek o podobnosti matrika evklidskih razdalj (MER) med iskanimi točkami – pozicijami svetilnikov. Metoda zmanjša dimenzijo matrike evklidskih razdalj v vektor koordinat svetilnikov, tako da so izračunane razdalje med pridobljenimi koordinatami najbolj podobne vhodnim razdaljam – meritvam. Eksperimentalni postavitvi svetilnikov in referenčne plošče sta omogočali meritve popolne matrike evklidske razdalje, zato smo lahko izločili vplive različnih metod dopolnjevanja manjkajočih razdalj [27]. Koraki za lokalizacijo so:

- 1. Zajem meritev razdalj med svetilniki in referenčnimi enotami in sestava MER.
- 2. Izračun relativnih koordinat svetilnikov in referenčnih enot z uporabo MATLAB funkcije za večdimenzijsko skaliranje.
- 3. Poravnava izračunanih koordinat z znanimi koordinatami referenčnih enot.

### 3.1.2 Semidefinitno programiranje (SDP)

Semidefinitno programiranje oziroma optimizacija je podpodročje konveksne optimizacije, ki minimizira linearno funkcijo. Optimizacija linearne funkcije, zapisane v matriki, se izvaja na množici točk, ki je omejena s pozitivno semidefinitnimi omejitvami [84]. Pri lokalizaciji je v splošnem to reševanje problema:

$$\min_{\mathbf{Y} \succeq 0, \mathbf{Y} \in \mathbf{\Omega}} \left\| \mathbf{W} \circ (\kappa(\mathbf{Y}) - \mathbf{D}) \right\|,$$
(3.2)

kjer **Y** predstavlja semidefinitno matriko,  $\mathbf{Y} \in \mathbf{\Omega}$  so dodatne linearne omejitve, **D** je matrika evklidskih razdalj, **W** je matrika uteži in  $\circ$  je Hadamardov produkt [28]. Problem rešujemo z metodo notranje točke, ki je eden izmed načinov za reševanje pri semidefinitnem programiranju.

### 3.1.3 Trilateracija (TRI)

Tretja metoda temelji na trilateraciji in izhaja iz ideje, ki so jo uporabili avtorji v [30] in temelji na dejstvu, da je mogoče z iterativnim postopkom trilateracije popolnoma lokalizirati nabor svetilnikov [85].

Svetilnikov z znanimi koordinatami nimamo, zato najprej določimo koordinate primarnih svetilnikov, iz katerih nato nadaljujemo s klasično trilateracijo. Ker delamo v 3D, izračunamo  $\binom{N}{4}$  različnih kombinacij začetnih svetilnikov iz nabora N svetilnikov. Njihove koordinate izračunamo po:

$$\mathbf{a}_{1} = \begin{pmatrix} 0\\0\\0 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_{2} = \begin{pmatrix} d_{12}\\0\\0 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_{3} = \begin{pmatrix} a_{3x}\\a_{3y}\\0 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_{4} = \begin{pmatrix} a_{4x}\\a_{4y}\\a_{4z} \end{pmatrix}$$
(3.3)

$$a_{3x} = \frac{d_{12}^2 + d_{13}^2 - d_{23}^2}{2d_{12}} \tag{3.4}$$

$$a_{3y} = \sqrt{d_{13}^2 - \frac{(d_{12}^2 + d_{13}^2 - d_{23}^2)^2}{4d_{12}^2}}$$
(3.5)

$$a_{4x} = \frac{d_{12}^2 + d_{14}^2 - d_{24}^2}{2d_{12}} \tag{3.6}$$

$$a_{4y} = \frac{d_{12}(d_{13}^2 + d_{14}^2 - d_{34}^2) - a_{3x}(d_{12}^2 + d_{14}^2 - d_{24}^2)}{2d_{12} \ a_{3y}}$$
(3.7)

$$a_{4z} = \sqrt{d_{14}^2 - (a_{4x}^2 + a_{4y}^2)} \tag{3.8}$$

kjer so  $d_{12}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{14}$ ,  $d_{23}$ ,  $d_{24}$  in  $d_{34}$  razdalje med izbrano četverico svetilnikov. Tako imamo definiran koordinatni sistem [86] in določene koordinate prvih štirih svetilnikov.

Vsak novo lokaliziran svetilnik dodamo v nabor znanih svetilnikov, ki se uporabi pri naslednji iteraciji trilateracije. Vsaka začetna kombinacija nam da eno rešitev lokalizacije svetilnikov. Število rešitev najprej zmanjšamo z odstranitvijo tistih, ki imajo začetne svetilnike v koplanarnih konfiguracijah. S parametrom se določa mejo, koliko blizu ravnine so lahko začetni svetilniki. Z odstranitvijo začetnih svetilnikov se zmanjša čas izračuna končne rešitve za 60%. Ko so vse ustrezne rešitve izračunane, se s parametrom dodatno izloči rešitve, ki imajo napako naleganja preveliko (*Stress* – razlika med izmerjenimi razdaljami in razdaljami, ki se izračunajo iz lokaliziranih svetilnikov.). Iz preostalih rešitev se izračuna povprečje, ki predstavlja končno rešitev.

### 3.1.4 Napaka pozicije

Uspešnost lokalizacije se je določala z dvema ocenama napake. Prva ocena določa kvaliteto naleganja izračunanih pozicij in izmerjenih razdalj [87]:

$$Stress = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M} (\hat{d}_i - d_i)^2}{d_i}},$$
 (3.9)

kjer je M število razdalj med svetilniki,  $\hat{d}_i$  je razdalja, izračunana iz lokaliziranih pozicij svetilnikov, in  $d_i$  izmerjena razdalja – primerja se izmerjene razdalje z razdaljami, ki se izračunajo iz lokaliziranih svetilnikov.

Druga ocena določa napako med izračunanimi pozicijami svetilnikov in referenčnimi pozicijami svetilnikov. Povprečen pozicijski pogrešek ali povprečen koren kvadrata pozicijskega pogreška je [88]:

$$APE = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sqrt{(\hat{\mathbf{a}}_i - \mathbf{a}_i)(\hat{\mathbf{a}}_i - \mathbf{a}_i)^{\mathsf{T}}}}{N},$$
(3.10)

kjer je  $\hat{\mathbf{a}}_i$  izračunana pozicija *i*-tega svetilnika,  $\mathbf{a}_i$  njegova referenčna pozicija in N število svetilnikov.

APE napaka se je dodatno razdelila na napake po posameznih koordinatah xyz (3D), xy (2D), x, y in z. V disertaciji so uporabljene naslednje oznake: APE je napaka v 3D, APE(xy) je napaka v 2D, APE(x) je napaka na koordinati x, APE(y) je napaka na koordinati y in APE(z) je napaka na koordinati z. Tako je možno opazovati vplive pozicije referenčne plošče na izboljšanje lokalizacije svetilnikov po posameznih koordinatah in na skupno napako.

Za izračun APE je bila najprej izvedena poravnava izračunanih pozicij svetilnikov z referenčnim pozicijami svetilnikov.

## 3.2 Načrtovanje referenčne plošče

V naslednjih podpoglavjih so predstavljeni rezultati GDOP analize referenčne plošče, simulacij in eksperimentov v realnem okolju. S faktorjem GDOP smo iskali optimalno pozicijo referenčne plošče glede na geometrijo postavitve svetilnikov in referenčne plošče. Nato smo s simulacijami raziskali optimalno pozicijo referenčne plošče in število referenčnih enot na referenčni plošči ter višinsko razliko med svetilniki in referenčno ploščo. Sledi prikaz rezultatov avtomatske lokalizacije svetilnikov z uporabo dodatnih referenčnih enot v dveh realnih okoljih.

### 3.2.1 GDOP analiza referenčne plošče

Za oba scenarija smo izračunali povprečni faktor GDOP za vsako pozicijo referenčne plošče znotraj območja svetilnikov na način, ki je opisan v poglavju 2.4. Sliki 3.4 in 3.5 predstavljata rezultate izračunov faktorja GDOP za telovadnico in laboratorij. V telovadnici je najmanjša vrednost faktorja GDOP za 12% manjša od največje vrednosti, ki je v ogliščih tlorisa postavitve svetilnikov. Glede na izračune faktorja GDOP je optimalna postavitev referenčne plošče v bližini svetilnikov na sredini stranic pravokotnika, ki ga določajo svetilniki na *xy* ravnini. V laboratoriju je najmanjša vrednost za 30% manjša od največje vrednosti, ki je tudi v ogliščih tlorisa postavitve svetilnikov. Glede na izračune je optimalna postavitev referenčne plošče pri dveh svetilnikih na stebru, ki je odmaknjen od sredine prostora (slika 3.15 svetilnika z modro iz rdečo oznako).



Slika 3.4: Vrednost faktorja GDOP v odvisnosti od x in y pozicije referenčne plošče s štirimi dodatnimi referenčnimi enotami za postavitev svetilnikov v telovadnici Gimnazije Vič. Vrednost faktorja GDOP je izračunana iz povprečja GDOP vrednosti za vsak posamezen svetilnik in referenčno enoto. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti faktorja GDOP.

### 3.2.2 Simulacije

S simulacijami smo raziskali vplive pozicije referenčne plošče, števila referenčnih enot na referenčni plošči in višinske razlike med svetilniki. Pri spreminjanju parametrov smo opazovali APE za vse tri lokalizacijske metode. Rezultati simulacij so bili naprej uporabljeni v eksperimentalnem delu doktorske disertacije.



Slika 3.5: Vrednost faktorja GDOP v odvisnosti od x in y pozicije referenčne plošče s štirimi dodatnimi referenčnimi enotami za postavitev svetilnikov v Laboratoriju za robotiko. Vrednost faktorja GDOP je izračunana iz povprečja GDOP vrednosti za vsak posamezen svetilnik in referenčno enoto. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti faktorja GDOP.

### 3.2.2.1 Pozicija referenčne plošče in število referenčnih enot

Prva opazovana parametra sta bila število referenčnih enot na referenčni plošči in pozicija referenčne plošče v prostoru svetilnikov. Notacija konfiguracij z različnimi števili referenčnih enot je AX, kjer X predstavlja število referenčnih enot. V simulacijah smo uporabili pet različnih konfiguracij s postavitvijo referenčnih enot v ogliščih pravokotnikov z dimenzijami  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  (slika 3.6). Za vsako konfiguracijo smo opravili simulacije, kjer smo pozicijo referenčne plošče (rdeč križ) premikali po koordinatah x, yin z znotraj scenarijev v telovadnici in laboratoriju. Obsegi premikov referenčne plošče v simulacijah po posamezni koordinati so predstavljeni v tabeli 3.2. Za analizo vpliva referenčne plošče na lokalizacijo svetilnikov smo opravili simulacijo, kjer ni bilo referenčne plošče, označeno z A0. V simulacijah smo za model šuma uporabili Gaussovo porazdelitev z  $\mu = 0$  m in s  $\sigma = 0.15$  m [39]. Za vsako konfiguracijo referenčne plošče smo opravili 100 simulaciji. Pri vseh treh lokalizacijskih metodah je bil uporabljen enak nabor 100 semen za generacijo naključnih števil. Rezultat ene simulacije je APE, ki je izračunan samo iz pozicij svetilnikov, ne pa tudi iz pozicij referenčnih enot.



Slika 3.6: Konfiguracije referenčnih enot, uporabljenih v simulacijah. Sivi kvadrati imajo dimenzije  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ .

Tabela 3.2: Obsegi premikov referenčne plošče v simulacijah za scenarija v telovadnici in laboratoriju.

	Telovadnica	Laboratorij	
x / m	$0 - 28,\! 0$	0 - 8,0	korak 1,0 m
y / m	0 - 20,0	0 - 10,5	korak 1,0 m
z / m	$0 - 2,\! 0$	$0 - 2,\! 0$	korak $0{,}2~\mathrm{m}$

Rezultate 100 simulacij smo povprečili in tako dobili eno APE vrednost za vsako pozicijo referenčne plošče. Iz obsega pozicij smo za končni rezultat posamezne konfiguracije izbrali najmanjši APE (tabela 3.3).

Za konfiguracijo A1 je APE 28 % oziroma za 26 % manjši v primerjavi s konfiguracijo A0 z metodama MDS in TRI v telovadnici. V laboratoriju je APE 76 % oziroma za 47 % manjši v primerjavi s konfiguracijo A0 z metodama MDS in TRI. Pri maksimalnem številu referenčnih enot (konfiguracija A16) je APE manjši za 62 % oziroma za 34 % v primerjavi s konfiguracijo A0 za metodi MDS in TRI v telovadnici. V laboratoriju je APE manjši za 87 % in 65 % z uporabo metod MDS in TRI. Absolutna sprememba APE za konfiguracijo A2, ki je uporabljena v obeh scenarijih pri eksperimentalni validaciji, je predstavljena v spodnji vrstici tabele 3.3. V primerjavi z ostalima lokalizacijskima

Tabela 3.3: Rezultati simulacij APE za konfiguracije referencne plosce A0, A1, A2, A4,
A9 ter A16 in tri lokalizacijske metode (MDS, SDP in TRI; poglavje 3.1) za scenarija
v telovadnici in laboratoriju ( $\Delta A2 = A0 - A2$ ).

	Te	elovadni	ca	Laboratorij		
	MDS SDP		TRI	MDS SDP		TRI
A0 / m	0,039	0,237	0,047	0,084	0,171	0,095
A1 / m	0,028	0,018	0,035	0,020	0,017	$0,\!050$
A2 / m	$0,\!025$	$0,\!017$	0,036	0,017	$0,\!015$	0,048
A4 / m	0,020	0,016	0,031	0,014	0,011	0,037
A9 / m	$0,\!017$	0,013	0,030	0,012	0,010	0,035
A16 / m	$0,\!015$	0,011	0,031	0,011	0,009	0,033
$\Delta A2 / m$	0,014	0,220	0,011	0,068	0,156	0,047

metodama je imela metoda SDP večje vrednosti APE pri konfiguraciji A0. Metoda se je izkazala za zelo občutljivo na šum, še posebej pri konfiguracijah A0. Pri konfiguraciji A1 in višje so bili rezultati simulacij z metodo SDP boljši v primerjavi z ostalima metodama; trend zmanjševanja APE je viden v tabeli 3.3 od konfiguracije A1 naprej.

Največje izboljšanje vrednosti APE na eno referenčno enoto (RE) je pri konfiguraciji A1. Pri metodi MDS in TRI ta znaša 0,011 m/RE in 0,012 m/RE za scenarij v telovadnici in 0,064 m/RE in 0,045 m/RE za scenarij v laboratoriju. Pri konfiguraciji A2 je bilo izboljšanje APE na referenčno enoto 50% manjše kot pri konfiguraciji A1, z izjemo pri scenariju v telovadnici in metodi MDS, kjer je bilo 36% manjše kot pri konfiguraciji A1. Pri konfiguraciji A4 je izboljšanje APE na referenčno enoto 70% manj, kot je bilo pri konfiguraciji A1; pri konfiguraciji A9 85% manj in pri konfiguraciji A16 90% manj.

Spreminjanje APE glede na pozicijo po x in y je prikazano na slikah 3.7, 3.8 in 3.9 za lokalizacijske metode MDS, SDP in TRI za konfiguracijo A2 v telovadnici ter na slikah 3.10, 3.11 in 3.12 za laboratorij. Iz vseh vrednosti APE smo za vsak par x in y izbrali najmanjšo vrednost po z; prikazane so na slikah s površinskim grafom. Vse tri lokalizacijske metode imajo podobno obliko napake, a drugačne vrednosti. V telovadnici so najmanjše vrednosti APE v sredinski poziciji in med lokalizacijskimi metodami ni veliko odstopanj. V laboratoriju je ta pozicija izven središča prostora z manjšimi odstopanji do 0,5 m med lokalizacijskimi metodami. Vrednosti APE za optimalne pozicije referenčne plošče so prikazane v tabeli 3.3. Optimalne pozicije, pridobljene z metodo MDS za konfiguracijo A2 so prikazane na sliki 3.14 za scenarij v telovadnici in na sliki 3.15 za scenarij v laboratoriju.



Slika 3.7: Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče (površinski graf) in konfiguracijo A0 (črni kvadrat) za lokalizacijsko metodo MDS v telovadnici. Vrednosti na površinskem grafu predstavljajo najmanjšo povprečno vrednost APE po osi z, ki so bile izračunane iz 100 simulacij za vsako pozicijo referenčne plošče [x, y, z].

### 3.2.2.2 Višinska razlika med svetilniki in referenčno ploščo

V drugem delu simulacij smo opazovali vpliv višinske razlike med svetilniki in referenčno ploščo na lokalizacijo svetilnikov. Pri simulacijah smo uporabili x in y pozicijo referenčne plošče z najmanjšo vrednostjo APE, pridobljeno iz prejšnjih simulacij (telovadnica – slika 3.14 in laboratorij – slika 3.15). V simulaciji smo višinsko razliko povečevali do 28 m v scenariju v telovadnici in do 12 m v scenariju v laboratoriju. Vrednost parametra je bila določena glede na dimenzije prostora. Z izbiro smo dosegli, da je višinska razlika med svetilniki in referenčno ploščo enaka, kot je najdaljša stranica pravokotnika, ki ga določajo svetilniki na ravnini xy. Tako smo dosegli boljše prostorske razmere in dodatno zmanjšali koplanarnost, ki jo imajo svetilniki zaradi majhne medsebojne višinske razlike.



Slika 3.8: Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče (površinski graf) in konfiguracijo A0 (črni kvadrat) za lokalizacijsko metodo SDP v telovadnici. Vrednosti na površinskem grafu predstavljajo najmanjšo povprečno vrednost APE po osi z, ki so bile izračunane iz 100 simulaciji za vsako pozicijo referenčne plošče [x, y, z]. Večje vrednosti APE na robovih površinskega grafa so bile odstranjene za boljši prikaz poteka oblike napake v okolici optimalne pozicije.

Rezultati simulacij za šest vrednosti višinske razlike so prikazani v tabeli 3.4. V scenariju v telovadnici se je vrednost APE najbolj zmanjšala do višinske razlike 15 m, to je približno polovica najdaljše stranice pravokotnika, ki ga svetilniki določajo na ravnini xy. Pri vrednosti 15 m se je vrednost APE zmanjšala za 60 % pri lokalizacijski metodi MDS, za 53 % pri SDP in za 58 % pri TRI v primerjavi z rezultati za konfiguracijo A2 iz tabele 3.3.

V scenariju v laboratoriju je se je vrednost APE najbolj zmanjšala do višinske razlike 5,1 m, kar je ponovno približno polovica najdaljše stranice pravokotnika, ki ga svetilniki določajo na ravnini xy. Pri višinski razliki med svetilniki in referenčno ploščo 5,1 m se je vrednost APE zmanjšala za 27 % pri lokalizacijski metodi MDS, za 36 % pri SDP in za 67 % pri TRI v primerjavi z rezultati za konfiguracijo A2 iz tabele 3.3.


Slika 3.9: Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče (površinski graf) in konfiguracijo A0 (črni kvadrat) za lokalizacijsko metodo TRI v telovadnici. Vrednosti na površinskem grafu predstavljajo najmanjšo povprečno vrednost APE po osi z, ki so bile izračunane iz 100 simulaciji za vsako pozicijo referenčne plošče [x, y, z].

Tabela 3.4: Rezultati simulacij APE z uporabo konfiguracije A2 referenšne plošče, kjer se je spreminjala višinska razlika med referenčno ploščo in najvišje ležečimi svetilniki. Referenčna plošča je na optimalni poziciji po koordinatah x in y, izračunani s simulacijami iz prejšnjega poglavja. Rezultati so prikazani za tri lokalizacijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1).

$\Delta h$ / m		3,6	$^{5,0}$	10,0	15,0	20,0	28,0
	MDS / m	0,025	0,020	0,012	0,010	0,009	0,009
Telovadnica	SDP / m	$0,\!017$	0,014	0,010	0,008	0,008	0,007
	TRI / m	0,036	0,029	0,018	$0,\!015$	0,014	0,014
$\Delta h$ / m		2,7	3,1	2,7	$^{5,1}$	$6,\!5$	12,0
	MDS / m	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010	0,009
Laboratorij	SDP / m	0,014	0,012	0,011	0,009	0,009	0,008
	TRI / m	0,048	0,029	0,016	0,013	$0,\!012$	$0,\!015$



Slika 3.10: Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče (površinski graf) in konfiguracijo A0 (črni kvadrat) za lokalizacijsko metodo MDS v laboratoriju. Vrednosti na površinskem grafu predstavljajo najmanjšo povprečno vrednost APE po osi z, ki so bile izračunane iz 100 simulaciji za vsako pozicijo referenčne plošče [x, y, z].

#### 3.2.3 Eksperimenti

Metodo avtomatske lokalizacije svetilnikov z dodatnim referenčnimi enotami v 3D prostoru smo eksperimentalno validirali v dveh scenarijih s pomočjo geodetskega referenčnega sistema LeicaTPS 1201+, predstavljeno v poglavju 2.6. Uporabili smo merilni sistem za lokalizacijo, ki je bil predstavljen v poglavju 2. V vsakem scenariju smo postavili svetilnike in referenčno ploščo na določena mesta (telovadnica – slika 3.14 in laboratorij – slika 3.15) in z referenčnim sistemom izmerili njihovo referenčno pozicijo. Nato smo izvedli merilni postopek za izmero razdalje med vsemi svetilniki in refe-



Slika 3.11: Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče (površinski graf) in konfiguracijo A0 (črni kvadrat) za lokalizacijsko metodo SDP v laboratoriju. Vrednosti na površinskem grafu predstavljajo najmanjšo povprečno vrednost APE po osi z, ki so bile izračunane iz 100 simulaciji za vsako pozicijo referenčne plošče [x, y, z]. Večje vrednosti APE na robovih površinskega grafa so bile odstranjene za boljši prikaz poteka oblike napake v okolici optimalne pozicije.

renčnimi enotami. Opravili smo 40 ponovitev meritev. Filtrirane in umerjene razdalje smo nato uporabili za lokalizacijo svetilnikov s tremi lokalizacijskimi metodami MDS, SDP in TRI. Tabela 3.5 prikazuje statistiko meritev za prvo pozicijo referenčne plošče. Razmere v scenariju v laboratoriju s pogoji NLOS se poznajo pri skoraj dvakrat večji povprečni napaki izmerjenih razdalj in več kot dvakrat večjem standardnem odklonu v primerjavi s pogoji LOS v scenariju v telovadnici.

Tabela 3.5: Povprečna napaka in standardni odklon meritev razdalj med svetilniki v telovadnici in laboratoriju za prvo pozicijo referenčne plošče.

	Telovadnica	Laboratorij
Napaka / m	0,06	0,10
STD / m	$0,\!05$	$0,\!13$



Slika 3.12: Rezultat simulacij za konfiguracijo A2 referenčne plošče (površinski graf) in konfiguracijo A0 (črni kvadrat) za lokalizacijsko metodo TRI v laboratoriju. Vrednosti na površinskem grafu predstavljajo najmanjšo povprečno vrednost APE po osi z, ki so bile izračunane iz 100 simulaciji za vsako pozicijo referenčne plošče [x, y, z].

#### 3.2.3.1 Meritve razdalj med svetilniki

Merilni sistem za lokalizacijo potrebuje izmerjene razdalje med uporabnikom in svetilniki, na podlagi katerih se lahko izračuna pozicija uporabnika. V primeru avtomatskege lokalizacije svetilnikov so potrebne vse razdalje med svetilniki. V ta namen smo razvili postopek zajemanja razdalj med poljubnim izbranim parom svetilnikov (algoritem 1). Celotna meritev se je izvajala preko glavnega svetilnika, ki je koordiniral izmenjavo paketov za izmero razdalje. Vsaka izmerjena razdalja se je posredovala računalniku preko glavnega svetilnika. Postopoma so se razdalje med posameznimi pari svetilnikov zbrale v matriki evklidskih razdalj.

V eksperimentalnem delu smo izmerili 40 ponovitev meritev. Osamelce v meritvah razdalj smo filtrirali, tako da smo Mahalanobisovo razdaljo vsakega vzorca razdalje primerjali s pragovno vrednostjo, določeno na podlagi analize meritev. Filtrirane vrednosti smo zamenjali s povprečno vrednostjo pred filtracijo, da smo ohranili število vzorcev za vse meritve [89]. Obdelane meritve so bile nato uporabljene za lokalizacijo svetilnikov.

Algoritm 1 Meritve vseh medsebojnih razdalj svetilnikov
Inicializacija spisek = naslovi vseh svetilnikov in referenčnih enot
<b>za</b> vsi naslovi v spisek <b>naredi</b>
$\mathbf{za}$ vsi naslovi v spisek minus zgornji naslov $\mathbf{naredi}$
izmeri 250 razdalj
pošlji razdalje glavnemu svetilniku
pošlji meritve na PC
konec za
konec za
Zaključek sestavi MER iz izmerjenih razdalj

#### 3.2.3.2 Umerjanje meritve razdalje med radijskimi moduli

UWB radio ima ničelni odmik izmerjene razdalje od prave vrednosti zaradi zamika potovanja radijskega signala od antene do RF čipa. Ta časovni zamik je od radijske enote do radijske enote različen zaradi izdelave in razlike v materialih. Ničelni odmik lahko umerimo s parametrom, ki ga omogoča radijska enota – zakasnitev antene (ang. antenna delay). Izbira parametra premika celotno nelinearno karakteristiko izmerjenih razdalj. Glede na aplikacijo lahko izberemo parameter tako, da je najmanjša napaka pri delovnih razdaljah.

UWB radio ima nelinearno karakteristiko meritve razdalje, kar poimenujejo napaka zaradi oddaljenosti (ang. range bias) [90]. Za določene parametre zamika antene in nastavitve kanala proizvajalec podaja tabelo popravkov razdalje, in sicer glede na izmerjeno moč radijskega signala. V primeru radijskih razmer brez ovir se moč izračuna po Friisovi enačbi za izračun izgub moči signala v prostoru. Glede na izračunano prejeto moč in vrednosti v tabeli lahko naredimo popravke na izmerjeni razdalji.

Nelinearno karakteristiko in napako zaradi antene smo umerili z regresijo skozi več umeritvenih točk. Umeritev smo opravili za vsak par svetilnikov, za katere smo opravili meritve na razdaljah od 1 m do 32 m s korakom po 1 m v telovadnici. Napake meritve razdalj so bile med moduli zelo podobne, zato smo na umeritvenih meritvah preizkusili več regresij in izbrali polinom šeste stopnje. Povprečen RMSE vseh 180 regresij je znašal 0,03 m. Guo in ostali [19] so uporabili dve linearni regresiji za dva intervala od 0 m do 1,5 m in od 1,5 m do 8 m. Regresijo polinoma šeste stopnje smo uporabili na celotnem območju od 1 m do 32 m. Umeritvene polinome smo nato uporabili pri meritvah razdalj v eksperimentalnem delu za vsak par svetilnikov posebej.

#### 3.2.3.3 Referenčna plošča

Referenčna plošča je sestavljena iz štirih referenčnih enot (radijske enote UWB). Postavljene so na oglišča kvadrata dimenzije  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . S štirimi referenčnimi enotami je omogočena poravnava lokaliziranih svetilnikov v 3D prostoru. Relativne referenčne pozicije referenčnih enot in robovi referenčne plošče so bili izmerjeni z geodetskimi meritvami, podobno kot referenčne pozicije svetilnikov predstavljeno v poglavju 2.6. Slika 3.13 predstavlja referenčno ploščo, uporabljeno v eksperimentih.



Slika 3.13: Referenčna plošča s štirimi referenčnimi enotami za eksperimentalne meritve.

#### 3.2.3.4 Postavitev svetilnikov in referenčne plošče

Za analizo vpliva referenčne plošče v postopku kalibracije svetilnikov smo zasnovali dva eksperimenta z dvema različnima postavitvama svetilnikov in različnimi pogoji v prostoru (poglavje 2.5). Tako smo lahko opazovali vplive v večjem odprtem prostoru in manjšem prostoru s prisotnimi ovirami. Sliki 3.14 in 3.15 prikazujeta postavitev referenčne plošče v telovadnici in laboratoriju za optimalno pozicijo P1, izračunano v simulacijah, in drugo pozicijo P2. Največje višinske razlike med svetilniki in referenčnimi enotami so predstavljene v tabeli 3.6.



Slika 3.14: Lega 16 svetilnikov v telovadnici z dimenzijama 28 m po osi x in 20 m po osi y z dvema pozicijama referenčne plošče z dvema referenčnima enotama.

Tabela 3.6: Maksimalne višinske razlike med svetilniki in referenčnimi enotami v telovadnici in laboratoriju.

	Telovadnica	Laboratorij
$\Delta z$ / m	3,40	2,45

#### 3.2.3.5 Vpliv referenčne plošče na napako lokalizacije svetilnikov

V prvem delu smo validirali izboljšanje lokalizacije svetilnikov z uporabo referenčne plošče na optimalni poziciji, ki je bila v naprej določena s simulacijami. Merili smo razdalje med vsemi svetilniki in referenčnimi enotami v telovadnici in laboratoriju za lokalizacijo svetilnikov. Rezultati, predstavljeni v tem odseku, so za konfiguraciji A0 in A2.

Rezultati za oba scenarija in vse tri lokalizacijske metode so predstavljeni v tabeli 3.7, in sicer za konfiguracijo A0, konfiguracijo A2 in razliko med A0 in A2. Napaka lokalizacije svetilnikov se je za vse primere zmanjšala z uporabo referenčne plošče



Slika 3.15: Lega 12 svetilnikov v Laboratoriju za robotiko z dimenzijama 10 m po osi x in 12 m po osi y z dvema pozicijama referenčne plošče s štirimi referenčnimi enotami za namen popolne lokalizacije svetilnikov lokalizacijskega sistema.

z dvema referenčnima enotama. V scenariju v telovadnici se je APE izboljšal za 0,01 m z lokalizacijsko metodo MDS, za 0,03 m z lokalizacijsko metodo SDP in za 0,01 m z lokalizacijsko metodo TRI (tabela 3.7)). V scenariju v laboratoriju se je APE zmanjšal za 0,30 m z lokalizacijsko metodo MDS, 0,23 m z lokalizacijsko metodo SDP in 0,10 m z lokalizacijsko metodo TRI. V obeh scenarijih je imela lokalizacijska metoda MDS najmanjšo APE za konfiguraciji A0 in A2. Lokalizacijski metodi SDP in TRI sta imeli podobne vrednosti APE za konfiguracijo A2 v obeh scenarijih z razliko 0,01 m. Lokalizacijska metoda MDS je imela vrednosti APE, ki so dvakrat manjše v scenariju v telovadnici in 1,5-krat manjše v scenariju v laboratoriju v primerjavi z metodama SDP

	Tel	lovadni	ca	Laboratorij			
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI	
A0 / m	0,08	$0,\!17$	0,14	0,44	0,45	0,33	
A2 / m	$0,\!07$	$0,\!14$	$0,\!13$	$0,\!14$	0,22	0,23	
$\Delta$ / m	$0,\!01$	$0,\!03$	0,01	$0,\!30$	0,23	$0,\!10$	

Tabela 3.7: Eksperimentalen APE za prvo pozicijo (P1) referenčne plošče za konfiguraciji A0 in A2 ter oba scenarija. Rezultati so prikazani za tri lokalizacijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1).

in MDS.

Povprečne vrednosti APE, izračunane iz 40 ponovitev meritev, so predstavljene na sliki 3.16 za scenarij v telovadnici in na sliki 3.17 za scenarij v laboratoriju, kjer so vrednosti APE predstavljene za xyz, xy, x, y in z koordinate. Na slikah so z rdečo barvo prikazani rezultati za konfiguracijo A0, to je brez referenčne plošče, in z modro



Slika 3.16: Povprečne vrednosti APE, izračunane iz 40 ponovitev za vse lokalizacijske metode in za konfiguraciji A0 in A2 s standardnim odklonom za telovadnico. Rezultati so prikazani kot funkcija koordinat xyz, xy, x, y in z, ki so bile uporabljene pri izračunu vrednosti APE.



Slika 3.17: Povprečne vrednosti APE, izračunane iz 40 ponovitev za vse lokalizacijske metode in konfiguraciji A0 in A2 s standardnim odklonom za labortorij. Rezultati so prikazani kot funkcija koordinat xyz, xy, x, y in z, ki so bile uporabljene pri izračunu vrednosti APE.

barvo rezultati za konfiguracijo A2, to je z referenčno ploščo z dvema referenčnima enotama. Lokalizacijske metode so prikazane z različnimi oznakami, ki so definirane v legendi slike. Vrednosti APE (napaka po koordinatah x, y in z) so manjše neodvisno od izbrane lokalizacijske metode, vse modre oznake so pod rdečimi.

Standardni odkloni vrednosti APE so v scenariju v telovadnici pod 0,01 m za APE in APE(z) in pod 0,002 m za APE(xy), APE(x) in APE(y) za konfiguraciji A0 in A2 in vse tri lokalizacijske metode. V scenariju v laboratoriju so standardni odkloni različni za konfiguraciji A0 in A2 in vse tri lokalizacijske metode. Standardni odkloni za APE in APE(z) in konfiguracijo A0 so pod 0,05 m za lokalizacijsko metodo MSD, pod 0,06 m za lokalizacijsko metodo SPD in pod 0,03 m za lokalizacijsko metodo TRI (slika 3.17 – rdeče oznake). Pri konfiguraciji A2 so standardni odkloni vrednosti APE in APE(z) pod 0,02 m za lokalizacijsko metodo MDS, pod 0,03 m za lokalizacijsko metodo SDP in pod 0,04 m za lokalizacijsko metodo TRI (slika 3.17 – modre oznake). Standardni odkloni APE(xy), APE(x) in APE(y) so pod 0,01 m za vse lokalizacijske metode in obe konfiguraciji (A0 in A2). Razlika v vrednosti med APE in APE(z) v scenariju v telovadnici je manjša kot 0,01 m za lokalizacijski metodi MDS in SDP in manjša kot 0,005 m za lokalizacijsko metodo TRI za konfiguraciji A0 in A2. Razlika med APE in APE(z) v scenariju v laboratoriju je 0,01 m za lokalizacijski metodi MDS in SDP in manjša kot 0,005 m za lokalizacijsko metodo TRI za konfiguracijo A0. Pri konfiguraciji A2 je razlika med vrednostjo APE in APE(z) 0,03 m za vse tri lokalizacijske metode. Za nadaljnjo analizo smo vrednosti APE(xy), APE(x), APE(y) in APE(z), prikazane na sliki 3.16 in 3.17, normalizirali z vrednostjo APE. Tako predstavlja APE(z) tudi preko 90% vrednosti APE in APE(xy); APE(x) in APE(y) pa predstavljata v povprečju 21% vrednosti APE.

#### 3.2.3.6 Neoptimalna pozicija referenčne plošče

Za dodatno evalvacijo izboljšanja lokalizacije svetilnikov z uporabo referenčne plošče v 3D prostoru smo opravili meritve razdalje med svetilniki in referenčnimi enotami z referenčno ploščo na drugi poziciji, ki je na sliki 3.14 za scenarij v telovadnici in na sliki 3.15 za scenarij v laboratoriju označena s P2. S tem smo premaknili referenčno ploščo iz optimalne pozicije P1, izračunane s simulacijami, v pozicijo, ki naj bi imela večje vrednosti APE pri lokalizaciji svetilnikov.

V scenariju v telovadnici se je vrednost APE zmanjšala za 0,01 m za lokalizacijsko metodo MDS in za 0,02 m za lokalizacijski metodi SDP in TRI, ko je bila uporabljena referenčna plošča (konfiguracija A2) v primerjavi s konfiguracijo A0 (tabela 3.8). V scenariju v laboratoriju se je vrednost APE pri konfiguraciji A2 zmanjšala za 0,25 m za lokalizacijsko metodo MDS, za 0,20 m za lokalizacijsko metodo SDP in za 0,07 m za lokalizacijsko metodo TRI.

Primerjava vrednosti iz tabele 3.7 in tabele 3.8 za scenarij v laboratoriju pokaže manjše izboljšanje v lokalizaciji svetilnikov pri uporabi referenčne plošče v drugi poziciji (P2) v primerjavi z optimalno pozicijo (P1). Povprečno se je vrednost APE v drugi poziciji zmanjšala za 0,03 m manj kot v optimalni poziciji za vse lokalizacijske metode v scenariju v laboratoriju. V scenariju v telovadnici sta vrednosti APE za konfiguracijo A2 enaki pri lokalizacijskih metodah MDS in SDP, in sicer sta (z izjemo za lokalizacijsko metodo TRI) za 0,01 m manjši kot v optimalni poziciji. Vrednosti APE so skoraj dvakrat večje v razmerah NLOS v scenariju v laboratoriju v primerjavi z razmerami LOS v scenariju v telovadnici.

Tabela 3.8: Eksperimentalen APE za drugo pozicijo (P2) referenčne plošče za konfiguraciji A0 in A2 ter za oba scenarija. Rezultati so prikazani za tri lokalizacijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1).

_	Tel	lovadni	ca	Laboratorij			
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI	
A0 / m	0,08	0,16	0,14	0,41	0,41	0,32	
A2 / m	$0,\!07$	$0,\!14$	$0,\!12$	0,16	0,21	$0,\!25$	
$\Delta$ / m	$0,\!01$	0,02	$0,\!02$	$0,\!25$	0,20	$0,\!07$	

### 3.2.3.7 Avtomatska lokalizacija svetilnikov z referenčnimi enotami v delovnem koordinatnem sistemu

Za validacijo metode avtomatske lokalizacije svetilnikov z uporabo referenčne plošče v delovnem koordinatnem sistemu smo izvedli meritve razdalj med vsemi svetilniki in referenčnimi enotami v scenariju v laboratoriju. Uporabili smo štiri referenčne enote na referenčni plošči, ki smo jo postavili na poziciji P1 in P2 (slika 3.15).

V optimalni poziciji P1 so vrednosti APE manjše v primerjavi z drugo pozicijo P2 za 0,12 m pri lokalizacijski metodi MDS, za 0,04 m pri lokalizacijski metodi SDP in za 0,34 m pri lokalizacijski metodi TRI (tabela 3.9).

Tabela 3.9: Rezultati avtomatske lokalizacije svetilnikov z referenčnimi enotami v delovnem koordinatnem sistemu. Rezultati so prikazani za tri lokalizacijske metode MDS, SDP in TRI (poglavje 3.1).

APE		MDS	SDP	TRI
Ρ1	A4 / m	0,32	0,36	1,06
P2	A4 / m	0,44	0,40	1,40

#### 3.2.4 Razprava

Metodo avtomatske lokalizacije svetilnikov z uporabo referenčnih enot v 3D prostoru in vplive referenčne plošče na lokalizacijo svetilnikov smo analizirali s simulacijami in validirali z eksperimenti v dveh različnih scenarijih. V eksperimentih smo uporabili predstavljen merilni sistem za lokalizacijo in geodetski referenčni merilni sistem Leica-TPS 1201+.

Analiza faktorja GDOP je pokazala, da se z uporabo dodatnih referenčnih enot geometrijske razmere za lokalizacijo svetilnikov izboljšajo. Primerjava vrednosti faktorja GDOP in rezultatov simulacij ne sovpadajo popolnoma. Faktor GDOP predstavlja samo geometrijsko situacijo, ki jo opisujejo svetilniki v danih pozicijah. V simulacijah pa smo se z dodanim šumom približali resnični situaciji. Na rezultat lokalizacije pa vpliva tudi izbira lokalizacijske metode, kar smo skozi rezultate tudi opazili.

Rezultati simulacij so pokazali zmanjšanje napake za oba scenarija in vse tri lokalizacijske metode z uporabo dodatnih referenčnih enot (tabela 3.3). Vrednost APE se je zmanjšala že s prvo dodano referenčno enoto in se je z nadaljnjim dodajanjem enot še zmanjševala. Analiza zmanjševanja vrednosti APE normirano na število referenčnih enot pokaže največje zmanjšanje na enoto pri referenčni plošči z eno referenčno enoto (konfiguracija A1). Če primerjamo s konfiguracijo A16, ki ima absolutno vrednost APE najmanjšo, je izboljšanje vrednosti APE na eno referenčno enoto sedemkrat manjše kot pri konfiguraciji A1 pri lokalizacijski metodi MDS in več kot dvanajstkrat manjše pri lokalizacijskih metodah SDP in TRI. Zmanjševanje vrednosti APE na eno referenčno enoto je s povečevanjem števila referenčnih enot potekalo eksponentno. Čeprav se je absolutna vrednost APE zmanjševala z dodajanjem referenčnih enot na referenčno ploščo, naraščajoče število enot vpliva na ceno in kompleksnost referenčne plošče, in s tem tudi celotnega sistema. Zato je izbira optimalnega števila referenčnih enot pogojena z dovoljeno vrednostjo APE za svetilnike v merilnem lokalizacijskem sistemu in z dosegljivimi sredstvi. V 3D prostoru je optimalno število referenčnih enota štiri, saj nam to omogoča poravnavo lokaliziranih svetilnikov z referenčnimi enotami, s simulacijami pa smo pokazali, da je izboljšanje ocene lokalizacije svetilnikov s štirimi dodatnimi referenčnimi enotami že optimalno. Obliko kvadrata za referenčno ploščo v simulacijskih konfiguracijah smo izbrali zaradi lažje izvedbe v eksperimentalnem delu.

Drugi parameter, ki vpliva na izboljšanje lokalizacije svetilnikov, je višinska razlika med svetilniki in referenčno ploščo. Višina svetilnikov je v realnem okolju omejena z dimenzijami prostora, toda v simulacijah smo lahko prekoračili omejitve in opazovali vpliv višinske razlike na lokalizacijo svetilnikov. Višinsko razliko smo povečali do višine, ki je enaka daljšemu robu pravokotnika, ki ga orisujejo svetilniki na ravnini *xy*. Dimenzije, ki jih svetilniki orisujejo v uporabljenih scenarijih, so prikazani na sliki 3.14 in 3.15 ter v tabeli 3.6. Rezultati simulacij so nam pokazali, da povečevanje višinske razlike zmanjšuje vrednost APE (tabela 3.4). Zmanjševanje napake je bilo opazno do višinske razlike, ki je približno polovica dolžine najdaljše stranice pravokotnika, ki ga svetilniki orisujejo na tleh. Iz rezultatov simulacij lahko ocenimo, da je optimalna postavitev referenčne plošče po višini v realnih okoljih čim nižje, saj nam to da največjo višinsko razliko med svetilniki in referenčnimi enotami.

Rezultati iz eksperimentov v scenarijih v telovadnici in laboratoriju so potrdili izboljšanje lokalizacije (zmanjšanje vrednosti APE) z uporabo referenčne plošče pri meritvah za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov. V scenariju v telovadnici se je vrednost APE zmanjšala za minimalno 0,01 m za vse lokalizacijske metode in v scenariju v laboratoriju od 0,07 m pri lokalizacijski metodi TRI do 0,30 m pri lokalizacijski metodi MDS (tabeli 3.7 in 3.8). Rezultati v simulacijah so pokazali večje izboljšanje lokalizacije svetilnikov z referenčno ploščo pri scenariju v laboratoriju, kar smo z eksperimentalnimi rezultati tudi potrdili.

Absolutne vrednosti v simulacijah in eksperimentih so različne, kar je posledica uporabe preprostejšega modela napake meritve razdalje med svetilniki. Razlike v vrednosti bi lahko zmanjšali z uporabo kompleksnejšega modela, ki bi zajemal nelinearno napako meritve razdalje in pogoje NLOS, kar pa je odvisno od okolja, v katerem se merilni sistem za lokalizacijo nahaja. Vsako odstopanje modela in podatkov, ki opisujejo razmere v prostoru, bi lahko negativno vplivalo na rezultat simulacij. Podrobne analize zmanjšanja vrednosti APE nismo opravili pri lokalizacijski metodi SDP zaradi velikih napak pri konfiguraciji A0. Vrednosti APE so bile pri scenariju v telovadnici v simulacijah celo večje kot pri eksperimentalnih rezultatih. Primerjava simulacijskih in eksperimentalnih rezultatov za konfiguracijo A2 med lokalizacijskima metodama MDS in SDP pokaže odstopanja v vrednosti APE. V simulacijah je imela lokalizacijska metoda SDP manjšo vrednost APE kot lokalizacijska metoda MDS. Obratno je bilo pri eksperimentalnih rezultatih, kjer je imela lokalizacijska metoda MDS manjše vrednosti APE. Kot omenjeno, se je lokalizacijska metoda SDP izkazala za občutljivo na napako v razdaljah med svetilniki. V ta namen smo izvedli dodatne simulacije, kjer smo poleg šuma v model meritve razdalje vključili še ničelni odmik. Ko je ničelni odmik enak nič, so rezultati lokalizacijske metode SDP boljši od lokalizacijske metode MDS. Pri povečevanju ničelnega odmika je delovanje lokalizacijske metode SDP upadalo hitreje kot pri lokalizacijski metodi MDS. Za povprečno napako razdalje, ki je prisotna pri eksperimentih, ima lokalizacijska metoda MDS manjše vrednosti APE kot metoda SDP.

Vrednosti APE po posameznih koordinatah so pokazale, da največji prispevek k skupni napaki prihaja iz naslova napake na koordinati z (sliki 3.16 in 3.17). V postopku avtomatske lokalizacije svetilnikov smo z vnosom referenčne plošče zmanjšali vrednost APE z največjim zmanjšanjem na koordinati z. Majhen standardni odklon vrednosti APE v scenariju v telovadnici nakazuje na stabilnost merilnega sistema za lokalizacijo in predstavljenega postopka avtomatske lokalizacije svetilnikov. Pri scenariju v laboratoriju, ki ima pogoje NLOS, je standardni odklon vrednosti APE večji, še posebej na koordinati z.

Zahtevnejši pogoji in postavitev svetilnikov z manjšo višinsko razliko v scenariju v laboratoriju so vzrok za večje vrednosti APE (tabeli 3.7 in 3.8). Scenarij v telovadnici, ki je imel pogoje LOS in posledično manjše napake meritev razdalj (tabela 3.5) in večje višinske razlike med svetilniki in referenčo ploščo, je imel manjše vrednosti APE. V takem primeru lahko za postopek avtomatskege lokalizacije svetilnikov izvedemo manjše število meritev brez vpliva na končen rezultat lokalizacije svetilnikov. V primeru, kot je scenarij v laboratoriju s pogoji NLOS, pa je priporočljivo izvesti večje število ponovitev meritev. Z večjim številom ponovitev meritev zajamemo vse medsebojne razdalje v podobnih razmerah, saj je čas med zajemanjem razdalj prvega in zadnjega para kratek. Nasprotno se zgodi, če bi povečali samo število vzorcev za posamezen par svetilnikov, kar bi močno povečalo časovno razliko med začetkom meritve razdalj pri prvem paru in zaključku pri zadnjem paru. S ponovitvami meritev dobimo sliko dogajanja skozi daljše časovno obdobje, ki nam poda informacijo o ustreznosti meritev, ki jih nato uporabimo pri lokalizaciji svetilnikov.

Rezultati iz eksperimentov v scenariju v laboratoriju (tabeli 3.7 in 3.8) so potrdili uporabo simulacij za določitev optimalne pozicije referenčne plošče, kjer je izboljšanje lokalizacije večje v optimalni poziciji v primerjavi z drugo pozicijo. To pomeni, da je mogoče s simulacijami, ki vključujejo preprost model napake meritve razdalje, določiti optimalno pozicijo referenčne plošče tudi za kompleksnejša okolja, kjer so prisotni pogoji NLOS. Rezultati iz scenarija v telovadnici niso podali razlike v vrednosti APE med optimalno in drugo pozicijo, saj je bil premik referenčne plošče majhen v primerjavi z dimenzijami prostora, ki ga določajo svetilniki. Relativno majhne pa so bile tudi spremembe v vrednostih APE pri spreminjanju pozicije referenčne plošče v simulacijah.

Vpliv postavitve svetilnikov na njihovo lokalizacijo je kompleksen in odvisen od primera do primera, zato je težko podati splošno rešitev za optimalno postavitev svetilnikov. Iz eksperimentalnih rezultatov smo videli, da večje višinske razlike med svetilniki in večje višinske razlike med svetilniki in referenčno ploščo omogočajo manjše vrednosti APE pri lokalizaciji svetilnikov. Toda oba parametra sta v realnem okolju, kjer merilni sistemi za lokalizacijo delujejo, omejena z dimenzijami prostorov. Rezultati iz obeh scenarijev in pozicij refernčne plošče so pokazali, da je lokalizacijska metoda MDS najbolj ustrezna za avtomatsko lokalizacijo svetilnikov.

Celoten postopek avtomatske lokalizacije svetilnikov smo eksperimentalno validirali v scenariju v laboratoriju, kjer smo opravili meritve z refernčno ploščo v konfiguraciji A4. Po poravnavi novo lokaliziranih svetilnikov v delovni koordinatni sistem smo z lokalizacijsko metodo MDS dosegli končno napako 0,32 m v 3D prostoru. Metoda predstavlja možnost hitre lokalizacije novo postavljenega merilnega sistema za lokalizacijo, kjer uporaba zunanje merilne opreme ni mogoča ali pa zaradi večje časovne porabe ni ustrezna ter pri kateri točnost pozicije svetilnikov ni večja od vrednosti, ki smo jih pridobili v eksperimentih. Na ta način se poveča rekonfigurabilnost lokalizacijskega sistema.

# 4 Model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije uporabnika

N A pravilnost lokalizacije uporabnika vpliva točnost pozicij svetilnikov in pravilnost izmerjenih razdalj med svetilniki in uporabnikom. Meritev razdalje pa je odvisna od trenutnih lastnosti radijskega kanala med svetilnikom in uporabnikom, ki vplivajo na hitrost širjenja radijskega signala (poglavje 2.2). Lastnosti kanala se spreminjajo z dielektričnostjo in permeabilnostjo snovi na poti radijskega signala. Ta pojav se močno izrazi z vstavljanjem ovir med svetilnikom in uporabnikom, kar poveča izmerjeno razdaljo pri enaki poziciji obeh modulov. Podobno se dogaja z vrtenjem uporabnika na mestu. Fizična zasnova antene in njen sevalni diagram, fizična zasnova elektronskega vezja in zaščitnega ohišja modula spremeni lastnosti radijskega kanala v direktni smeri med uporabnikom in svetilnikov. Napaka izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije je opažena že v literaturi [58–60].

Vpliv orientacije na izmerjeno razdaljo je prikazan na sliki 4.1, ki prikazuje izmerjeno razdaljo med svetilnikom in uporabnikom, ki se je na mestu po azimutu zavrtel od -90° do 90° s korakom po 1°. Na prikazanem primeru lahko vidimo, kako se pri različni orientaciji uporabnika na enaki poziciji spremeni izmerjena razdalja za 0,06 m. Pri lokalizaciji lahko take napake negativno vplivajo na končno točnost ocene pozicije uporabnika.

Radi bi zmanjšali odvisnost napake izmerjene razdalje med uporabnikom in svetilnikom zaradi njune medsebojne orientacije in s tem zmanjšali napako lokalizacije uporabnika. Skupne vplive fizične zasnove antene in njenega sevalnega diagrama, fizične zasnove elektronskega vezja in zaščitnega ohišja modula je težko analitično modelirati. V doktorskem delu smo zato uporabili pristop z modelom napake, zgrajenim z



Slika 4.1: Meritev razdalje med uporabnikom in svetilnikom pri rotaciji uporabnika po azimutu od  $-90^{\circ}$  do  $90^{\circ}$  s korakom po  $1^{\circ}$ . Orientacija po elevaciji je enaka  $0^{\circ}$  – nasprotna orientacija.

nevronskimi mrežami. V [60] so avtorji z uporabo diagnostičnih podatkov, pridobljenih iz radijskih modulov, med drugim sta to moč prejetega signala in impulzni odziv kanala, izdelali model za korekcijo napak v odvisnosti od orientacije uporabnika z dobrimi rezultati na učnih množicah. V primerjavi z literaturo želimo imeti čim bolj preprost model z majhnim številom vhodnih parametrov. Število vhodnih parametrov smo zmanjšali na izmerjeno razdaljo in orientacijo – azimut in elevacija. Na ta način ne potrebujemo diagnostičnih podatkov, kar za 99,8 % zmanjša velikost poslanih podatkov (tabela 4.1).

V naslednjih poglavjih je opisan postopek pridobitve modela za korekcijo napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika z opisom konfiguracije nevronske mreže, učnih meritev in učenja nevronske mreže. Nato so prikazani rezultati nevronskih mrež, ki so bile naučene z zmanjšanimi obsegi učnih meritev po elevaciji. V naslednjem poglavju predstavimo meritve moči prejetega signala, ki so bile izvedene pri postopku meritev učnih množic. Temu sledita opisa izračuna orientacije uporabnika v sistemu za lokalizacijo in druga metoda za korekcijo Tabela 4.1: Količina podatkov v poslanem paketu za izmerjeno razdaljo, diagnostične podatke in impulzni odziv kanala (CIR) za izbrano opremo – DWM1000 in konfiguracijo kanala.

	število bajtov
razdalja	8
diagnostični podatki	128
CIR	4064

napake izmerjene razdalje med svetilnikom in uporabnikom, ki ne upošteva informacije o njuni medsebojni orientaciji. Na koncu so predstavljene meritve razdalj med uporabnikom in dvanajstimi svetilniki postavljeni v laboratoriju in uporaba modela za korekcijo napake izmerjene razdalje zaradi medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika. Izmerjene razdalje in popravljene razdalje so nato uporabljene pri lokalizaciji uporabnika.

## 4.1 Upoštevanje antene, ohišja in orientacije uporabnika z nevronsko mrežo

#### 4.1.1 Konfiguracija nevronske mreže

Za model napake je bila izbrana nevronska mreža – perceptron. Ima tri vhodne parametre: izmerjeno razdaljo, azimut in elevacijo ter en izhodni parameter: popravljeno razdaljo. Zgrajena je iz skrite in izhodne plasti (slika 4.2). Skrita plast ima hiperbolično tangensno sigmoidno aktivacijsko funkcijo, izhodna plast ima linearno aktivacijsko funkcijo. Z uporabo enoplastnega perceptrona smo pridobili preprosto nevronsko mrežo za modeliranje napake razdalje v primerjavi z do sedaj uporabljenimi nevronskimi mrežami za namen zmanjševanja izmerjene razdalje [55,60], kjer so avtorji uporabili konvolucijske nevronske mreže, pogosto uporabljene pri analizah slik.

Nastavljivi parameter izbrane nevronske mreže, ki neposredno vpliva na kompleksnost in sposobnost modela, je število nevronov v skriti plasti. Postopek izbire števila nevronov v skriti plati nevronske mreže je opisan v poglavju 4.1.2. Preprostejšo zgradbo so uporabili avtorji v [41] z BNN (ang. Backpropagation Neural Network); vsebovala je eno skrito plast in 30 nevronov.



Slika 4.2: Nevronska mreža, uporabljena za model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije med svetilnikom in uporabnikom.

#### 4.1.2 Učna množica meritev

Za učenje nevronske mreže potrebujemo učne meritve – meritve razdalj pri različnih razdaljah med svetilnikom in uporabnikom in pri različnih znanih orientacijah uporabnika glede na svetilnik po azimutu in elevaciji. V ta namen potrebujemo mehanizem, ki rotira uporabnika po azimutu in elevaciji. Naslednji podpoglavji prikazujeta mehanizem za izvajanje učnih meritev in rezultate učnih meritev.

#### 4.1.2.1 Mehanizem za rotacijo uporabnika

Za zajem meritev, ki smo jih uporabili pri učenju nevronske mreže, smo zasnovali mehanizem, ki omogoča rotacije uporabnika okoli anteninega geometrijskega središča po elevaciji in azimutu (slika 4.3). Mehanizem za rotacijo uporabnika je prikazan na sliki 4.4 in je zasnovan tako, da je v bližnji okolici antene čim manj konstrukcije mehanizma. Zato je motor za elevacijo pomaknjen za uporabniško enoto, prenos na os rotacije pa je izveden z zobatim jermenom. Na ta način smo zmanjšali vpliv mehanizma na meritve in omogočili avtomatizirane meritve razdalj pri različnih medsebojnih orientacijah uporabnika in svetilnika. Obe osi sta gnani s koračnim motorjem, za določanje kota pa sta uporabljena RLS Orbis absolutna enkoderja. Regulacija pozicije azimuta in elevacije je izvedena na mikrokrmilniku, ki je nameščen pod mehanizmom. Referenčne pozicije mehanizma se pošilja z računalnika na mikrokrmilnik preko serijske povezave.

Zaradi omejitev pri zasnovi mehanizma uporabniškega modula ni mogoče vrteti za  $360^{\circ}$  po elevaciji in azimutu, ne da bi pri določenih orientacijah konstrukcija mehanizma motila radijsko pot med uporabnikom in svetilnikom. S tem razlogom smo omejili obseg meritev na območje od  $-80^{\circ}$  do  $80^{\circ}$  po azimutu in od  $-70^{\circ}$  do  $70^{\circ}$  po elevaciji. Končne orientacije uporabnika so prikazane na slikah 4.5 (a)-(d).



Slika 4.3: Predstavitev orientacije po azimutu in elevaciji.



Slika 4.4: Mehanizem za rotacijo uporabnika po azimutu in elevaciji, uporabljen za meritve učnih razdalj pri različnih medsebojnih orientacijah uporabnika in svetilnika.

#### 4.1.2.2 Meritve

Meritve razdalj pri različnih medsebojnih orientacijah svetilnika in uporabnika smo izvajali v zgornjem delu Laboratorija za robotiko na razdaljah od 1 m do 8 m s korakom



Slika 4.5: Postavitve uporabnika na mehanizmu za rotacijo v skrajnih orientacijah. (a)  $-80^{\circ}$  azimuta. (b)  $80^{\circ}$  azimuta. (c)  $-70^{\circ}$  elevacije. (d)  $70^{\circ}$  elevacije.

po 0,5 m. Za referenčne meritve smo uporabili laserski merilnik razdalje z napako 1 mm. Pri meritvah ni bilo prisotnih ovir med obema moduloma. Možnost odboja od sten so podobne, kot so v osrednjem delu laboratorija za robotiko, kjer so se izvajale meritve za evalvacijo modela. Na ta način smo učili model napake na meritvah, ki so bile opravljene v drugem prostor kot meritve za evalvacijo. S tem smo preverili splošno uporabnosti modela napake.

Slika 4.6 prikazuje shemo merilnega sistema za meritve učne množice razdalj. Svetilnik smo premikali na ustrezne medsebojne razdalje do uporabnika (tabela 4.2). Za napajanje svetilnika smo uporabili prenosno baterijo preko USB kabla. Uporabnik z merilnim mehanizmom je bil na stacionarnem mestu in povezan na računalnik. Program za avtomatizirane meritve je bil realiziran v Matlabu. Po postavitvi na ustrezno razdaljo in referenčni meritvi razdalje smo pognali program za meritev, ki je vodil mehanizem skozi vse merilne točke in prožil meritve razdalje na uporabniku. Za vsako merilno točko smo izmerili 250 vzorcev. Po končani seriji smo svetilnik prestavili na naslednjo razdaljo in postopek ponovili za celoten obseg razdalj. Parametri učnih meritev so predstavljeni v tabeli z izmerjenimi razdaljami in izbranimi medsebojnimi koti.



Slika 4.6: Shema merilnega eksperimenta za učno množico meritev.

parameter	minimum	maksimum	korak
razdalje	1	8	0,5
azimut	-80	80	5
elevacija	-70	70	5
št. vzorcev		250	

Tabela 4.2: Merilni parametri pri učni množici meritev razdalj in njihovi obsegi.

Slika 4.7 prikazuje celotno serijo meritev. Z modro črto je označena referenčna razdalja, z oranžno pa izmerjene razdalje. Znotraj ene referenčne razdalje si sledijo izmerjene razdalje čez celotno območje kotov elevacije in azimuta. Porazdelitev izmerjenih razdalj glede na elevacijo in azimut je prikazana na sliki 4.8. Od leve proti desni se spreminja elevacija od  $-70^{\circ}$  do  $70^{\circ}$  s korakom po 5°. Znotraj vsakega kota elevacije se azimut spreminja od leve proti desni od  $-80^{\circ}$  do  $80^{\circ}$  s korakom po 5°. Središčna orientacija je pri 0° po elevaciji in azimutu.

Učne meritve so bile ponovljene trikrat. Odstopanja med ponovitvami so bila majhna, v povprečju za milimeter in maksimalno za 6 cm za vse referenčne razdalje. Povprečje 250 vzorcev za posamezno merilno točko je prikazano na sliki 4.9 in sliki 4.10 za referenčni razdalji 4 m in 4,5 m. Enaki podatki so predstavljeni s površinskim



Slika 4.7: Množica meritev za učenje nevronske mreže. Z modro črto so označene referenčne razdalje. Oranžne črte prikazujejo izmerjene razdalje. Od leve proti desni si sledi 15 različnih referenčnih razdalj. Znotraj vsake razdalje se od leve proti desni spreminja elevacija od  $-70^{\circ}$  do  $70^{\circ}$  s korakom  $5^{\circ}$ , znotraj vsakega koraka elevacije pa se spreminja azimut od  $-80^{\circ}$  do  $80^{\circ}$  s korakom  $5^{\circ}$ .

grafom izmerjene razdalje v odvisnosti od azimuta in elevacije na sliki 4.11 in sliki 4.12 za referenčni razdalji 4 m in 4,5 m. Slike ostalih razdalj so v dodatku A. Na vseh grafih je prisoten vzorec znotraj vsakega kota elevacije, ki se spreminja zvezno iz leve  $(-70^{\circ} \text{ elevacije})$  proti desni (70° elevacije). Spremembe pri izmerjenih razdaljah znotraj enega obsega azimuta pri središčnih vrednostih elevacije so v povprečju 5 cm. Razlike se povečajo pri robnih kotih elevacije do 25 cm.

Podatke za vse referenčne razdalje v obliki, kot so prikazane na slikah 4.9 in 4.10, smo za prikaz spreminjanja izmerjene razdalje dodatno obdelali. Za vsako vrednost elevacije smo izračunali povprečno vrednost razdalje čez premik azimuta. Tako smo dobili 15 krivulj povprečnih vrednosti za 29 elevacij. Za primerjavo spreminjanja izmerjene razdalje smo vsaki razdalji odšteli povprečno vrednost in jih tako prestavili na enake vrednosti. Slika 4.13 prikazuje povprečno vrednost za vse razdalje in raztros za



Slika 4.8: Prikaz porazdelitve učnih meritev po azimutu in elevaciji za eno referenčno razdaljo med svetilnikom in uporabnikom. Elevacije se spreminjajo od leve proti desni od  $-70^{\circ}$  do  $70^{\circ}$  s korakom  $5^{\circ}$  s centralno orientacijo pri  $0^{\circ}$ . Znotraj vsakega kota elevacije se azimut spreminja od leve proti desni od  $-80^{\circ}$  do  $80^{\circ}$  s korakom  $5^{\circ}$ , zopet s centralno orientacijo pri  $0^{\circ}$ .

vsako vrednost elevacije. Iz končnega prikaza smo izvzeli drugo razdaljo zaradi večjega odstopanja v srednjem delu elevacije.

Učna množica meritev direktno vpliva na kvaliteto modela napake pri metodah strojnega učenja. Z veljavnimi in dovolj širokimi meritvami lahko opišemo pojav dovolj splošno, da je uporabnost modela razširljiva v bolj splošne pogoje. Veljavnost učnih podatkov je bila preverjena s ponovitvami učnih meritev. Na ta način smo potrdili ponovljivost samega merilnega mehanizma in pojavov, ki povzročajo spremembe v meritvi razdalje pri različnih medsebojnih orientacijah svetilnika in uporabnika. V našem primeru so meritve obsegale 957 merilnih točk na posamezno razdaljo in 15 razdalj od 1 m do 8 m, skupno 14355 izmerjenih točk.

Pri učnih meritvah je čez vse razdalje opazen vzorec spreminjanja vrednosti izmerjene razdalje čez elevacijo in azimut (sliki 4.9 in 4.10). Na slikah se opazi maksimalna



Slika 4.9: Približane učne meritve iz slike 4.7 – A za referenčno razdaljo 4 m, pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.

odstopanja razdalje na robovih in v sredini posameznega premika azimuta. Oblika premika azimuta ni enaka za vse vrednosti elevacije, vendar so si oblike sosednjih premikov azimuta zelo podobne. Vzorec se postopoma spreminja od začetne do končne vrednosti elevacije. Največje spremembe znotraj premika azimuta v izmerjenih razdaljah so pri robnih vrednostih elevacije. To je v primeru, ko je bil uporabnik obrnjen skrajno navzgorgor – proti stropu (slika 4.5 (c)) in navzdol proti tlom (slika 4.5 (d)).

Pri opazovanju vrednosti v odvisnosti od orientacije opazimo maksimalne vednosti na robnih elevacijah in minimum v središčnih elevacijah (slika 4.13). Pri opazovanju celotnega premika elevacije za konstantno vrednost azimuta se pokažejo najmanjše razdalje v središčni poziciji uporabnika. Največje vrednosti so na robnih vrednostih elevacije. Večja odstopanja izmerjenih vrednosti so pogojena z orientacijo antene, ki je v robnih primerih elevacije skoraj pravokotna glede na svetilniško anteno. Poleg 90° razlike v orientaciji antene je v tem primeru na poti radijskega signala večja količina



Slika 4.10: Približane učne meritve iz slike 4.7 – B za referenčno razdaljo 4,5 m, pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.

materiala vezja in ohišja, ki predstavlja oviro.

#### 4.1.3 Učenje nevronske mreže

Za učenje nevronskih mrež smo uporabili program Matlab in programski paket za učenje nevronskih mrež (ang. Deep Learning Toolbox). Izbrali smo Levenberg-Marquard optimizacijsko funkcijo in cenilko povprečje kvadratov napak. Vsi učni podatki so bili normirani na interval med 1 in -1. Učno množico smo razdelili na 70 % za učenje, 15 % za validacijo med učenjem in ostalih 15 % za testiranje naučene mreže.

Optimalno število nevronov v skriti plasti smo določili eksperimentalno med učenjem več različnih konfiguracij nevronskih mrež. Deset različnih konfiguraciji nevronske mreže s številom nevronov od 2 do 20 s koraki po 2 smo naučili desetkrat,



Slika 4.11: Učne meritve za referenčno razdaljo 4 m, pri čemer so prikazane povprečne <del>vrednosti 25</del>0 vzorcev za vsako merilno točko v odvisnosti od azimuta in elevacije. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti izmerjene razdalje.



Slika 4.12: Učne meritve za referenčno razdaljo 4,5 m, pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko v odvisnosti od azimuta in elevacije. Barvna legenda označuje minimalne in maksimalne vrednosti izmerjene razdalje.

skupaj 100 različnih nevronskih mrež. Za vsako nevronsko mrežo in lego uporabnika iz meritev za validacijo smo izračunali RMSE. Meritve razdalj med uporabnikom in





Slika 4.13: Prikaz spreminjanja izmerjene razdalje v odvisnosti od elevacije. Graf ponazarja povprečno vrednost in raztros za vse razdalje v učni množici (druga razdalja je izvzeta). Točen izračun prikazanih vrednosti je opisan v besedilu.

svetilnikom so bile izvedene v laboratoriju z uporabnikom v šestih legah. Za referenčne meritve smo uporabili referenčna sistema opisana v poglavju 2.6. Nato je bila izmed desetih nevronskih mrež izbrana tista, ki je imela najmanjšo povprečno RMSE za posamezno število nevronov v skriti plasti, kot je razvidno iz slike 4.14, kjer so prikazane napake za posamezne konfiguracije nevronskih mrež v odvisnosti od lege uporabnika. Iz izbranih nevronskih mrež smo izračunali povprečno napako čez vse lege uporabnika za izbiro optimalne konfiguracije nevronske mreže (slika 4.15 in tabela 4.3). Slika prikazuje graf povprečne napake čez vse lege uporabnika, izračunane iz optimalnih nevronskih mrež za posamezno število nevronov v skriti plasti za meritve s sistemom za lokalizacijo, ki so bile izvedene v Laboratoriju za robotiko. Povprečna napaka začne po šestih nevronih naraščati s številom nevronov: za en centimeter pri osmih nevronih oziroma za 2 cm pri 14 nevronih. Tako povprečna napaka naraste iz 0,073 m na 0,084 m pri 8 nevronih in na skoraj 0,100 m pri 14 nevronih (tabela 4.3)

Izbrane optimalne nevronske mreže za posamezno število nevronov smo nato uporabili še na podmnožici učnih meritev, ki niso bile uporabljene pri učenju nevronskih



Slika 4.14: Grafi povprečnih napak 10 različnih konfiguracij nevronskih mrež, prikazani za vsako lego uporabnika pri meritvah v laboratoriju.

mrež. To so bile meritve razdalj med uporabnikom in svetilnikom pri različnih medsebojnih orientacijah in na razdaljah od 1 m do 8 m s korakom po 0,5 m. Za referenčne meritve smo uporabili laserski merilnik razdalje z napako 1 mm. Slika 4.16 predstavlja napake, izračunane z izbranimi optimalnimi mrežami s podmnožico učnih meritev. Povprečna napaka pade z 0,043 m na 0,034 m z naraščanjem števila nevronov od dveh nevronov do 20 nevronov (tabela 4.3).

Tabela 4.3: Povprečna napaka za različna števila nevronov v nevronski mreži. Parameter RTLS predstavlja poprečno napako čez šest leg uporabnika pri eksperimentu s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju. Parameter Podmnožica predstavlja povprečno napako, izračunano s podmnožico učnih meritev, ki niso bile uporabljene pri učenju nevronskih mrež.

št. nevronov	<b>2</b>	4	6	8	10	12	14	16	18	20
RTLS / m	0,073	0,073	0,074	0,084	0,087	0,090	0,096	0,096	0,096	0,091
Podmnožica / m	0,043	0,042	0,041	0,041	0,037	0,038	0,033	0,033	0,032	0,034

Tabela 4.4 prikazuje povprečne čase učenja nevronskih mrež pri različnem številu





Slika 4.15: Graf povprečne napake čez vse lege uporabnika, izračunan iz optimalnih nevronskih mrež v odvisnosti od števila nevronov v skriti plasti. Napake so izračunane na meritvah s sistemom za lokalizacijo.

nevronov v skriti plasti. Cas učenja z večanjem števila nevronov narašča z linearnim trendom.

Tabela 4.4: Povprečni časi učenja nevronskih mrež za različna števila nevronov v skriti plasti.

št. nevronov	<b>2</b>	4	6	8	10	12	14	16	18	20
čas učenja / s	280	487	795	1643	2173	2546	2489	3445	3774	3919

Delovanje izbrane nevronske mreže smo preverili na podmnožici učnih meritev, ki ni bila vključena v učenje (tabela 4.5). Povprečna napaka se je z uporabo modela zmanjšala za 69 %, in sicer na 0,04 m v primerjavi s surovimi meritvami razdalj.

Pri analizi napake nevronskih mrež z različnim številom nevronov na podatkih iz eksperimenta z merilnim sistemom za lokalizacijo v scenariju v laboratoriju, se opazi naraščanje vrednosti napake z večanjem števila nevronov (slika 4.15). Od dveh nevronov do šestih nevronov je naraščanje zanemarljivo, nato se napaka pri osmih nevronih



Slika 4.16: Graf povprečne napake optimalnih nevronskih mrež v odvisnosti od števila nevronov v skriti plasti. Napake so izračunane na podmnožici učnih podatkov, ki niso bili uporabljeni pri učenju nevronskih mrež.

Tabela 4.5: Napake izbrane nevronske mreže in meritve razdalj, izračunane na podmnožicah učnih meritev, ki niso bile uporabljene pri učenju nevronske mreže.

	NN model	Meritve
povprečna napaka / m	0,041	0,132

poveča za 0,01 m. Iz tega lahko ocenimo, da s povečanjem števila nevronov v nevronski mreži ne povečamo sposobnosti modela za modeliranje orientacijske napake v realnih razmerah.

Nasprotno se dogaja z napako pri analizi na podmnožici učnih meritev, ki niso bile uporabljene pri učenju nevronskih mrež. Napaka počasi pada z večanjem števila nevronov, kar je pričakovan rezultat, saj se z večanjem števila nevronov poveča sposobnost modeliranja učne množice. Preveliko število nevronov lahko privede do čezmernega učenja nevronske mreže na učno množico, kar zmanjša splošnost modela. Pojav je viden, ko primerjamo sliko 4.16 in sliko 4.15: z večanjem števila nevronom in manjšanjem napake na podmnožici učnih meritev se napaka na podatkih iz realnega okolja merilnega sistema za lokalizacijo povečuje.

Za kandidate optimalne nevronske mreže smo zato izbrali nevronske mreže z dvema, štirimi in šestimi nevroni v skriti plasti, ki imajo približno enake vrednosti napake pri meritvah z merilnim sistemom za lokalizacijo. Z izbiro kandidatov smo tudi dosegli krajše čase učenja nevronske mreže. Na koncu smo izbrali kandidata s šestimi nevroni zaradi manjše napake pri podmnožici učnih meritev.

Glede na način evalvacije modelov napak izmerjene razdalje iz literature smo izračunali napako modela z uporabo podmnožice meritev, izključenega iz postopka učenja nevronske mreže. Z 0,04 m je glede na preprostost modela primerljiv z ostalo literaturo.

#### 4.2 Dodatni testi učne množice

Pri meritvah učne množice so prisotna večja odstopanja izmerjenih razdalj pri robnih vrednosti elevacije, kot je razvidno na levi in desni strani grafov na slikah 4.9 in 4.10. Izmerjene vrednosti so lahko posledica dejanskih razmer, ki jih povzroča orientacija uporabnika, ali pa je vzrok v okolju in geometrijski situaciji, prisotni med izvajanjem učnih meritev. Za validacijo veljavnosti izmerjenih vrednosti smo opravili dodatne teste na učnih množicah.

#### 4.2.1 Zmanjšan obseg kotov učne množice

Za validacijo veljavnosti izmerjenih vrednosti smo učili dodatne nevronske mreže, pri čemer smo zmanjšali obseg elevacije v učni množici. Obseg elevacije smo zmanjšali na območje od  $-50^{\circ}$  do  $50^{\circ}$  oziroma na območje od  $-40^{\circ}$  do  $40^{\circ}$ . Naučene nevronske mreže smo nato uporabili z eksperimentalnimi meritvami s sistemom za lokalizacijo. Nevronska mreža s polnim območjem elevacije je dosegla najmanjšo povprečno napako čez vse lege (tabela 4.6), kot tudi po posameznih legah z izjemo v peti legi, kjer ima najmanjšo napako nevronska mreža z obsegom elevacije od  $-50^{\circ}$  do  $50^{\circ}$  (slika 4.17).

V učnih podatkih so prisotna večja odstopanja izmerjenih razdalj pri robnih vrednostih elevacije, ki se pojavljajo pri vseh ponovljenih množicah meritev. To pomeni, da so časi preleta signala v teh legah daljši, na kar lahko vplivajo tudi zunanji dejavniki. Da bi preverili, ali so te vrednosti vpliv zunanjih dejavnikov, ki so bili prisotni med meritvami učne množice, smo učili dodatne nevronske mreže. Za učenje dodatnih mrež

Tabela 4.6: Povprečne napake nevronskih mrež z obsegom elevacije v učnih množicah -80.80, -50.50 in -40.40 pri eksperimentalnih meritvah s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju.

elevacija / $^{\circ}$	-80:80	-50:50	-40:40
povprečna napaka / m	0,074	0,078	0,081

smo uporabili zmanjšan obseg meritev po elevaciji. Tako smo imeli nevronske mreže, ki niso vsebovale delov učnih meritev, kjer so se pojavila večja odstopanja izmerjenih razdalj.

Napake novih nevronskih mrež, izračunanih z meritvami s sistemom za lokalizacijo, imajo podobne ali večje vrednosti kot model s polno učno množico (slika 4.17).  $\overline{V}$  primeru, da bi bile napake manjše, bi pomenilo, da so vrednosti razdalj v učni množici povzročene s strani zunanjih vplivov, ki jih med meritvami za evalvacijo v ti-



Slika 4.17: Povprečna napaka nevronskih mrež z obsegom elevacije v učnih množicah -80.80, -50.50 in -40.40 pri eksperimentalnih meritvah s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju po posameznih legah uporabnika skupaj s standardnim odklonom.

stem prostoru ni bilo. Posledično bi se za robne vrednosti elevacij v evalvacijskih meritvah povečala napaka popravljenih razdalj. Z rezultati nevronskih mrež z zmanjšanimi učnimi množicami lahko dodatno potrdimo ustreznost učnih meritev in merilnega postopka za zajem učnih meritev.

#### 4.2.2 Meritve moči

Za analizo učnih meritev smo opravili meritve ocenjene moči prejetega signala med uporabnikom in svetilnikom pri različnih orientacijah na razdaljah od 1 m do 8 m s korakom po 0,5 m. Za meritve smo uporabili mehanizem za rotacijo uporabnika, ki je opisan v poglavju 4.1.2.1. Uporabljene radijske enote omogočajo izračun ocene moči prejetega signala iz diagnostičnih podatkov, ki jih radijska enota shrani ob sprejemu sporočila. Slika 4.18 predstavlja povprečno vrednost 250 vzorcev za oceno prejete moči pri prvem prejetem sporočilu na strani svetilnika za učne meritve. Slika prikazuje zmanjšanje prejete moči v skrajnih legah elevacij, ki je prisotno pri vseh referenčnih meritvah. Moč se z večanjem razdalje zmanjšuje. Meritve ocene prejete moči pred povprečenjem so v dodatku B.

Zmanjševanje moči z večanjem razdalje med svetilnikom in uporabnikom je pričakovan rezultat, saj moč upada z razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom. Zmanjšanje moči pri robnih vrednostih elevacije pa so posledica orientacije uporabnika, ki je takrat obrnjen proti stropu (slika 4.5 (c)) oziroma proti tlom (slika 4.5 (d)). Takrat sta anteni orientirani skoraj pravokotna drugo na drugo.

Radijski modul DWM1000 ima vgrajen avtomatski regulator ojačitve (ang. Automatic Gain Control, AGC). Izračunane ocenjene moči so blizu realnih vrednosti pri nižjih vrednostih moči signala in odstopajo pri večjih nivojih prejete moči [91]. Pri vrednostih  $-85 \,d\text{Bm}$  začne ocenjena prejeta moč odstopati od realnih vrednostih in narašča počasneje. Večji nivoji prejete moči so pri manjših razdaljah med oddajnikom in sprejemnikom, kar je na sliki 4.18 razvidno iz leve strani pri nižjih vrednostih  $d_i$ . AGC s karakteristiko ocenjene moči, ki je opisana zgoraj, predvidoma vpliva na amplitude nihanja prejete moči čez prelet elevacije, ki so pri manjših razdaljah manjše in pri večjih razdaljah večje.

Opravili smo meritve za oceno prejete moči s svetilnikom brez ohišja in z ohišjem z originalno anteno ter priredili svetilnik tako, da smo ga lahko priključili na lijak anteno s HP G281A adapterjem (3,95–5,85 GHz). Meritve smo ponovili za vertikalno



Slika 4.18: Ocena moči prejetega signala prvega sporočila za 15 referenčnih razdalj učne množice. Znotraj vsake razdalje se od leve proti desni spreminja elevacija od  $-70^{\circ}$  do  $70^{\circ}$  s korakom 5° in znotraj vsakega koraka elevacije se spreminja azimut od  $-80^{\circ}$  do  $80^{\circ}$  s korakom 5°. Prikazana moč je povprečje 250 vzorcev.

in horizontalno polarizacijo originalne antene in lijak antene. Obseg rotacij uporabnika je bil  $[-70 -35 \ 0 \ 35 \ 70]$  po elevaciji in  $[-80 -40 \ 0 \ 40 \ 80]$  po azimutu. Postavitev merilnega sistema in slike z meritvami moči za vsak primer so prikazane v dodatku B. Povprečne moči prejetega signala so manjše, ko je polarizacija za 90° obrnjena. Razlika ocenjene moči je pod -1 dBm, kar pa je pri ocenjenih močeh -80 dBm in -78 dBm, zaradi odstopanja od dejanske prejete moči, dejanska razlika več kot -1 dBm.

## 4.3 Validacija modela za upoštevanje antene, ohišja in orientacije uporabnika z nevronsko mrežo

#### 4.3.1 Izračun azimuta in elevacije

Za namen evalvacije modela napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika smo iz referenčnih meritev izračunali orientacijo
uporabnika, kot je opisano v poglavju 2.6.2. Svetilnike smo namestili vzporedno s steno, da smo lahko določili njihovo orientacijo, ki je prikazana na sliki 4.22. Iz znanih leg svetilnikov smo nato lahko izračunali poenostavljeno obliko elevacije in azimuta za vsak posamezen par uporabnika in svetilnika.



Slika 4.19: (a) Izračun azimuta  $\phi_A$  pri znani orientaciji uporabnika  $\phi_U$  in svetilnika  $\phi_S$  v delovnem koordinatnem sistemu. (b) Izračun elevacije  $\phi_E$  iz znane medsebojne razdalje med svetilnikom in uporabnikom d, pri znani višini svetilnika  $h_S$  in uporabnika  $h_U$ .

Azimut  $\phi_A$  smo izračunali iz razlike med orientacijo uporabnika in svetilnika po z osi. Nato je bil  $\phi_A$  preslikan na tisto območje kotov, ki je bilo uporabljeno pri meritvah za učno množico s kotom 0 pri nasprotni orientaciji. Elevacija  $\phi_E$  se je izračunala po enačbi 4.2, kjer je  $h_S$  višina svetilnika,  $h_U$  višina uporabnika in d razdalja med svetilnikom in uporabnikom.

$$\phi_A = \phi_S - \phi_U \tag{4.1}$$

$$\Delta_h = h_S - h_U \tag{4.2}$$
$$\phi_E = asin(\frac{\Delta_h}{d})$$

S tako poenostavitvijo smo omogočili uporabo preprostega modela napake, v katerem smo za meritev učne množice modela vrteli samo uporabnika. V primeru, da bi želeli kompleksnejši model z uporabo prostorskega kota za medsebojno orientacijo, bi potrebovali veliko več merilnih točk za vsako razdaljo. Število meritev za eno razdaljo N bi se iz:

$$N = N_A \times N_E, \tag{4.3}$$

spremenilo v

$$N = (N_A \times N_E)^2, \tag{4.4}$$

kar bi v našem primeru pomenilo skok iz 957 merilnih točk na eno razdaljo na 915849 merilnih točk na razdaljo.

#### 4.3.2 Metoda za korekcijo izmerjene razdalje brez informacije o medsebojni orientaciji uporabnika in svetilnika

V primeru zahteve po boljši točnosti lokalizacije uporabnika [90] so s strani proizvajalca radijskih modulov priporočene dodatne korekcije izmerjene razdalje. V doktorskem delu smo za primerjavo uporabili metodo, ki ne upošteva informacije o medsebojni orientaciji uporabnika in svetilnika. To je korekcija napake izmerjene razdalje zaradi nivoja moči sprejetega signala, ki je v angleščini poimenovana Range Bias. Za izbrane nastavitve kanala so predložene tabele, kjer so za določene moči prejetega signala podane korekcije izmerjene razdalje, ki smo jih upoštevali po končanem preletu med uporabnikom in svetilnikom.

#### 4.3.3 Eksperimentalne meritve

Prikaz delovanja modela napake izmerjene razdalje smo najprej preverili na meritvah, predstavljene na sliki 4.1. Pri konstantni razdalji med svetilnikom in uporabnikom smo uporabnika pri konstanti elevaciji  $0^{\circ}$  zavrteli po azimutu od  $-90^{\circ}$  do  $90^{\circ}$  s korakom po 1°. Referenčno razdaljo med svetilnikom in uporabnikom smo izmerili z laserskim merilnikom razdalje s točnostjo 1 mm. Rezultati so prikazani na sliki 4.20. S slike je razvidna zmanjšana napaka povprečne vrednosti čez celotno območje rotacije uporabnika. Vpliv modela napake v odvisnosti od medsebojne orientacije svetilnika in uporabnika je bolje prikazana na sliki 4.21. Slika 4.21 zgoraj prikazuje napako izmerjene razdalje in z modelom popravljene razdalje. Slika 4.21 spodaj prikazuje za povprečno vrednost premaknjena grafa izmerjene razdalje in popravljene razdalje, ki nam pokaže zmanjšanje napake v odvisnosti od orientacije po uporabi modela.

Za nadaljno eksperimentalno validacijo modela napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije smo uporabili eksperimentalno postavitev v labora-



Slika 4.20: Meritev razdalje med uporabnikom in svetilnikom pri rotaciji uporabnika po azimutu od -90° do 90° s korakom po 1° (modra) skupaj z modelom napake v odvisnosti od orientacije popravljeno razdaljo (rdeča). Orientacija po elevaciji je enaka  $0^{\circ}$  – nasprotna orientacija. Rumena vodoravna črta predstavlja referenčno razdaljo med uporabnikom in svetilnikom.

toriju z 12 svetilniki opisana v poglavju 2.5 in referenčne merilne sisteme opisane v poglavju 2.6. Meritve razdalj med uporabnikom in svetilnikom smo izvedli na šestih legah uporabnika (slika 4.22). Uporabnik z Optotrak IR diodami je bil postavljen v prvo lego. Nato smo pognali aplikacijo sistema za lokalizacijo in tako sprožili meritve razdalj med uporabnikom in svetilniki, ki se pošiljajo na Raspberry Pi računalnik. Sinhronizacijo meritev razdalj in meritev referenčne lege uporabnika smo implementirali v Matlab Simulink shemi na osebnem računalniku. V Matlab Simulink shemo smo pošiljali izmerjene razdalje z Rasberry Pi računalnika ter referenčne meritve lege uporabnika. Shema merilnega sistema je predstavljena na sliki 2.8 v poglavju 2.3. Za vsako lego uporabnika smo zajeli 250 vzorcev.

Z eksperimentalno postavitvijo svetilnikov in šestih leg uporabnika smo dosegli velik razpon medsebojnih orientacij med uporabnikom in svetilniki, kot tudi velik razpon izmerjenih razdalj (tabela 4.7).



Slika 4.21: Zgoraj – napaka meritve razdalje (modra) in z modelom popravljene razdalje (rdeča) med uporabnikom in svetilnikom pri rotaciji uporabnika po azimutu od -90° do 90° s korakom po 1°. Spodaj – napaka meritve razdalje (modra) in z modelom popravljene razdalje (rdeča) premaknjeni za povprečno vrednost za primerjavo oblike napake. Rumena vodoravna črta predstavlja vrednost 0.

Tabela 4.7: Razpon merjenih parametrov pri eksperimentu z merilnim sistemom za lokalizacijo v laboratoriju pri šestih legah uporabnika in 12 svetilnikih.

	min.	maks.
azimut / °	-157	171
elevacija / $^\circ$	-90	-28
razdalje / m	3	8

#### 4.3.3.1 Rezultati

Rezultati meritev in vplivi korekcije modela napake, zgrajenega iz nevronske mreže, so najprej prikazani na posameznih slikah za posamezno lego uporabnika (slike 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28). Zgornji del slike predstavlja medsebojno orientacijo uporabniksvetilnik po elevaciji in azimutu za vsak svetilnik. Vodoravni modri črti nakazujeta območje elevacije, rdeči črti pa območje azimuta, ki je zajeto v učni množici nevronske mreže. Graf na sliki 4.23 prikazuje povprečno napako za vsak par uporabnik–svetilnik za uporabljen model napake (Model), korekcijsko metodo, ki ne upošteva medsebojne orientacije med svetilnikom in uporabnikom (Range Bias), ter surove meritve razdalj (Meritve).

Pri prvi legi se je napaka zmanjšala pri vseh svetilnikih razen pri četrtem in enajstem svetilniku (slika 4.23). Pri vseh parih uporabnik-svetilnik, ki imajo vrednosti azimuta in elevacije znotraj učne množice, je prišlo do zmanjšanja napake razdalje, z izjemo pri četrtem svetilniku. Pri drugi legi se je napaka zmanjšala pri vseh svetilnikih razen pri



Slika 4.22: Lega 12 svetilnikov (S1–S12) v laboratoriju in šest leg uporabnika pri meritvah za validacijo modela napake v odvisnosti od medsebojne orientacije uporabniksvetilnik.



Slika 4.23: Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za prvo lego uporabnika, s prikazano medsebojno orientacijo. Napake so prikazane za uporabljen model napake (Model), korekcijsko metodo, ki ne upošteva medsebojne orientacije med svetilnikom in uporabnikom (Range Bias), ter surove meritve razdalj (Meritve).

7, 10, 11 in 12, od tega je samo 7 tisti, ki ima vrednosti azimuta in elevacije znotraj učne množice (slika 4.24). Podobno je bilo pri tretji legi uporabnika, kjer ni prišlo do zmanjšanja napake razdalje pri svetilnikih 3, 4, 7 in 12, od tega sta bila le 3 in 12 znotraj kotov v učni množici (slika 4.25). Pri četrti legi uporabnika je uporaba modela zmanjšala napako pri vseh svetilnikih z izjemo pri 3 in 11, katerih orientacija glede na uporabnika je bila znotraj učne množice nevronske mreže (slika 4.26). Pri peti legi ni prišlo do zmanjšanja napake pri 7, 10, 11 in 12 svetilniku, od tega sta bila 7 in 12 znotraj učne množice (slika 4.27). Pri šesti legi je bila izjema samo pri 5 svetilniku, ki je bil še znotraj obsega kotov, uporabljenih v učni množici modela napake (slika 4.28).

Skupen vpliv uporabe popravkov na izmerjene razdalje je prikazan na sliki 4.29, kjer so razvidne povprečne napake vseh 12 svetilnikov za vsako lego uporabnika posebej. Graf napake prikazuje delovanje modela napake izmerjene razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika v realističnem okolju z ovirami in odboji v prostoru. Predstavljen model (modra črta) je v vseh legah uporabnika pod ne-



Slika 4.24: Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za drugo lego uporabnika, s prikazano medsebojno orientacijo.



Slika 4.25: Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za tretjo lego uporabnika, s prikazano medsebojno orientacijo.



Slika 4.26: Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za četrto lego uporabnika, s prikazano medsebojno orientacijo.



Slika 4.27: Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za peto lego uporabnika, s prikazano medsebojno orientacijo.



Slika 4.28: Napaka izmerjene razdalje za posamezen par uporabnik-svetilnik za šesto lego uporabnika, s prikazano medsebojno orientacijo.

orientacijsko metodo in surovimi meritvami razdalj. Maksimalna napaka razdalje znaša 0,1 m (tabela 4.8). Skupna napaka čez vse lege uporabnika se je izboljšala za 0,02 m v primerjavi s surovimi meritvami razdalj. Druga uporabljena metoda ni izboljšala izmerjene razdalje.

Tabela 4.8: Povprečna, maksimalna in minimalna napaka za šest leg uporabnika z uporabljenim modelom, korekcijami brez informacije o medsebojni orientaciji uporabnika in svetilnika in surove meritve razdalje.

	NN model	Range Bias	Meritve
povprečna napaka / m	0,07	$0,\!12$	0,09
maksimalna napaka / m	$0,\!10$	0,16	$0,\!11$
minimalna napaka / m	$0,\!06$	0,09	$0,\!07$

#### 4.3.3.2 Uporaba modela v lokalizacijiskem sistemu

Model za korekcijo napake zaradi medsebojne orientacije uporabnika in svetilnika smo uporabili pri lokalizaciji uporabnika (tabela 4.9). Za lokalizacijo uporabnika smo upo-



Slika 4.29: Povprečna napaka razdalj do 12 svetilnikov v eksperimentu s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju, prikazana za vsako lego svetilnika posebej skupaj s standardnim odklonom. Rezultati so predstavljeni za model napake (Model), korekcijsko metodo, ki ne upošteva medsebojne orientacije med svetilnikom in uporabnikom (Range Bias), ter surove meritve razdalj (Meritve).

rabili tri različne verzije razdalj med uporabnikom in dvanajstimi svetilniki, ki so bile izmerjene v laboratoriju: surove meritve razdalj (Meritve); z metodo, ki ne upošteva medsebojne orientacije svetilnika in uporabnika popravljene razdalje (Range Bias); ter s predstavljenim modelom popravljene razdalje (NN model). Za referenčno pozicijo smo uporabili referenčna sistema opisana v poglavju 2.6. V 2D se je napaka povečala za 0,05 m, standardni odklon za 0,01 m. Nasprotno se je zgodilo v 3D, kjer se je napaka z uporabo modela zmanjšala za 0,15 m, standardni odklon pa za 0,03 m.

#### 4.3.4 Razprava

Rezultati meritev z merilnim sistemom za lokalizacijo v Laboratoriju za robotiko v 3D prostoru potrjujejo izboljšanje meritve razdalje med svetilniki in uporabnikom z uporabo modela, ki uporablja informacijo o medsebojni orientaciji svetilnika in upo-

_		NN model	Meritve
2D	Napaka / m STD / m	0,07 0,03	0,03 0,02
3D	Napaka / m STD / m	$0,25 \\ 0,23$	0,40 0,26

Tabela 4.9: Rezultat lokalizacije z in brez uporabe modela napake.

rabnika. Povprečna napaka razdalje se je v merilnem sistemu za lokalizacijo zmanjšala za  $0,02\,\mathrm{m}.$ 

Pri analizi napak po posameznih legah opazimo, da je večina primerov, ko sta svetilnik in uporabnik v taki medsebojni orientaciji, ki je bila zajeta v učnih meritvah, manjša v primerjavi s surovimi meritvami. Vzroki za slabše obnašanje v nekaterih primerih, ko ni prišlo do izboljšanja, je v preprostejšem načinu določanja medsebojne orientacije in NLOS pogojev, ki v modelu niso zajeti. Scenarij v laboratoriju ima po drugi strani tudi nekaj NLOS pogojev, ki v povprečju niso negativno vplivali na delovanje modela. Poslabšanje pogojev NLOS bi se poznalo na zmanjšanjem delovanju modela napake.

Druga metoda ni izboljšala napake razdalje. To je bil pričakovan rezultat, metoda namreč ne uporablja informacije o orientaciji uporabnika. Popravljanje razdalje samo z uporabo izmerjene razdalje lahko vodi od napačnih popravkov, ki še dodatno povečajo napako.

Za predstavljen model napake smo z meritvam potrdili zmanjšanje povprečne razdalje med svetilniki in uporabnikom. Čeprav model ni naučen na učni množici, ki bi zajemala celoten obseg gibanja uporabnika v prostoru, smo z modelom dosegli zmanjšanje napake izmerjene razdalje, kar nam z metodo brez uporabe informacije o orientaciji ni uspelo.

Rezultati lokalizacije so pokazali končno izboljšanje lokalizacije uporabnika v 3D prostoru. Posledica popravljenih razdalj se opazi na z koordinati, ki je zaradi postavitve svetilnikov in uporabnika predstavlja največji vir napake pri določanju končne pozicije uporabnika.

# 5 Zaključek

Dokalizacija v zgradbah je široko področje, ki predstavlja osnovo za različne aplikacije v industriji, športu in zdravstvenih ustanovah, zaradi porasta avtomatiziranih naprav za vsakodnevna opravila pa tudi v osebnih aplikacijah posameznih uporabnikov. Zaradi različnih tehnologij in algoritmov je lokalizacija v zgradbah široko in zanimivo znanstveno področje z možnostmi dodatnega razvoja. Z namenom zmanjšanja napak radijske lokalizacije v zgradbah smo si v doktorski disertaciji zastavili dva cilja: (i) izboljšanje avtomatske lokalizacije svetilniškega sistema z uporabo dodatnih referenčnih enot in (ii) zmanjšanje napake meritve razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije svetilnika in uporabnika z namenom izboljšanja lokalizacije uporabnika.

Razvili in analizirali smo avtomatski postopek lokalizacije svetilnikov v delovnem koordinatnem sistemu z dodatnimi referenčnimi enotami. Najprej smo s simulacijami opravili analizo vplivov večih parametrov na napako lokalizacije svetilnikov s tremi lokalizacijskimi enotami. Analiza simulacij spreminjanja števila referenčnih enot je pokazala, da se lokalizacija svetilnikov izboljšuje z dodajanjem referenčnih enot, a je zmanjšanje z vsako dodatno enoto manjše. Iz ugotovitev lahko pridemo do zaključka, da v podobnih konfiguracijah do 16 svetilnikov ne potrebujemo velikega števila referenčnih enot za dosego optimalnih vrednosti APE. Z rezultati simulacij premika referenčne plošče smo za scenarij velikega odprtega prostora in za scenarij manjšega prostora z ovirami pridobili optimalno pozicijo, v kateri je APE svetilnikov najmanjši. To smo z eksperimentalno validacijo tudi potrdili. Simulacijo za izračun optimalne pozicije referenčne plošče bi lahko izboljšali s kompleksnejšim modelom meritve razdalje. Ta bi lahko v primeru zahtevnejših okolij s kompleksnejšimi konfiguracijami svetilnikov in težjimi pogoji NLOS podajal boljše rezultate glede optimalne pozicije referenčne plošče.

Pri analizi se je pojavil problem z delovanjem lokalizacijske metode SDP, saj je imela pri konfiguracijah A0 referenčne plošče večje vrednosti APE kot lokalizacijski metodi

MDS in TRI, kar nam je v določenih primerih onemogočalo primerjavo rezultatov metod. Z dodatnimi simulacijami smo ugotovili, da je vzrok v občutljivosti metode SDP na točnost razdalj med svetilniki. Uporaba preprostega modela meritve razdalje v simulacijah pa je predstavljala težavo pri primerjavi absolutnih vrednosti APE z rezultati meritev. Zaradi razlike v vrednostih APE primerjava med simulacijskimi in eksperimentalnimi rezultati ni bila mogoča.

Z analizo vpliva višinske razlike med svetilniki in referenčno ploščo smo raziskovali smiselno mejo za dosego čim boljših rezultatov lokalizacije svetilnikov. Rezultati so pokazali, da je optimalna vrednost taka višinska razlika, ki je enaka polovici dolžine stranice pravokotnika, ki ga svetilniki orisujejo na tleh. Ugotovitve se ni dalo preveriti v realnem okolju, saj je ta parameter omejen z višino prostorov, kot tudi z omejitvami postavitve svetilnikov. Iz analize pa lahko zaključimo, da je za optimalno avtomatsko lokalizacijo svetilnikov najboljša postavitev referenčne plošče na najnižji možni položaj. Na ta način dosežemo največjo višinsko razliko med svetilniki in referenčno ploščo.

Za eksperimentalno validacijo smo opravili meritve v dveh scenarijih, v vsakem z dvema položajema referenčne plošče. Scenarij v telovadnici predstavlja velik odprt prostor s pogoji LOS, scenarij v laboratoriju pa manjši prostor z ovirami in pogoji NLOS. Z rezultati smo potrdili izboljšanje lokalizacije svetilnikov z uporabo dodatnih referenčnih enot v scenariju v telovadnici za 0,01 m in v scenariju v laboratoriju za 0,30 m. Pri meritvah z referenčno ploščo v drugem položaju, kjer je bila napaka lokalizacije svetilnikov večja, smo potrdili simulacijske rezultate za določanje položaja referenčno plošče. To pomeni, da lahko za določanje optimalnega položaja uporabimo simulacijska orodja, ki imajo preprost model napake meritve razdalje. Na koncu nam je uspel postopek popolne avtomatske lokalizacije svetilnikov v delovnem koordinatnem sistemu 3D z napako pod 0,32 m.

Avtomatska metoda za lokalizacijo svetilnikov z dodatnimi referenčnimi enotami predstavlja hitro in enostavno metodo lokalizacije svetilnikov. Edina zahteva avtomatske metode lokalizacije svetilnikov so dodatne enote na referenčni plošči. Metoda z elektronskim tahimetrom sicer omogoča pravilnejše meritve pozicij svetilnikov, vendar je zato potrebna dodatna oprema, namestitev odbojnih tarč za meritev referenčnih točk in dodatno znanje. Predstavljena metoda pa omogoča hitrejšo in lažjo rekonfigurabilnost lokalizacijskega sistema.

Vsebina iz poglavja 3 z naslovom Avtomatska lokalizacija svetilnikov v 3D pro-

storu z dodatnimi referenčnimi enotami je bila objavljena v znanstveni reviji IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement: Krapež Peter, Munih Marko. Anchor calibration for real-time-measurement localization systems. *IEEE Transactions* on Instrumentation and Measurement. 2020; 69(12):9907-9917.

Drugi del doktorskega raziskovanja je bil usmerjen v zmanjševanje napake meritve razdalje med svetilnikom in uporabnikom. V ta namen smo razvili model, ki vključuje informacijo o medsebojni orientaciji med obema enotama. Model smo zgradili z nevronsko mrežo, ki smo jo učili z naborom meritev razdalj med svetilnikom in uporabnikom pri različnih medsebojnih orientacijah in razdaljah. Za meritve učne množice smo razvili mehanizem za rotacijo uporabnika po azimutu in elevaciji. Razvoj mehanizma je predstavljal izziv, saj sta elevacijska os in njeno vpetje v bližini radijske enote ter njene antene. Pri prvi verziji mehanizma za rotacijo uporabnika sta namreč oblika osi in vpetja negativno vplivali na meritve razdalje. V izogib temu smo pri drugi verziji obliko teh elementov okoli radijske enote zmanjšali, kolikor je bilo mogoče z ozirom na ohranjanje nosilnosti mehanizma.

Pred učenjem končnega modela zmanjševanja napake smo analizirali ustreznost učne množice, ki je imela pri robnih vrednostih elevacij povečana odstopanja v izmerjeni razdalji. Ta analiza je zajemala ponavljanje učnih meritev in njihovo primerjavo, učenje dodatnih nevronskih mrež z zmanjšanimi učnimi množicami in meritve moči prejetega signala. Primerjava ponovljenih meritev je pokazala dobro ponovljivost merilnega postopka učne množice. Z dodatnimi nevronskimi mrežami smo ugotovili, da nevronske mreže s polno učno množico dosegajo boljše rezultate kot tiste z zmanjšanim obsegom. S tem smo pokazali, da pojavi na robovih elevacij niso posledica merilnega postopka in razmer v času meritev učnih množic. Z meritvami ocenjene moči prejetega signala smo dodatno potrdili normalno stanje pri učnih meritvah. Do manjših prejetih moči je prišlo pri povečevanju medsebojne razdalje svetilnika in uporabnika. Manjše vrednosti moči smo izmerili tudi pri robnih vrednostih elevacij, kar je posledica pravokotne orientacije svetilniške in uporabniške antene v omenjenih situacijah.

Meritve učne množice so bile zahtevne zaradi ročne poravnave svetilnika in uporabnika pri vsaki novi referenčni razdalji in ponovitvi. Postopek bi lahko izboljšali z avtomatiziranim mehanizmom, kar nam bi omogočilo še večji nabor meritev pri manjših inkrementih razdalj. Pri meritvah učnih množic smo imeli težave pri vrednostih azimuta od 80° do 180° in od -180° do -80° ter vrednostih elevacije od 70° do 180° in od -180° do -70°. Pri izmerjenih razdaljah je bil na celotnem razponu referenčnih razdalj prisoten šum, ki ga nismo uspeli odpraviti s ponovitvami meritev pri drugačni postavitvi svetilnika in uporabnika.

Parameter, ki določa sposobnost izbrane nevronske mreže, je število nevronov v skriti plasti. Optimalno število nevronov smo izbrali na podlagi rezultatov nevronskih mrež z različno konfiguracijo na dveh vrstah meritev. Prve so bile podmnožica učnih meritev, ki niso bile uporabljene pri učenju nevronskih mrež. Druge so bile meritve z merilnim sistemom za lokalizacijo v Laboratoriju za robotiko z 12 svetilniki. Na podlagi rezultatov smo izbrali nevronsko mrežo s šestimi nevroni v skriti plasti. V eksperimentalni validaciji smo prikazali in potrdili delovanje modela napake razdalje v odvisnosti od orientacije svetilnika in uporabnika. Z zmanjšanjem napake izmerjene razdalje smo bolj točno lokalizirali uporabnika v 3D prostoru.

Vsebina poglavja 4 z naslovom Model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije uporabnika je bila obljavljena v znanstveni reviji Sensors: Krapež Peter, Vidmar Matjaž, Munih Marko. Distance measurements in UWB-radio localization systems corrected with a feedforward neural network model. *Sensors*. 2021; 21(7):2294.

Raziskovanje je smiselno nadaljevati z zasnovo dodatnih scenarijev z zahtevnejšimi pogoji in postavitvami svetilnikov. To bi omogočilo še bolj poglobljeno analizo vplivov okolja na lokalizacijo svetilnikov z referenčnimi enotami. Podobno bi lahko naredili tudi z modelom napake razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije svetilnika in uporabnika. Prav tako bi model lahko z dodatnimi učnimi meritvami še razširili ter tako povečali njegovo uporabnost v drugačnih okoljih.

Med raziskovanjem smo pri uporabljenem lokalizacijskem sistemu opazili pojav dinamičnega pogreška. Zanimiva bi bila študija modela v dinamičnih pogojih ter njegova morebitna razširitev z dodatnim vhodnim parametrom – hitrostjo uporabnika.

Zanimalo nas je tudi, ali in kako ohišje vpliva na rezultate izmerjene razdalje. Po opravljenih meritvah razdalje z obema enotama v ohišju in brez njega pri različnih medsebojnih orientacijah svetilnika in uporabnika smo ugotovili, da ohišje vpliva na potek napake izmerjene razdalje. V nadaljevanju raziskav bi lahko analizirali vpliv oblike ohišja na potek napake razdalje v odvisnosti od medsebojne orientacije enot. S pravilno zasnovo ohišja bi lahko zmanjšali orientacijsko napako na konstantno napako razdalje.

Do zdaj smo se ukvarjali z zmanjšanjem napake meritve razdalje. Drug pristop k izboljšanju točnosti lokalizacije pa je uporaba lokalizacijskih algoritmov, ki vključujejo mehanizme določanja kakovosti izmerjenih razdalj in mehanizme določanja smiselnosti uporabe svetilnikov v trenutni postavitvi uporabnika. Raziskovanje bi lahko nadaljevali z nadgradnjo obstoječih, v literaturi najdenih algoritmov izločanja manj primernih svetilnikov iz postopka lokalizacije.

### Izvirni prispevki doktorske disertacije

- Avtomatska lokalizacija svetilnikov z dodatnimi referenčnimi enotami v 3D prostoru za izboljšanje lokalizacije in evalvacija vpliva dodatnih referenčnih enot na lokalizacijo svetilnikov.
- Upoštevanje vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote na izračun razdalje na podlagi meritev z uporabo nevronske mreže.
- Validacija v lokalizacijskem sistemu uporabljenega modela vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote zgrajenega iz nevronske mreže.

### Literatura

- GPS.gov, "GPS Accuracy." Dosegljivo: https://www.gps.gov/systems/gps/ performance/accuracy/. [Dostopano: 2. 9. 2019].
- [2] Y. Yu, R. Chen, L. Chen, S. Xu, W. Li, Y. Wu in H. Zhou, "Precise 3-D indoor localization based on Wi-Fi FTM and built-in sensors," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, št. 12, str. 11753–11765, 2020.
- [3] X. Hou in T. Arslan, "Monte Carlo localization algorithm for indoor positioning using bluetooth low energy devices," v 2017 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), str. 1–6, 2017.
- [4] V. Otsason, A. Varshavsky, A. LaMarca in E. de Lara, "Accurate GSM indoor localization," v UbiComp 2005: Ubiquitous Computing (M. Beigl, S. Intille, J. Rekimoto in H. Tokuda, ur.), (Berlin, Heidelberg), str. 141–158, Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [5] J. Wang, Y. Tang, J. Muñoz-Ferreras, R. Gómez-García in C. Li, "An improved indoor localization solution using a hybrid UWB-Doppler system with Kalman filter," v 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), (Anaheim, CA, USA), str. 181–183, Mar. 2018.
- [6] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. Al-Ammar in H. Al-Khalifa, "Ultra-wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances," *Sensors*, vol. 16, št. 5, str. 707, 2016.
- [7] L. Rykała, A. Typiak in R. Typiak, "Research on developing an outdoor location system based on the ultra-wideband technology," *Sensors*, vol. 20, str. 6171, Oct 2020.
- [8] Y. Wang, W. Zhang, F. Li, Y. Shi, F. Nie in Q. Huang, "UAPF: A UWB aided particle filter localization for scenarios with few features," *Sensors*, vol. 20, str. 6814, Nov 2020.
- [9] M. Cimdins, S. O. Schmidt in H. Hellbrück, "MAMPI-UWB-multipath-assisted devicefree localization with magnitude and phase information with UWB transceivers," *Sensors*, vol. 20, str. 7090, Oct 2020.

- [10] F. Bonnin-Pascual in A. Ortiz, "UWB-based self-localization strategies: A novel ICPbased method and a comparative assessment for noisy-ranges-prone environments," *Sensors*, vol. 20, str. 5613, Oct 2020.
- [11] C. He, C. Tang in C. Yu, "A federated derivative cubature Kalman filter for IMU-UWB indoor positioning," *Sensors*, vol. 20, št. 12, str. 3514, 2020.
- [12] A. R. Jiménez Ruiz in F. Seco Granja, "Comparing Ubisense, BeSpoon, and Decawave UWB location systems: Indoor performance analysis," *IEEE Transactions Instrumentation Measurement*, vol. 66, str. 2106–2117, Apr. 2017.
- [13] S. J. Ingram, D. Harmer in M. Quinlan, "Ultrawideband indoor positioning systems and their use in emergencies," v PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556), str. 706–715, 2004.
- [14] J. Kolakowski, V. Djaja-Josko, M. Kolakowski in K. Broczek, "UWB/BLE tracking system for elderly people monitoring," *Sensors*, vol. 20, str. 1574, Mar 2020.
- [15] M. Delamare, F. Duval in R. Boutteau, "A new dataset of people flow in an industrial site with UWB and motion capture systems," *Sensors*, vol. 20, str. 4511, Aug 2020.
- [16] A. Martinelli, S. Jayousi, S. Caputo in L. Mucchi, "UWB positioning for industrial applications: the galvanic plating case study," v 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), str. 1–7, IEEE, 2019.
- [17] A. Chehri, P. Fortier in P. M. Tardif, "UWB-based sensor networks for localization in mining environments," Ad Hoc Networks, vol. 7, št. 5, str. 987–1000, 2009.
- [18] J. Tiemann, J. Pillmann, S. Bocker in C. Wietfeld, "Ultra-wideband aided precision parking for wireless power transfer to electric vehicles in real life scenarios," v 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), str. 1–5, IEEE, 2016.
- [19] K. Guo, Z. Qiu, C. Miao, A. H. Zaini, C.-L. Chen, W. Meng in L. Xie, "Ultra-widebandbased localization for quadcopter navigation," *Unmanned Systems*, vol. 4, str. 23–34, Feb. 2016.
- [20] I. Guvenc in C.-C. Chong, "A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, št. 3, str. 107– 124, 2009.
- [21] J. Sidorenko, V. Schatz, D. Bulatov, N. Scherer-Negenborn, M. Arens in U. Hugentobler, "Self-calibration for the time difference of arrival positioning," *Sensors*, vol. 20, št. 7, str. 2079, 2020.

- [22] A. H. Sayed, A. Tarighat in N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," *IEEE signal processing magazine*, vol. 22, št. 4, str. 24–40, 2005.
- [23] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee in J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C* (Applications and Reviews), vol. 37, št. 6, str. 1067–1080, 2007.
- [24] S. Gezici, "A survey on wireless position estimation," Wireless personal communications, vol. 44, št. 3, str. 263–282, 2008.
- [25] C. Zhou, T. Xu in H. Dong, "Distributed locating algorithm MDS-MAP (LF) based on low-frequency signal," *Compututer Science and Information Systems*, vol. 12, str. 1289– 1305, Nov. 2015.
- [26] W. Cui, C. Wu, W. Meng, B. Li, Y. Zhang in L. Xie, "Dynamic multidimensional scaling algorithm for 3-D mobile localization," *IEEE Trans. Instrumentation Measurement*, vol. 65, str. 2853–2865, Dec 2016.
- [27] Y. Shang, W. Rumi, Y. Zhang in M. Fromherz, "Localization from connectivity in sensor networks," *IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems*, vol. 15, str. 961–974, Nov. 2004.
- [28] N. Krislock in H. Wolkowicz, "Explicit sensor network localization using semidefinite representations and facial reductions," *SIAM Journal on Optimization*, vol. 20, str. 2679– 2708, Jan. 2010.
- [29] D. Drusvyatskiy, N. Krislock, Y.-L. Voronin in H. Wolkowicz, "Noisy Euclidean distance realization: robust facial reduction and the Pareto frontier," SIAM Journal on Optimization, vol. 27, str. 2301–2331, Oct. 2017.
- [30] D. K. Goldenberg, P. Bihler, M. Cao, J. Fang, B. Anderson, A. S. Morse in Y. R. Yang, "Localization in sparse networks using sweeps," v *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, (Los Angeles, CA, USA), str. 110–121, Sep. 2006.
- [31] A. Savvides, C.-C. Han in M. B. Strivastava, "Dynamic fine-grained localization in adhoc networks of sensors," v Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, (Rome, Italy), str. 166–179, Jul. 2001.
- [32] N. B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine in S. Teller, "Anchor-free distributed localization in sensor networks," v Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, (Los Angeles, CA, USA), str. 340–341, Nov. 2003.

- [33] Y. Kuang, S. Burgess, A. Torstensson in K. Åström, "A complete characterization and solution to the microphone position self-calibration problem," v 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), (Vancouver, BC, Canada), str. 3875–3879, IEEE, May 2013.
- [34] K. Batstone, M. Oskarsson in K. Åström, "Towards real-time time-of-arrival selfcalibration using ultra-wideband anchors," v 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), (Sapporo, Japan), str. 1–8, IEEE, Sep. 2017.
- [35] Y. Zhou, C. L. Law in F. Chin, "Construction of local anchor map for indoor position measurement system," *IEEE Transactions Instrumentation Measurement*, vol. 59, str. 1986–1988, Jul. 2010.
- [36] P. Duff in H. L. Muller, "Autocalibration algorithm for ultrasonic location systems," v 7th International Symposium on Wearable Computers, vol. 3, (White Plains, NY, USA), str. 62, Oct. 2003.
- [37] K. Nakamura in K. Sakamura, "Sub-meter accuracy localization system using selflocalized portable UWB anchor nodes," v 1st IEEE Global Conf. Consumer Electronics 2012, (Tokyo, Japan), str. 695–698, IEEE, Oct. 2012.
- [38] M. Müller, J. Lategahn, L. Telle in C. Röhrig, "Automatic anchor calibration in IEEE 802.15.4a networks," v 2011 8th Workshop Positioning Navigation and Communication, (Dresden, Germany), str. 67–71, IEEE, Apr. 2011.
- [39] S. Van de Velde, P. Van Torre in H. Steendam, "Fast and robust anchor calibration in range-based wireless localization," v 2013 7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), (Gold Coast, Australia), str. 1–6, IEEE, Dec. 2013.
- [40] T. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medouri in M. Salazar-Palma, "A survey of various propagation models for mobile communication," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, št. 3, str. 51–82, 2003.
- [41] X. Chen, M. Zhang, K. Ruan, C. Gong, Y. Zhang in S. X. Yang, "A ranging model based on BP neural network," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 22, st. 2, str. 325–329, 2016.
- [42] C. Alippi in G. Vanini, "A RSSI-based and calibrated centralized localization technique for wireless sensor networks," v 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06), str. 5–pp, IEEE, 2006.

- [43] C.-L. Wang, Y.-S. Chiou in S.-C. Yeh, "A location algorithm based on radio propagation modeling for indoor wireless local area networks," v 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, vol. 5, str. 2830–2834 Vol. 5, 2005.
- [44] A. Dogandzic in P. P. Amran, "Signal-strength based localization in wireless fading channels," v Conference Record of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004., vol. 2, str. 2160–2164, IEEE, 2004.
- [45] P.-C. Chen, "A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation," v WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat. No. 99TH8466), vol. 1, str. 316–320, IEEE, 1999.
- [46] S. Gezici in Z. Sahinoglu, "UWB geolocation techniques for IEEE 802.15.4a personal area networks," *MERL Technical report*, 2004.
- [47] S. Venkatesh in R. M. Buehrer, "A linear programming approach to NLOS error mitigation in sensor networks," v Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, str. 301–308, 2006.
- [48] D. B. Jourdan in N. Roy, "Optimal sensor placement for agent localization," ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), vol. 4, št. 3, str. 1–40, 2008.
- [49] V. Dizdarevic in K. Witrisal, "On impact of topology and cost function on LSE position determination in wireless networks," v Proceedings of the Workshop on Positioning, Navigation, and Commun. (WPNC), str. 129–138, Citeseer, 2006.
- [50] J. Riba in A. Urruela, "A non-line-of-sight mitigation technique based on ML-detection," v 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 2, str. ii–153, IEEE, 2004.
- [51] B. Denis, J.-B. Pierrot in C. Abou-Rjeily, "Joint distributed synchronization and positioning in UWB ad hoc networks using TOA," *IEEE transactions on microwave theory* and techniques, vol. 54, št. 4, str. 1896–1911, 2006.
- [52] D. B. Jourdan, D. Dardari in M. Z. Win, "Position error bound for UWB localization in dense cluttered environments," v 2006 IEEE International Conference on Communications, vol. 8, str. 3705–3710, IEEE, 2006.
- [53] B. Alavi in K. Pahlavan, "Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements," *IEEE communications letters*, vol. 10, št. 4, str. 275– 277, 2006.

- [54] H. Wu, W. Wang, J. Wang in P. Mohapatra, "Rangingnet: A convolutional deep neural network based ranging model for wireless sensor networks (WSN)," *Computer Communications*, vol. 140–141, str. 61–68, 2019.
- [55] L. Schmid, D. Salido-Monzú in A. Wieser, "Accuracy assessment and learned error mitigation of UWB ToF ranging," v 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), str. 1–8, 2019.
- [56] K. Bregar in M. Mohorčič, "Improving indoor localization using convolutional neural networks on computationally restricted devices," *IEEE Access*, vol. 6, str. 17429–17441, 2018.
- [57] B. Merkl, A. Fathy in M. Mahfouz, "Base station orientation calibration in 3-D indoor UWB positioning," v 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, vol. 1, str. 93–96, 2008.
- [58] M. Sharma, C. G. Parini in A. Alomainy, "Influence of antenna alignment and line-ofsight obstruction on the accuracy of range estimates between a pair of miniature UWB antennas," v 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), str. 1–5, 2015.
- [59] J. Blumenstein, A. Prokes, A. Chandra, T. Mikulasek, R. Marsalek, T. Zemen in C. Mecklenbräuker, "In-vehicle channel measurement, characterization, and spatial consistency comparison of 30–11 GHz and 55–65 GHz frequency bands," *IEEE Transactions* on Vehicular Technology, vol. 66, št. 5, str. 3526–3537, 2017.
- [60] J. Tiemann, J. Pillmann in C. Wietfeld, "Ultra-wideband antenna-induced error prediction using deep learning on channel response data," v 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), str. 1–5, 2017.
- [61] W. Wang, Z. Zeng, W. Ding, H. Yu in H. Rose, "Concept and validation of a largescale human-machine safety system based on real-time UWB indoor localization," v 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), (Macau, China), str. 201–207, Jan. 2019.
- [62] J. Rantakokko, P. Händel, M. Fredholm in F. Marsten-Eklöf, "User requirements for localization and tracking technology: A survey of mission-specific needs and constraints," v 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, str. 1–9, 2010.
- [63] R. Bharadwaj, S. Swaisaenyakorn, C. G. Parini, J. C. Batchelor in A. Alomainy, "Impulse radio ultra-wideband communications for localization and tracking of human body and

limbs movement for healthcare applications," *IEEE Transactionsactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, št. 12, str. 7298–7309, 2017.

- [64] M. A. Al-Ammar, S. Alhadhrami, A. Al-Salman, A. Alarifi, H. S. Al-Khalifa, A. Alnafessah in M. Alsaleh, "Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms," v 2014 International Conference on Cyberworlds, str. 245–252, IEEE, 2014.
- [65] R. Mautz, Indoor positioning technologies. Doktorska disertacija, ETH Zürich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Zürich, Switzerland, 2012.
- [66] T. Ruiz-López, J. L. Garrido, K. Benghazi in L. Chung, "A survey on indoor positioning systems: Foreseeing a quality design," v Distributed Computing and Artificial Intelligence (A. P. de Leon F. de Carvalho, S. Rodríguez-González, J. F. De Paz Santana in J. M. C. Rodríguez, ur.), str. 373–380, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [67] Y. Gu, A. Lo in I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 11, št. 1, str. 13–32, 2009.
- [68] R. Jamnik, Uvod v matematično statistiko. Društvo matematikov, fizikov in astronomov, 1976.
- [69] J. Drnovšek, J. Bojkovski, G. Geršak, I. Pušnik in D. Hudoklin, Metrologija. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za metrologijo in kakovost, 2012.
- [70] JCGM, "International vocabulary of metrology basic and general concepts and associated terms (VIM)." http://www.bipm.org, 2012.
- [71] J. Bedkowski, A. Masłowski in G. De Cubber, "Real time 3D localization and mapping for usar robotic application," *Industrial Robot: An International Journal*, 2012.
- [72] M. Z. Win in R. A. Scholtz, "Impulse radio: How it works," *IEEE Communications letters*, vol. 2, št. 2, str. 36–38, 1998.
- [73] Z. Sahinoglu, S. Gezici in I. Guvenc, Ultra-Wideband positioning systems. Cambridge, New York, 2008.
- [74] M.-G. Di Benedetto, UWB communication systems: a comprehensive overview. Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [75] D. Neirynck, E. Luk in M. McLaughlin, "An alternative double-sided two-way ranging method," v 2016 13th Workshop Positioning, Navigation and Communications (WPNC), (Bremen, Germany), str. 1–4, IEEE, Oct. 2016.

- [76] M. Kwak in J. Chong, "A new double two-way ranging algorithm for ranging system," v 2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, str. 470–473, IEEE, 2010.
- [77] S. A. Van De Geer, "Least-squares estimation," Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability, vol. 2, 2008.
- [78] R. B. Langley et al., "Dilution of precision," GPS world, vol. 10, št. 5, str. 52–59, 1999.
- [79] S. Slajpah, Nosljivi senzorni sistem za merjenje in ocenjevanje vstajanja. Doktorska disertacija, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija, 2015.
- [80] B. K. Horn, H. M. Hilden in S. Negahdaripour, "Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 5, št. 7, str. 1127–1135, 1988.
- [81] A. Y. Alfakih, A. Khandani in H. Wolkowicz, "Solving euclidean distance matrix completion problems via semidefinite programming," *Computational optimization and applications*, vol. 12, št. 1–3, str. 13–30, 1999.
- [82] L. Liberti, C. Lavor, N. Maculan in A. Mucherino, "Euclidean distance geometry and applications," SIAM review, vol. 56, št. 1, str. 3–69, 2014.
- [83] I. Borg in P. J. Groenen, Modern multidimensional scaling: Theory and applications. Springer Science & Business Media, 2005.
- [84] H. Wolkowicz, R. Saigal in L. Vandenberghe, Handbook of semidefinite programming: theory, algorithms, and applications, vol. 27. Springer Science & Business Media, 2012.
- [85] T. Eren, O. Goldenberg, W. Whiteley, Y. R. Yang, A. S. Morse, B. D. Anderson in P. N. Belhumeur, "Rigidity, computation, and randomization in network localization," v INFOCOM 2004. 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol. 4, str. 2673–2684, IEEE, 2004.
- [86] F. Santos, "Localization in wireless sensor networks," ACM Journal, vol. 5, str. 1–19, Nov. 2008.
- [87] NCSS, Multidimensional Scaling. Reading, Massachusetts: NCSS Statistical Software, 1981.
- [88] D. Moore, J. Leonard, D. Rus in S. Teller, "Robust distributed network localization with noisy range measurements," v Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, (Baltimore, MD, USA), str. 50–61, ACM, Nov. 2004.

- [89] A. Cazzorla, G. De Angelis, A. Moschitta, M. Dionigi, F. Alimenti in P. Carbone, "A 5.6-GHz UWB position measurement system," *IEEE Transactions Instrumentation Measurement*, vol. 62, str. 675–683, Mar. 2013.
- [90] Decawave, "Sources of error in DW1000 based two-way ranging (TWR) schemes," Tech.
  Rep. APS011, Decawave, Bay Area Executive Offices, 533 Airport Blvd. Suite 350,
  Burlingame, CA. 94010, U.S.A, Aug. 2018.
- [91] Decawave, DW1000 User Manual. Decawave, Bay Area Executive Offices, 533 Airport Blvd. Suite 350, Burlingame, CA. 94010, U.S.A, 2017.

Dodatek A

## Dodatne približane meritve učne množice



Slika A.1: Približane učne meritve za referenčni razdalji 1 m (zgoraj) in 1,5 m (spodaj), pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.



Slika A.2: Približane učne meritve za referenčni razdalji 2 m (zgoraj) in 2,5 m (spodaj), pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.



Slika A.3: Približane učne meritve za referenčni razdalji 3 m (zgoraj) in 3,5 m (spodaj), pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.



Slika A.4: Približane učne meritve za referenčni razdalji 5 m (zgoraj) in 5,5 m (spodaj), pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.


Slika A.5: Približane učne meritve za referenčni razdalji 6 m (zgoraj) in 6,5 m (spodaj), pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.



Slika A.6: Približane učne meritve za referenčni razdalji 7 m (zgoraj) in 7,5 m (spodaj), pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.



Slika A.7: Približane učne meritve za referenčno razdaljo 8 m, pri čemer so prikazane povprečne vrednosti 250 vzorcev za vsako merilno točko. Navpične sive črte označujejo en prelet azimuta za konstantno vrednost elevacije. Modra črta predstavlja referenčno razdaljo.

# Dodatek B

## Dodatne meritve moči



Slika B.8: Ocena moči prejetega signala prvega sporočila za 15 referenčnih razdalj učne množice. Znotraj vsake razdalje se od leve proti desni spreminja elevacija od -70 stopinj do 70 stopinj s korakom 5 stopinj in znotraj vsakega koraka elevacije se spreminja azimut od -80 stopinj do 80 stopinj s korakom 5 stopinj.



Slika B.9: Postavitev sistema pri dodatnih meritvah moči.



Slika B.10: Obsegi azimuta in elevacije pri dodatnih meritvah moči.



Slika B.11: Ocenjena moč prejetega signala z originalno anteno v plastičnem ohišju v vertikalni polarizaciji (zgoraj) in horizontalni polarizaciji (spodaj) pri razdalji med svetilnikom in uporabnikom 1,25 m. Povprečna ocenjena moč pri vertikalni polarizaciji je  $-80,1 \,\mathrm{dBm}$  in pri horizontalni polarizaciji  $-80,3 \,\mathrm{dBm}$ .

![](_page_153_Figure_1.jpeg)

Slika B.12: Ocenjena moč prejetega signala z originalno anteno brez plastičnega ohišja v vertikalni polarizaciji (zgoraj) in horizontalni polarizaciji (spodaj) pri razdalji med svetilnikom in uporabnikom 1,25 m. Povprečna ocenjena moč pri vertikalni polarizaciji je  $-80,3 \,\mathrm{dBm}$  in pri horizontalni polarizaciji  $-81,2 \,\mathrm{dBm}$ .

![](_page_154_Figure_1.jpeg)

Slika B.13: Ocenjena moč prejetega signala z lijak anteno in adapterjem HP G281A pri vertikalni polarizaciji (zgoraj) in horizontalni polarizaciji (spodaj) pri razdalji med svetilnikom in uporabnikom 1,25 m. Povprečna ocenjena moč pri vertikalni polarizaciji je  $-78,1 \,\mathrm{dBm}$  in pri horizontalni polarizaciji  $-78,5 \,\mathrm{dBm}$ .

Dodatek C

IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2020

## Anchor Calibration for Real-Time-Measurement Localization Systems

Peter Krapež and Marko Munih<sup>®</sup>, Member, IEEE

Abstract-This article investigates the effect of additional calibration modules (CMs) in a 3-D real-time localization system during the calibration of the anchor position. A quick calibration is desirable for new anchors that are positionally undetermined in the working coordinate system. Three localization methods were tested for the anchor calibration: multidimensional scaling, semidefinite programming, and iterative trilateration. First, the accuracy of the anchor localization was studied by simulating a change in the number of additional CMs and their positions. Second, tests on a real system with ultrawideband modules were performed to validate the improvements in the anchor calibration when using the additional CMs. The experimental results revealed an improvement in the anchor localization for all three methods, where the average positional error was improved by 0.01 m in the first scenario and 0.30 m in the second scenario. The MDS method had the best absolute performance, with an average positional error that was as much as two times less in comparison with the other two methods. This investigation demonstrates that the positional error can be successfully reduced by using additional CMs. The calibration of anchor positions in the working coordinate system using additional CMs resulted in a 3-D error of less than 0.32 m.

Index Terms-3-D anchor localization, anchor calibration calibration modules (CMs), position measurement, time-of-flight (ToF), ultrawideband (UWB) technology.

#### I. INTRODUCTION

UTONOMOUS mobile applications used in everyday life A and the localization demands of the Internet of Things are increasing. These include automatic lawnmowers, drones [1], AGVs, smart sensors [2], and even automated forklifts that leave the production site's doors to load a truck. Real-time localization based on radio trilateration (TRI) requires a number of radio anchors. To extend the range, new anchors are needed, together with the calibration of the anchor position in space. Even changes in the working site may require anchor repositioning and, consequently, a new anchor calibration. This is the advantage of localization systems with automatic anchor calibration

Manuscript received March 9, 2020; accepted June 11, 2020. Date of publication June 29, 2020; date of current version November 10, 2020. This work was supported in part by the Slovenian Research Agency through the Research Core Funding under Grant P2-0228 and the Young Researcher Founding, and in part by the European Commission through the CYBERLEGS Plus Project under Grant 731931, within the H2020 Framework (H2020-ICT-25-2016-2017). The Associate Editor coordinating the review process was Dr. Parailea Engintability. *Corresponding authors: Parailex Kernag*<sup>2</sup>

Dr. Daniel Fontanelli, (Corresponding author: Peter Krapež) The authors are with Laboratory of Robotics, Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, SI-1000 Ljubljana, Slovenia (e-mail:

Deter.krapez@fe.uni-IJ.si; marko.munih@robo.fc.uni-IJ.si). Color versions of one or more of the figures in this article are available online at https://ieeexplore.ieee.org. Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2020.3005258

In real-time localization systems (RTLSs), the mobile unit is localized by measuring the distances to static modules, i.e., anchors, with a known position. The positions of the anchors can be determined in two ways. The first option is to measure the anchor position with a measuring system, such as a tachymeter, utilizing geodetic procedures. An alternative is to calibrate the anchor position by measuring intermodule distances and computing the locations with mathematical algorithms. Although the use of external measurement equipment provides anchor positions with high accuracy, the anchors have to be constructed and placed in such a way that enables an external measurement, which means that the ability to reconfigure is reduced. The second anchor-calibration approach represents an effortless method for anchor localization and could contribute to RTLSs as a turnkey product where the end user can do the entire setup of the RTLS without additional equipment.

9907

Numerous indoor RTLSs are presented in literature and are available as products [3]. He and Dong [4] presented RTLS based on ultrawideband (UWB) technology for the asynchronous time difference of arrival localization. Kolakowski [5] developed a hybrid system where UWB is used for the first-time calibration of Bluetooth Low Energy RTLS. Wang et al. [6] used UWB as a secondary system for frequent calibration of primary RTLS based on the K-band Doppler radar sided with a gyroscope. Martinelli et al. [7] and Wang et al. [8] presented localization in a harsh industrial environment. All the abovementioned RTLSs use anchors system, with known positions, for localizing mobile modules.

A lot of work was carried out in another domain, i.e., mobile sensor localization without the use of anchor modules. The problem is the same as a stationary anchor calibration because. in both cases, no anchor modules with known positions are present. The localization of new modules can be conducted with a global approach. In this case, the positions of the old and new modules are calculated simultaneously and updated for the old and new modules. An alternative to that is the iterative approach, where only the positions of the new modules are defined.

Previous work relied on multidimensional scaling (MDS) [9], [10] as one of the global approaches to module localization. Shang et al. [11] presented a method that uses only the connectivity information between the modules. The authors implemented different approaches to constructing and refining the Euclidian distance matrix (EDM), where all the approaches share a common course of first acquiring the EDM and then using the MDS to compute the relative module

0018-9456 © 2020 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See https://www.ieee.org/publications/rights/index.html for more information

coordinates. Optionally, if more than three module positions are known, the relative module coordinates can be transformed to the global coordinate system. Another global approach is to use semidefinite programming (SDP), shown in [12] and [13], while, in [13], the EDM completion problem is addressed.

An iterative localization algorithm called sweep is explained in [14], where the iterative TRI is replaced by bilateration, so more modules can be localized. In this way, two possible locations for each new module are computed. All the possible locations are then included in the localization of the next modules, which results in a rapidly expanding number of solutions. The authors show how to reduce the number of possible module solutions by eliminating least-suitable ones. Priyantha *et al.* [15] presented a distributed localization algorithm for a network of sensors with the use of mass-spring optimization. Another distributed algorithm is shown in [16], where newly computed module coordinates are added to a set of already-localized modules.

Localization algorithms were used in the past for anchor calibrations in RTLSs. Kuang *et al.* [17] solved the localization problem by factorizing a compaction matrix, which contains information about the distances between anchor modules. The minimal noniterative solvers for the second and third space dimensions were explored. Here, the numbers of transmitting and receiving anchors are defined for each solver. Batstone *et al.* [18] used factorization of a compaction matrix, adopting the rank constraints of the compaction matrix for outlier detection. They are focused on problems with missing distances and outliers in real-time anchor calibration. The authors approached this problem by solving smaller graph problems and aligning their coordinate systems to create a global solution. The transformation was computed from the overlapping areas of smaller graphs.

Zhou *et al.* [19] presented an anchor calibration for the rotational time-difference-of-arrival and the MDS algorithm. The authors showed that MDS's accuracy rapidly increases when the number of anchors increases to ten. The algorithm for the anchor calibration presented in [20] computes more solutions with a solver using multidimensional, nonlinear least-squares fitting. Based on three fitness functions, the final solution is selected from different initial positions.

The application of an anchor calibration using a sweep algorithm was made by Nakamura and Sakamura [21]. By applying fully connected quadrilaterals from [22], the anchors were uniquely localized. The authors used TRI for the anchor calibration from three selected anchors, which defines the coordinate system. Using a method called robust quad check, no flip and flex ambiguities were ensured, which, in turn, improved the TRI algorithm.

Müller et al. [23] and Van de Velde et al. [24] introduced a new feature in the process of anchor calibration. An additional anchor (a new calibration module (CM) or temporary anchor) is used just for the purposes of anchor calibration. Müller et al. [23] presented an anchor-calibration method that uses bilateration. First, the seed anchors were computed; then, all of the other anchors were sorted in bilateration ordering, and their positions were computed with bilateration. For each configuration, the stress is computed, and the best configuration is selected for the end result. The authors implemented a temporary anchor, which was placed in the system in a way that ranging using all of the anchors was possible. After the anchor calibration is completed, a temporary anchor is removed from the anchor system. With the temporary anchor placement, new measurements are added to the collection of intermodule distances so that the anchors without line-of-sight (LOS) can be localized.

Van de Velde *et al.* [24] introduced a technique similar to the simultaneous localization and mapping (SLAM) method. Rather than using sensors to scan the surroundings, it uses radio communications for the ranging between anchors. They used a calibration unit (CU) that was moved in space by the operator in order to collect the distance measurements between the anchors and the CU. When the CU is moved in a straight line, all the intermodule distances between the anchors can be computed, and by means of weighted least squares, the anchors' coordinates can be determined.

As outlined earlier, previous studies looked at different methods of anchor calibration, with most of the research focused on 2-D localization problems. This article investigates the problem of anchor localization in 3-D space by placing localized anchors in a working coordinate system. The possibility to decrease the anchors' localization error was explored through the use of an additional CU that contains CMs with known relative positions with respect to each other. In this research, the methods MDS and SDP [13] and an algorithm based on TRI [14], [20], [23] were compared. A series of simulations was executed first to evaluate the impact that the CU has on the anchor-localization error. Then, experiments on a real system for two scenarios with LOS and non-LOS (NLOS) conditions were performed to validate the simulation results. The anchor calibration implemented four CMs on the CU to provide several possibilities for the proposed calibration method. The final goal of this work was to evaluate and present an anchor-calibration method for improved anchor localization in an arbitrary coordinate system. To the best of our knowledge, this is the first attempt to examine the effect of implementing a new CU in an anchor calibration in terms of an anchor-localization error. The anchor was localized in a specific coordinate system, and, most importantly, in 3-D, not only a planar system.

## II. ANCHOR-CALIBRATION METHOD WITH A CALIBRATION UNIT

To operate an RTLS, the positions of the anchors in a common working coordinate system must be known. Anchor calibration is a process of determining the anchors' relative positions from the measured distances between all the anchors and transforming them into a global (working) coordinate system. From *N* anchor modules,  $M = \binom{N}{2}$  intermodule distances are measured, which are part of an EDM with a size of  $N \times N$ . The anchors' positions are obtained by minimizing the error

$$e_{ij} = \|a_i - a_j\| - d_{ij} \tag{1}$$

Authorized licensed use limited to: UNIVERSITY OF LJUBLJANA. Downloaded on March 12,2021 at 08:38:08 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

![](_page_160_Figure_1.jpeg)

Fig. 1. Anchor calibration with CU.

where  $a_i$  and  $a_j$  are the positions of the anchors, and  $d_{ij}$  is the measured distance between the *i*th and the *j*th anchor.

The final positional error of the mobile unit in the RTLS is a superposition of not only the distance measurement error between the anchors and the mobile unit but also the positional error arising from the placement of the anchors used in the RTLS. Therefore, decreasing the anchor's positional error and improving the anchor's position in a working coordinate system based on an anchor calibration are the motivation for this work.

When designing the RTLS, the best conditions, within the environmental constraints in which it will operate, are desired for radio communications between the anchors and the mobile unit modules. Such conditions are usually ensured by placing the anchors at elevated positions (see Fig. 1) so that the radio signal is not obstructed by people moving around and other obstacles. With the aforementioned anchor configuration, the modules are not deployed through the full possible height range of the RTLS setup. Therefore, a setup that includes the CU and places it on the floor has been adopted. In this way, the entire range of distances in the z-axis is covered (green dots in Fig. 1), and the full spatial information about the space in which the RTLS operates is ensured. The idea of the CU is introduced in [23] and [24], but the purpose of the CU in this article is different. Here, the CU is implemented and tested as a calibration method for initializing the new RTLS setup and localizing the new anchors in a defined working coordinate system (see Fig. 1), where no prior information about the anchors' positions is available. With the CU placed correctly, the minimum positional error of the anchors is achieved. The CU in our case is placed in such a way that the relation to the working coordinate system is known. The computed positions of the anchors are then aligned with the CU, so placing them in the working coordinate system.

In this article, the anchor-calibration method in 3-D is validated. It can be used for localizing the anchors in an arbitrary working coordinate system with additional CMs. The method can be adopted for scenarios where not all the anchors are in each others radio ranges. Smaller anchor configurations are localized independently of each other, and afterward, an alignment with the common anchors is performed.

![](_page_160_Figure_7.jpeg)

9909

Fig. 2. Top and bottom sides of the designed board with the UWB radio module.

![](_page_160_Figure_9.jpeg)

Fig. 3. System configuration block diagram

#### **III. SYSTEM DESCRIPTION**

A. UWB Modules

The test system consists of 18 printed circuit boards with UWB DWM1000 modules, an STM32L4 microprocessor, and a USB port (see Fig. 2). The modules are enclosed in a protective plastic housing and can be placed in any position with a customized attachment plate.

After all the anchors are placed in the desired configuration, the master anchor is connected to the PC via the USB (see Fig. 3). All the incoming and outgoing data from the PC to the anchors and vice versa are relayed through the master anchor.

#### B. Distance Measurements

The distances between the modules were computed using the time-of-flight (ToF) method for the radio signal traveling between two modules. For the ToF calculation, a twoway-ranging equation was used [25]. After the modules' deployment, all the intermodule distances were measured,

Algorithm 1 Distance Measurements of On	ie Set
<b>Initialization</b> list = all anchor and CU ac	ldresses
for all addresses in list do	
for all addresses in list do	
gather 250 distance measurements	
send measurements to master anchor	
send measurements to PC	
end for	
end for	
Finalization build EDM from distance me	easurements

as described in Algorithm 1. For the experiment, the decision was made to have 40 measurement sets for system and calibration method stability analysis. The measurements were then filtered for any outliers and passed to the localization algorithms for processing. The outlier filtering involved applying a threshold for the Mahalanobis distance for each sample. The filtered values were replaced with a mean value before the filtration, so the number of samples remained the same after the filtering [26].

#### C. UWB Module Calibration

Calibration was made for each pair of anchors and CM in the same experimental environment. The calibration measurements were taken from 1 to 32 m in 1-m increments. Several regressions were made on the measured data. Since all the modules had similar error characteristics, a higher order of polynomial regression was used. The best fit was with the sixth order of polynomial regression. An average RMSE of 0.03 m was obtained for all 180 calibration regressions. The average distance error over all the distance measurements and all the measurement sets after the calibration was 0.07 m. Guo *et al.* [1] suggested the calibration of the UWB modules with linear regression for two intervals with the ranges 0–1.5 and 1.5–8 m. Due to the decreasing accuracy of the measurements at 0.5 m, we used the same sixth-order polynomial regression for the entire calibration distance.

#### IV. METHODOLOGY

A. Performance Metrics

Two performance metrics are presented. The first metric is determining the quality of fit between the localization and the measured data sets. The second metric is used to evaluate the error between the calculated and the reference coordinates.

The mean-square-error distance or stress can be defined as

$$Stress = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M} (\hat{d}_i - d_i)^2}{d_i}}$$
(2)

where *M* is the number of intermodule distances for *N* modules,  $\hat{d}_i$  is the distance calculated from the localization algorithms, and  $d_i$  is the measured distance or the distance from the simulation. Stress is used in the algorithm as an internal performance metric in the TRI localization method. The average-position error (APE) [22] or mean-square-position error can be written as

$$APE = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sqrt{(\hat{\mathbf{a}}_i - \mathbf{a}_i)(\hat{\mathbf{a}}_i - \mathbf{a}_i)^{\mathsf{T}}}}{N}$$
(3)

where  $\hat{\mathbf{a}}_i$  is the *i*th localized module,  $\mathbf{a}_i$  is its true position, and N is the number of modules.

For a comparison of errors, based on the individual coordinates, five combinations of coordinates as inputs for the APE computation were used: xyz (3-D), xy (2-D), x, y, and z coordinates. The notations of the APE for each coordinate combination are APE(xy), APE(x), APE(y), and APE(z), where the input argument presents the coordinates used for the APE computation. The APE without any input argument is used for the xyz combination.

For computing the APE, a rigid transformation has to be made to align the computing coordinates with the reference coordinates. The alignment is made with the least-square rigidtransformation method, as described in [27]. The same method was used to align the localized CU from the measurements with a known position of the CU.

#### B. Localization Methods

The aim of this article was to analyze the impact of using the CU on the APE in 3-D. To eliminate the effects of an incomplete Euclidean distance matrix (EDM) on the anchor-calibration accuracy, localization methods that use the complete EDM were used. A full EDM was constructed with measurements of all the intermodule distances. The only exceptions were the distances between the CM on the CU, which were computed from their known relative positions. One of the solutions for completing the EDM is described in [13] and another approach in [28], where smaller networks are joined if they have common modules in both subnetworks. We have used three localization algorithms: MDS [11], SDP [13], and TRI [14].

1) Multidimensional Scaling: MDS is a mathematical method for reducing the dimensions of multidimensional data. For the localization, the data are usually reduced to two or three dimensions, depending on whether we are localizing in 2-D or 3-D space. MDS reduces the EDM to lower-dimensional data (coordinates) in such a way that the distances between the computed points represent the input EDM.

For the MDS localization algorithm, the steps described in [11] were used. Due to the anchor setup, there was no problem with computing the missing EDM entries as a first step of the localizing algorithm since a full EDM could be obtained with measurements. For the second step, an MDS function implemented in MATLAB was used. The third step was used for the APE computations, as the computed coordinates from the algorithm were aligned with the reference coordinates and for the actual anchor calibration method when the computed coordinates were aligned with the CU coordinates.

2) Semidefinite Programming: For the second localization algorithm, the SDP algorithm from [13] was used. It uses SDP, i.e., a convex optimization procedure that minimizes the linear function. The optimized function is subjected to a constraint such that the affine combination of symmetric matrices is positive semidefinite [29]. A general approach when using SDP for a localizing problem is using relaxation to solve

$$\min_{\mathbf{Y} \succeq 0, \mathbf{Y} \in \Omega} \| \mathbf{W} \circ (\kappa(\mathbf{Y}) - \mathbf{D}) \|$$
(4)

where  $Y \in \Omega$  are linear restrictions, Y is the positive semidefinite matrix, D is the EDM, W is the weight matrix, and  $\circ$  is the Hadaman product [12].

3) Trilateration: The final method for anchor localization, TRI, is based on TRI. Principles similar to the ones introduced in [14] were implemented. The TRI method uses  $\binom{N}{4}$  different combinations of four initial anchors' combinations, where N

Authorized licensed use limited to: UNIVERSITY OF LJUBLJANA. Downloaded on March 12,2021 at 08:38:08 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply

KRAPEŽ AND MUNIH: ANCHOR CALIBRATION FOR REAL-TIME-MEASUREMENT LOCALIZATION SYSTEMS

is the number of anchors and CMs in the system. Each initial anchors' combination gives one anchor-calibration solution. The positions of the initial anchors are  $\mathbf{a_1} = [0, 0, 0]^{\mathsf{T}}$ ,  $\mathbf{a_2} = [d_{12}, 0, 0]^{\mathsf{T}}$ ,  $\mathbf{a_3} = [a_{3x}, a_{3y}, 0]^{\mathsf{T}}$ , and  $\mathbf{a_4} = [a_{4x}, a_{4y}, a_{4z}]^{\mathsf{T}}$  with

$$a_{3x} = \frac{d_{12}^2 + d_{13}^2 - d_{23}^2}{2d_{12}}, \quad a_{3y} = \sqrt{d_{13}^2 - \frac{(d_{12}^2 + d_{13}^2 - d_{23}^2)^2}{4d_{12}^2}}$$

$$a_{4x} = \frac{d_{12}^2 + d_{14}^2 - d_{24}^2}{2d_{12}}, \quad a_{4z} = \sqrt{d_{14}^2 - (a_{4x}^2 + a_{4y}^2)}$$

$$a_{4y} = \frac{d_{12}(d_{13}^2 + d_{14}^2 - d_{34}^2) - a_{3x}(d_{12}^2 + d_{14}^2 - d_{24}^2)}{2d_{12} a_{3y}}.$$
(6)

This defines the coordinate system for a solution [30], where  $d_{12}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{14}$ ,  $d_{23}$ ,  $d_{24}$ , and  $d_{34}$  are the distances between all four initial anchors.

After the initial anchors are localized, TRI is used to localize all of the other anchors. Later, the number of initial anchors is reduced to shorten the computational time by discarding the coplanar combinations of the initial anchors. A threshold for coplanarity was determined so that the anchors on the same surface of the cuboid were eliminated. Also, additional initial anchor combinations were removed from any subsequent computation so as to achieve a reduction in the computation time of 60%, without losing the accuracy of the anchors' coordinates. When all the suitable solutions of the anchor coordinates are computed, solutions with a stress parameter greater than a defined threshold are discarded. The algorithm output is a single set of anchor coordinates, which is an average value of the remaining solutions.

#### C. Simulation and Experimental Scenario Layouts

To explore the anchor-calibration method with the CU, two scenario layouts were designed.

The first scenario (marked as GYM), presenting the LOS conditions with a symmetrical anchor placement, had 16 of a total of 18 modules placed on rectangular edges as anchors (see Fig. 4). The experiments took place in a gym, where the modules were placed at two alternating heights along the borders of a rectangular field measuring  $28 \times 20$  m. All 16 anchors were fixed on a wooden housing so that they could be placed on top of telescopic stands.

The second scenario (marked as LAB) had an asymmetrical placement of 12 anchors and NLOS conditions for several anchors pairs. The experiments were performed in the Laboratory of Robotics, which has a floor plan with dimensions of  $10 \times 12$  m (see Fig. 5) and is occupied by equipment and by people who are moving around. The anchors were placed at three different heights so that the largest height difference was achieved. All 12 anchors were fixed to the wall with custom-designed wall mounts. The LAB scenario represents more complicated, realistic conditions, where the RTLS designer is limited by the range of suitable positions for the anchors.

The anchor-placement dimensions of both scenarios are presented in Table I. The maximum positional differences

![](_page_162_Figure_11.jpeg)

9911

![](_page_162_Figure_12.jpeg)

![](_page_162_Figure_13.jpeg)

Fig. 5. Area with LAB scenario layout with 12 anchors and CU with two CMs in optimal (P1) and nonoptimal (P2) positions. The additional elements in the figure represent other objects in the laboratory.

	TA	ABLE I		
ANCHO FC	RS' MAXIMUM OR THE SCENAF	POSITION RIOS GYN	nal Diffi I and LA	ERENCES AB
		GYM	LAB	_
	Δx / m	28	10	
	Δy / m	20	12	
	Δz / m	1.45	0.50	
	CUΔz / m	3.40	2.45	-

between the anchors are presented in the first three rows, and the last row presents the height difference between the highest anchors and the CU.

#### 9912

IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 69, NO. 12, DECEMBER 2020

![](_page_163_Figure_3.jpeg)

Fig. 6. Anchor calibration procedure flowchart.

#### D. Anchor Calibration

For the anchor calibration in the 3-D working coordinate system, at least four CMs on the CU are required. In the LAB scenario, additional two CMs were added to opposite corners on the CU (light-gray markers in Fig. 5). When the relationship between the CU and the working coordinate system is known, the alignment of the localized anchor with respect to the CU is possible.

The CU is a square plate with an edge length of 1 m. The CMs are placed on its corners, as shown in Fig. 5. The positions of the CMs are measured, and with that, the relative positions with respect to the edges and corners of the CU plate are known. That way, CMs' coordinates  $P_{\rm CM}$  are defined in the CU's coordinate system:  $P_{\rm CM}^{\rm CU}$ . When CU is positioned on WCS' reference points, the transformation between coordinate systems *T* is known. With  $P_{\rm CU}^{\rm WCS} = TP_{\rm CU}$ , CM coordinates can be transformed to WCS. The complete anchor-calibration procedure is presented in Fig. 6.

#### E. Ground Truth

Anchor-calibration method was evaluated experimentally with the measurement system. Ground-truth positions of the anchors were measured with a certified electronic tachymeter LeicaTPS 1201+, which represents the gold standard in reference-position measurements. The mounting plates for the anchors were designed in such a way that the reflective targets of the geodetic equipment could be fixed to them. After the geodetic measurements were made, the anchors were attached to the mounting plate with a known offset from the reflective target center (the measured reference point). To obtain the true reference coordinates, the offsets between the coordinate of the reflective target's center and the anchor's antenna were applied to the reflective target's coordinates. In the second measurement series, wall mounts were designed for the anchors. The CU reference positions were measured in the same coordinate system as the anchor reference positions. The reference coordinates of the reflective targets were computed with an uncertainty of less than 1 mm.

#### V. SIMULATIONS

Sections V-A and V-B describe the simulation configurations, parameters, and the corresponding results. The simulations were performed to evaluate the impact of the CU on the anchors' APE obtained using the three localization methods. The purpose of the simulations was to explore the different parameters of the CU before testing with the actual system. The conclusions drawn from the simulations were then used in the experiments.

A. Position of the Calibration Unit and the Number of Calibration Modules

The tested parameters were the number of CMs used and their positions. The notation for the different numbers of CMs is AX, where X is the number of CMs on the CU. All the configurations are presented in Fig. 7, where the crossed black circles represent one CM on a CU. Each gray square's side has a length of 1 m. Simulations were made for each CU configuration. In the simulations, the CU position (red cross in Fig. 7) changed in the x, y, and z coordinates of the GYM or LAB area (see Figs. 4 and 5), as described in Table II. To evaluate the impact of the CU on the anchor localization, a configuration without a CU, indicated as A0, was used. In the simulations, the noise was modeled with a Gaussian zero-mean random variable, which had a standard deviation (STD) of 0.15 m [24]. The same set of random seed numbers was used for all three localization methods in 100 simulation runs. For the APE calculation, only the positions of the anchors were used.

The results from 100 simulation runs were averaged so that a single APE value was obtained for each CU position. From all of the CU positions, the one with the smallest APE was chosen as the final result presented in Table III.

For the A1 configuration, the APE was 28% and 26% lower compared with the A0 configuration when using the MDS and the TRI methods in the GYM scenario. In the LAB scenario, the APE was 76% and 47% lower. When the maximum number of CMs was added (A16 configuration), the APE was lowered by 62% and 34% compared with the A0 configuration for the MDS and TRI methods in the GYM scenario. In the LAB scenario, the APE was lowered by 87% and 65% when using the MDS and the TRI method. APE improvements for the selected A2 configuration are presented in the bottom row of Table III. Compared with the other two methods. the SDP method had significantly higher APE values in the A0 configurations. This method proved to be noise sensitive, especially in the A0 configuration. When using the CU with the SDP method, simulations had better results, and the trend of the decreasing APE with respect to the additional CMs can be seen in Table III, from the A1 configuration onward.

The biggest APE improvement per number of used CMs was seen when using the A1 configuration. The improvement with the MDS and TRI methods was 0.011 and 0.012 m/CM for the GYM scenario and 0.064 and 0.045 m/CM for the LAB scenario. For the A2 configuration, the APE improvement per CM was 50% smaller compared with the A1 configuration. The only exception was in the GYM scenario and with the

![](_page_164_Figure_1.jpeg)

TABLE III

APE OBTAINED BY SIMULATIONS FOR THE A0, A1, A2, A4, A9, AND A16 SIMULATION CONFIGURATIONS FOR ALL THREE LOCALIZATION METHODS FOR THE SCENARIOS GYM AND LAB

	GYM				LAB	
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI
A0 / m	0.039	0.237	0.047	0.084	0.171	0.095
A1 / m	0.028	0.018	0.035	0.020	0.017	0.050
A2 / m	0.025	0.017	0.036	0.017	0.015	0.048
A4 / m	0.020	0.016	0.031	0.014	0.011	0.037
A9 / m	0.017	0.013	0.030	0.012	0.010	0.035
A16 / m	0.015	0.011	0.031	0.011	0.009	0.033
ΔA2 / m	0.014	0.220	0.011	0.068	0.156	0.047

MDS method, where the APE was improved by 64%. For the A4 configuration, the improvements were less than 30%, for the A9 configuration, less than 15%, and for the A16 configuration, less than 10% of those seen in the A1 configuration.

The surf plot in Fig. 8 illustrates how the changes in the CU position affect the APE values for the A2 configuration and the TRI method. From all the positions verified in the simulations, the smallest APE value along the *z* coordinate was selected for this plot. All three localization methods had a similar spherical shape of error but different absolute values. The APE was the smallest when the CU was in the central position for the GYM scenario and outside of it for the LAB scenario. In the LAB scenario, localization methods had smaller deviations of the CU position for up to 0.5 m. The smallest APE values from simulations of the A2 configuration are presented in Table III. Optimal positions for both scenarios are presented in Figs. 4 and 5.

### B. Height Difference Between the Anchors and the Calibration Unit

Simulations were used to evaluate how different height differences along the z coordinate between the anchors and the CU impact on the anchors' APE. Height-difference simulations used the x and y coordinates from the positions with the

![](_page_164_Figure_9.jpeg)

9913

![](_page_164_Figure_10.jpeg)

TABLE IV APE OBTAINED BY A2 SIMULATIONS WHERE THE HEIGHT DIFFERENCE BETWEEN THE CU AND THE HIGHEST ANCHOR WAS INCREASED FOR THE OPTIMAL X AND Y POSITIONS

dista	inces / m	3.6	5.0	10.0	15.0	20.0	28.0
	MDS / m	0.025	0.020	0.012	0.010	0.009	0.009
GYM	SDP / m	0.017	0.014	0.010	0.008	0.008	0.007
	TRI / m	0.036	0.029	0.018	0.015	0.014	0.014
dista	inces / m	2.7	3.1	2.7	5.1	6.5	12.0
	MDS / m	0.015	0.014	0.012	0.011	0.010	0.009
LAB	SDP / m	0.014	0.012	0.011	0.009	0.009	0.008
	TRI / m	0.048	0.029	0.016	0.013	0.012	0.015

smallest APE, acquired from previous simulations. The height difference was increased throughout the simulation, up to 28 m in the GYM scenario and 12 m in the LAB scenario. With these values, the height differences between the anchors and the CMs were the same as the longest edge of the anchor's floor layout (see Table I). These conditions provide better spatial information for the anchor calibration, as additional CMs improve the coplanarity of the anchor configuration.

The APE results of the simulations for six different heights are shown in Table IV. In the GYM scenario, the APE improvement was the greatest in the range of height differences up to 15.0 m. This is approximately half the length of the longest edge of the anchor's floor layout. For this height difference, the APE declined by 60% with the MDS, 53% with the SDP, and 58% with the TRI method compared with the APE in the A2 configuration from Table III.

In the LAB scenario, the APE improvement was the largest in the range of height differences up to 5.1 m, which is again approximately half the length of the longest edge of the anchor's floor layout. For the height difference of 5.1 m, the APE declined by 27% with the MDS, 36% with the SDP, and 67% with the TRI method compared with the APE in the A2 configuration from Table III.

9914

IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 69, NO. 12, DECEMBER 2020

TABLE V EXPERIMENTAL APE FOR FIRST POSITION OF CU FOR ANCHOR LOCALIZATION WHEN A0 AND A2 IS USED FOR BOTH SCENARIOS

	GYM				LAB	
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI
A0 / m	0.08	0.17	0.14	0.44	0.45	0.33
A2 / m	0.07	0.14	0.13	0.14	0.22	0.23
$\Delta$ / m	0.01	0.03	0.01	0.30	0.23	0.10

#### VI. EXPERIMENTAL RESULTS

The following sections present the experimental results. First, the improvement of the anchors' APE, using an additional CU with two CMs, for both scenarios and two CU positions, is presented in Sections V-A and V-B. Finally, the results of the anchor calibration, by means of alignment with the CU, are presented with the use of four CMs on the CU for two positions in the LAB scenario in Section V-C.

#### A. Improving the APE With a Calibration Unit

A test on the real anchor network system was performed to test anchor's network system, validate simulation results, confirm the use of simulations for determining the optimal CU position, and validate the anchor calibration method. Due to the number of anchors used in the GYM scenario, the test used A2 configuration and positions, obtained using prior simulations.

In the GYM scenario, the APE improved by 0.01 m with the MDS, 0.03 m with the SDP, and 0.01 m with the TRI method (see Table V). In the LAB scenario, the APE improved by 0.30 m with the MDS, 0.23 m with the SDP, and 0.10 m with the TRI method. In both scenarios, the MDS method had the lowest APE for the A0 and A2 configurations. The SDP and TRI methods had similar APE values for the A2 configuration in both scenarios, with a difference of 0.01 m. The MDS method gave results with the APE that were two times smaller in the GYM and 1.5 times smaller in the LAB scenario compared with the SDP and TRI methods.

The average APEs were calculated from 40 measurement sets for the xyz, xy, x, y, and z coordinates for all three localization methods, the GYM scenario (see Fig. 9), and the LAB scenario (see Fig. 10). The APE was smaller with the CU deployed regardless of the localization method used (all the blue marks are under the red marks).

In the GYM scenario, the STDs of the APEs were below 0.01 m for APE and APE(z) and below 0.002 m for APE(xy), APE(x), and APE(y) for the A0 and A2 configurations and all three localization methods.

In the LAB scenario, the STDs of the APEs were different for the A0 and A2 configurations and all three localization methods. The STDs of the APE and APE(z) for the A0 configuration were below 0.05 m for the MDS, 0.06 m for the SDP, and 0.03 m for the TRI method (see Fig. 10, red marks). The STDs of the APE and APE(z) for the A2 configuration were 0.02 m for the MDS, 0.03 m for the SDP, and 0.04 for the TRI method (see Fig. 10, blue marks). The STDs of APE(xy), APE(x), and APE(y) were below 0.01 m for all the localization methods and both configurations.

![](_page_165_Figure_13.jpeg)

Fig. 9. Mean APE values computed from 40 measurement sets for all the localization methods and A0 and A2 configurations with the STD for the GYM scenario. Results are displayed as a function of the coordinates xyz, yx, x, y, and z used for the APE calculation.

![](_page_165_Figure_15.jpeg)

Fig. 10. Mean APE values computed from 40 measurement sets for all the localization methods and A0 and A2 configurations with the STD for the LAB scenario. Results are displayed as a function of the coordinates xyz, yx, x, y, and z used for the APE calculation.

The difference between APE and APE(z) in the GYM scenario was smaller than 0.01 m for the MDS and the SDP methods and smaller than 0.005 m for the TRI method for the A0 and A2 configurations. The difference between the APE and APE(z) in the LAB scenario was 0.01 m with the MDS and the SDP methods and smaller than 0.005 m with the TRI method for the A0 configuration. However, for the A2 configuration, the differences between APE and APE(z) were 0.03 m with all three methods. For further analysis of APE(xy), APE(x), APE(y), and APE(z) from the data in Figs. 9 and 10 were normalized with the APE. In this case, APE(z) represents over 90% of the APE, and APE(x), APE(x), and APE(y) represent, on average, 21% of the APE.

#### TABLE VI

EXPERIMENTAL APE FOR THE SECOND POSITION OF CU FOR ANCHOR LOCALIZATION WHEN A0 AND A2 IS USED FOR BOTH SCENARIOS

	GYM				LAB	
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI
A0 / m	0.08	0.16	0.14	0.41	0.41	0.32
A2 / m	0.07	0.14	0.12	0.16	0.21	0.25
$\Delta$ / m	0.01	0.02	0.02	0.25	0.20	0.07

TABLE VII

MEAN ERROR AND STD FOR THE MEASURED DISTANCES FOR THE GYM AND LAB SCENARIO IN THE OPTIMAL POSITION (P1)

	GYM	LAB
Bias / m	0.06	0.10
Std / m	0.05	0.13

#### B. Nonoptimal Position of the Calibration Unit

To confirm the APE improvement utilizing the CU, additional measurements with the CU in different positions were made. The CU was moved from the nonoptimal position P2 to the optimal position P1 for both scenarios presented in Figs. 4 and 5.

In the GYM scenario, the APE decreased by 0.01 m with the MDS, 0.02 m with the SDP, and with the TRI method when implementing the A2 instead of the A0 configuration (see Table VI). In the LAB scenario, the APE decreased by 0.25 m with the MDS, 0.20 m with the SDP, and 0.07 m with the TRI method.

A comparison of the values from Tables V and VI for the LAB scenario shows smaller APE improvements when the CU was used in the nonoptimal position compared with the optimal one. On average, the improvement in the nonoptimal position was more than 0.03 m less than in the optimal position for all the localization methods in the LAB scenario. In the GYM scenario, the APE values for the A2 configuration are the same. The only exception was with the TRI method, which had a 0.01 m larger APE in the nonoptimal position. The APE values were almost two times higher in NLOS conditions (LAB) than in LOS conditions (GYM).

The mean-bias error of the measured distances and the mean STD, calculated from 40 measurement sets, are presented in Table VII. The NLOS conditions in the LAB scenario gave an almost two-times-higher mean error and a more than twotimes-higher STD, in comparison to the LOS conditions in the GYM scenario.

#### C. Anchor Calibration in the Working Coordinate System

To assess the presented anchor-calibration method with the CU, a test of the anchor localization in the working coordinate system was conducted. It used four CMs on the CU in the LAB scenario, with the CU in two positions, i.e., optimal and nonoptimal, as presented as P1 and P2 in Figs. 4 and 5.

In the optimal position P1, the APE values were smaller compared with the nonoptimal position P2. They decreased by 0.12, 0.04, and 0.34 m with the MDS, SDP, and TRI methods (see Table VIII).

TABLE VIII Anchor-Calibration Results, Alignment With Known Calibration-Module Positions

		MDS	SDP	TRI
P1	A4 / m	0.32	0.36	1.06
P2	A4 / m	0.44	0.40	1.40

#### VII. DISCUSSION

Previous work introduced the use of a CU as a feature to interconnect multiple anchors. This is beneficial if the anchors do not have a ranging capability due to obstacles or out-of-range distances between the anchors. This article presents an anchor-calibration method that uses additional CMs to improve the anchor localization and also localize the anchors in a working coordinate system. First, it was shown through simulations that the anchor-calibration accuracy can be improved by adding a feature, such as a CU. Second, the simulation results were validated with an experiment on a real system in 3-D. Finally, an anchor calibration in a working coordinate system in 3-D was performed and evaluated.

The simulation results showed a decrease of the APE for both scenarios and all the localization methods when additional CMs were used (see Table III). When comparing the APE improvement as an absolute value per added CM, the A1 configuration had the best results, compared with the best A16 configuration, and the values were over seven times lower with the MDS method and over 12 times lower when using the SDP and TRI methods. Even though the APE decreased further with more CMs used, the growing number of CMs raises the overall price and complexity of the system. It is worth noting that the APE improvement did not change linearly but decreased exponentially when the number of newly added CMs is increased. Therefore, the optimal number of CMs used should be determined by the permissible APE value and the available resources. Simple square-shape simulation configurations were chosen so that they could be easily replicated for the experiment.

Another parameter that could possibly improve the accuracy of the anchor coordinates is the height difference between the anchor and the CM. The height of the anchor placement was limited in the real-life experiments; however, it was possible to avoid and overcome those limitations through simulations. The height difference was increased to the height that corresponded to the length of the edges of the anchor's floor layout. These outer boundaries on the floor, described by the positions of the anchors, are shown in Figs. 4 and 5 and Table I. The simulation results showed that increasing the height difference between the anchors and the CM reduced the values of the APE (see Table IV). This reduction was seen up to the point where the height difference was equal to the length of one-half of the anchor's floor-layout edge.

The experiments in the GYM and LAB confirmed that the APE could be reduced by including the CU in the measurement. In the GYM scenario, the APE values decreased by at least 0.01 m and in the LAB by 0.07 m, with the TRI method, to 0.30 m, with the MDS method (see Tables V and VI). Simulation results predicted a greater reduction of the APE for

Authorized licensed use limited to: UNIVERSITY OF LJUBLJANA. Downloaded on March 12,2021 at 08:38:08 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply

the LAB scenario, which the experimental results confirmed (see Table III). Of course, the simulation and experimental APE values differ; the main reasons could be that the simulations used a noise model without any bias. Those differences could be reduced in subsequent research by implementing a model that includes a nonlinear bias error of the distance measurements, the NLOS conditions, and the dependence of the measured distance on the anchors' orientations. The APE reductions with the SDP method were not directly compared due to the problems (see next paragraph) with the A0 configuration simulations. Those problems resulted in poor localization and, consequently, the simulation data gave much larger APE values than the experimental data.

When comparing the simulated and experimental results for the A2 configuration, obtained with the MSD and SDP methods, differences in the performance arose. In simulations, the SDP had smaller APE values than the MDS method. However, the experiments yielded contrasting results. As mentioned earlier, the SDP method proved to be noise sensitive. In additional simulations, the distances included the bias error. If there was no additional bias error present, the SDP method gave better results. However, its performance reduced faster compared with the MDS method when the mean-bias error increased. For the values of the mean-bias error present in the experiments, the MDS method outperformed the SDP method.

A comparison of the errors for all the coordinate combinations showed that the largest contribution to the APE came from the error along the z-axis (see Figs. 9 and 10). When the CU was utilized, the APE decreased, with the largest change being on the z-axis. Small STD values of the mean APE value in the GYM scenario indicate that our anchor system and the presented anchor-calibration procedure are stable. In the LAB scenario, with the NLOS and time-varying conditions, larger STD values were present. NLOS conditions in LAB scenario, along with setup configuration, resulted in larger APE values (see Tables V and VI). In the GYM scenario with LOS conditions and, therefore, smaller bias error and STD in distance measurements (see Table VII), a smaller number of measurement sets can be used for anchor calibration. The number of measurement sets should be increased for more severe NLOS conditions, as in the LAB scenario, within time constraints. With a bigger number of measurement sets, rather than measured distances in each set, different conditions are recorded for all anchor pairs.

The results obtained for the LAB scenario (see Tables V and VI) confirmed that the optimal position can be attained through simulations, where the APE improvement is smaller in the nonoptimal position. Therefore, the simulations are a suitable tool to evaluate the optimal position in both simple and more complex environments. Results from the GYM scenario did not provide the APE difference between different positions due to the relatively small position change of CU in a bigger anchor layout. Due to the complexity associated with anchor configuration, it is difficult to generalize the CU setup options. Experimental results have shown that a larger height difference between the anchors and the CU, and between the anchors themselves, gives better localization results. However, both parameters

### TABLE IX

AVERAGE 2-D POSITIONAL ERROR FOR ANCHOR CALIBRATION IN PREVIOUS RESEARCH AND THIS ARTICLE

	no. anchors (no. CM)	2D / m	3D / m
Nakamura et al. [21]	8 (0)	0.95	/
Müller et al. [23]	4 (1)	1.20	/
Van de V. et al. [24]	4 (1)	0.08	/
Scenario GYM	16 (2)	0.03	0.07
Scenario LAB	12 (2)	0.06	0.14

are usually limited by the realistic environment where the RTLS will operate. The APE results of both scenarios and both positions showed that the MDS localization method is the most suitable for our anchor-calibration method.

The results of the anchor calibration from previous research and from this article are compared in Table IX. All the presented error values are associated with aligning the localized anchors with their reference positions in 2-D. Through this, the performance of anchor-calibration methods can be evaluated even though the anchors are not placed in a coordinate system where the RTLS could operate. The results are comparable with the first part of this article, where the effects of the CU on the anchor calibration were studied. When comparing the results within Table IX, parameters such as the anchor configuration and the number of anchors have to be taken into consideration. The APE values show the good performance of the presented calibration method, in simple LOS as well as in NLOS conditions, and complex, more realistic environments.

The presented anchor calibration method is a useful tool for RTLS initialization without external measurement equipment. In cases with hybrid systems [5], it would be beneficial as calibration of the UWB system also calibrates primary systems where RTLS uses smaller anchor systems method enables fast reconfigurability [6]. In industrial environments, the calibration method provides possibilities of merging coordinate systems of different RTLS based on different technologies and covering different areas [7], [8].

Finally, the proposed anchor-calibration method was tested in a real experiment, where the setup of 12 anchors and four CMs on the CU, in the desired working coordinate system, was placed. In this way, the alignment of the localized anchor to the work coordinate system was possible. With the MDS method, an anchor calibration with a 3-D error of 0.32 m was achieved.

#### VIII. CONCLUSION

This article presents a novel approach to a self-localizing anchor-system calibration that uses a CU for improved localization accuracy. This study confirmed that the use of the CU decreases the average positional error of the anchors in 3-D localization systems. In addition, the simulations were confirmed to be a valid tool for determining the best position of the CU. Finally, the first demonstration of an anchor calibration with a CU and anchors localized in the working coordinate system in 3-D was presented. It had an error of 0.32 m.

Authorized licensed use limited to: UNIVERSITY OF LJUBLJANA. Downloaded on March 12,2021 at 08:38:08 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply

#### KRAPEŽ AND MUNIH: ANCHOR CALIBRATION FOR REAL-TIME-MEASUREMENT LOCALIZATION SYSTEMS

The performance of the three different localization methods was tested, and the results showed that the MDS method had the best localization accuracy. Using a CU enables all the applications to improve anchor-localization accuracy. The potential downside of using a CU for the anchor calibration is the need to use additional modules, affecting the complexity and the price of the localization system.

In future work, an analysis of the effects of adding a CU to anchor configurations, where a complete EDM cannot be assembled from mere measurements, would be beneficial. For the EDM completion, additional steps in the localization algorithms should be taken. This would enable the localization of all the anchors in the RTLS, and consequently, the anchor calibration could be used universally for almost all RTLS applications and their specific environmental requirements.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Assist. Prof. G. Štebe, M.S., from the Faculty of Civil and Geodetic Engineering for the reference-point measurements and B. Jakopin for his valuable comments during the preparation of this article.

#### REFERENCES

- K. Guo et al., "Ultra-wideband-based localization for quadcopter navi-gation," Unmanned Syst., vol. 4, no. 1, pp. 23–34, Jan. 2016.
   X. Tang and S. Mandal, "Indoor occupancy awareness and localization A. Tang and S. Mandai, Indoor occupancy awareness and rocalization using passive electric field sensing," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 11, pp. 4535–4549, Nov. 2019.
- no. 11, pp. 4535–4549, Nov. 2019.
   [3] A. R. J. Ruiz and F. S. Granja, "Comparing ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB location systems: Indoor performance analysis," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 8, pp. 2106–2117, Aug. 2017.
   [4] S. He and X. Dong, "High-accuracy localization platform using asynchronous time difference of arrival technology," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 7, pp. 1728–1742, Jul. 2017.
   [5] M. Kelubenchi, "M. Keich JD. ICRUM Development to the top the order of the system of the sys
- [5] M. Kolakowski, "A hybrid BLE/UWB localization technique with automatic radio map creation," in *Proc. 13th Eur. Conf. Antennas Propag* (*EuCAP*), Krakow, Poland, Jun. 2019, pp. 1–4.
- [6] J. Wang, Y. Tang, J.-M. Muñoz-Ferreras, R. Gómez-García, and C. Li,
- J. Wang, Y. Iang, J.-M. Munoz-Ferreras, R. Gomez-Garcia, and C. Li, "An improved indoor localization solution using a hybrid UWB-Doppler system with Kalman filter," in *Proc. IEEE Radio Wireless Symp. (RWS)*, Anaheim, CA, USA, Jan. 2018, pp. 181–183.
   A. Martinelli, S. Jayousi, S. Caputo, and L. Mucchi, "UWB positioning for industrial applications: The galvanic plating case study," in *Proc. Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigat. (IPIN)*, Pisa, Italy, Sep. 2019, and the study of the study of the study of the study of the study.
- pp. 1–7. [8] W. Wang, Z. Zeng, W. Ding, H. Yu, and H. Rose, "Concept and [9] W. Wang, Z. Zeng, W. Ding, H. Yu, and H. Rose, "Concept and prealvalidation of a large-scale human-machine safety system based on real-time UWB indoor localization," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell.*
- time UWB indoor localization," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Initell. Robots Syst. (IROS)*, Macau, China, Nov. 2019, pp. 201–207.
   C. Zhou, T. Xu, and H. Dong, "Distributed locating algorithm MDS-MAP (LF) based on low-frequency signal," *Comput. Sci. Inf. Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 1289–1305, Nov. 2015.
   W. Cui, C. Wu, W. Meng, B. Li, Y. Zhang, and L. Xie, "Dynamic multidimensional scaling algorithm for 3-D mobile localization," *IEEE Trans. Instrum. Macas.* 2016. [10]
- multidimensional scaling algorithm for 3-D mobile localization," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 12, pp. 2853–2865, Dec. 2016.
  [11] Y. Shang, W. Rumi, Y. Zhang, and M. Fromherz, "Localization from connectivity in sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 15, no. 11, pp. 961–974, Nov. 2004.
  [12] N. Krislock and H. Wolkowicz, "Explicit sensor network localization using semidefinite representations and facial reductions," *SIAM J. Optim.*, vol. 20, no. 5, pp. 2679–2708, Jan. 2010.
  [13] D. Drusyatskiy, N. Krislock, Y.-L. Voronin, and H. Wolkowicz, "Noisy Euclidean distance realization: Robust facial reduction and the Pareto frontier," *SIAM J. Optim.*, vol. 27, no. 4, pp. 2301–2331, Jan. 2017.
  [14] D. K. Goldenberg et al., "Localization in sparse networks using sweeps,"
- [14] D. K. Goldenberg et al., "Localization in sparse networks using sweeps," in Proc. 12th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Netw. (MobiCom), Los Angeles, CA, USA, Sep. 2006, pp. 110–121.

[15] N. B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, and S. Teller, "Anchorfree distributed localization in sensor networks," in Proc. 1st Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., Los Angeles, CA, USA, Nov. 2003, p. 340–341.
A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Strivastava, "Dynamic fine-grai

9917

- [16] localization in ad-hoc networks of sensors," in Proc. 7th Annu. Int. Conf.
- Mobile Comput. Netw. (MobiCom), Rome, Italy, ULI 2001, pp. 166–179.
  Y. Kuang, S. Burgess, A. Torstensson, and K. Åström, "A complete characterization and solution to the microphone position self-calibration problem," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process., Vancouver, BC, Canada, May 2013, pp. 3875–3879. K. Batstone, M. Oskarsson, and K. Åström, "Towards real-time time-of-
- [18] arrival self-calibration using ultra-wideband anchors," in Proc. Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigat. (IPIN), Sapporo, Japan, Sep. 2017, pp. 1-8.
- [19] Y. Zhou, C. L. Law, and F. Chin, "Construction of local anchor map
- Zhou, C. L. Law, and F. Chin, "Construction of local anchor map for indoor position measurement system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 7, pp. 1986–1988, Jul. 2010.
   P. Duff and H. Muller, "Autocalibration algorithm for ultrasonic location systems," in *Proc. 7th IEEE Int. Symp. Wearable Comput.*, White Plains, NY, USA, vol. 3, Oct. 2003, p. 62.
   K. Nakamura and K. Sakamura, "Sub-meter accuracy localization sys-tem using self-localized portable UWB anchor nodes," in *Proc. 1st IEEE Clebel Comput. Comput. Comput. Comp. 606*, 609. [20]
- Global Conf. Consum. Electron., Tokyo, Japan, Oct. 2012, pp. 695–698. D. Moore, J. Leonard, D. Rus, and S. Teller, "Robust distributed network localization with noisy range measurements," in Proc. 2nd Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys), Baltimore, MD, USA,
- [23]
- Conj. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys), Baltimore, MD, USA, Nov. 2004, pp. 50–61.
  M. Müller, J. Lategahn, L. Telle, and C. Röhrig, "Automatic anchor calibration in IEEE 802.15. 4a networks," in *Proc. 8th Workshop Posi-tioning, Navigat. Commun.*, Dresden, Germany, Apr. 2011, pp. 67–71.
  S. Van De Velde, P. Van Torre, and H. Steendam, "Fast and robust anchor calibration in range-based wireless localization," in *Proc. 7th Int. Conf. Simod. Processer. Commun. Syst. (ICSPCS) Codd. Coast. OL Autorbia* Signal Process. Commun. Syst. (ICSPCS), Gold Coast, QL, Australia. Dec 2013, pp. 1–6.
   D. Neirynck, E. Luk, and M. McLaughlin, "An alternative double-sided

- [25] D. Neirynck, E. Luk, and M. McLaughlin, "An alternative double-sided two-way ranging method," in *Proc. 13th Workshop Positioning, Navigat. Commun. (WPNC)*, Bremen, Germany, Oct. 2016, pp. 1–4.
  [26] A. Cazzorla, G. De Angelis, A. Moschitta, M. Dionigi, F. Alimenti, and P. Carbone, "A 5.6-GHz UWB position measurement system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 3, pp. 675–683, Mar. 2013.
  [27] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein, "Least-squares fitting of two 3-D point sets," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-9, no. 5, pp. 698–700, Sep. 1987.
  [28] Y. Shang and W. Ruml, "Improved MDS-based localization," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Hong Kong, vol. 4, Mar. 2004, pp. 2640–2651.
  [29] L. Vandenberghe and S. Boyd, "Semidefinite programming," *SIAM Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 49–95, Mar. 1996.

- vol. 38, no. 1, pp. 49–95, Mar. 1996.
   F. Santos, "Localization in wireless sensor networks," ACM J, vol. 5, pp. 1–19, Nov. 2008.

![](_page_168_Picture_37.jpeg)

Peter Krapež received the M.Sc. degree in electrical engineering from the Faculty of Electrical Engineer-ing, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, in 2017, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Laboratory of Robotics, Department of Measurement and Robotics, Faculty of Electrical Engineering.

Marko Munih (Member, IEEE) received the Ph.D degree in electrical engineering from the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana

(UL), Ljubljana, Slovenia. From 2004 to 2006, he was the Head of the Department for Measurements and Process Control, Faculty of Electrical Engineering, UL, where he is currently a Full Professor and the Head of the Laboratory of Robotics.

## Dodatek D

Sensors, 2021

Article

### Distance Measurements in UWB-Radio Localization Systems Corrected with a Feedforward Neural Network Model

Peter Krapež<sup>1,\*</sup>, Matjaž Vidmar<sup>2</sup> and Marko Munih<sup>1</sup>

sensors

- <sup>1</sup> Laboratory of Robotics, Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenia; marko.munih@fe.uni-lj.si
- <sup>2</sup> Radiation and Optics Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenia; matjaz.vidmar@fe.uni-lj.si
- \* Correspondence: peter.krapez@fe.uni-lj.si

Abstract: An ultra-wideband (UWB) localization system is an alternative in a GPS-denied environment. However, a distance measurement with UWB modules using a two-way communication protocol induces an orientation-dependent error. Previous research studied this error by looking at parameters such as the received power and the channel response signal. In this paper, the neural network (NN) method for correcting the orientation-induced distance error without the need to calculate the signal strength, obtain the channel response or know any parameters of the antenna and the UWB modules is presented. The NN method utilizes only the measured distance and the tag orientation, and implements an NN model obtained by machine learning, using measurements at different distances and orientations of the two UWB modules. The verification of the experimental setup with 12 anchors and a tag shows that with the proposed NN method, 5 cm better root mean square error values (RMSEs) are obtained for the measured distance between the anchors and the tag compared to the calibration method that did not include orientation information. With the leastsquare estimator, 14 cm RMSE in 3D is obtained with the NN model corrected distances, with a 9 cm improvement compared to when raw distances are used. The method produces better results without the need to obtain the UWB module's diagnostics parameters that are required to calculate the received signal strength or channel response, and in this way maintain the minimum packet size for the ranging protocol.

Keywords: ultra-wideband technology; real-time localization system; distance measurement; error mitigation; tag orientation

#### 1. Introduction

Indoor localization using ultra-wideband (UWB) radio is a popular research topic [1–6] and an off-the-shelf real-time localization system [7]. Its suitability for mobile applications and its great localization accuracy provide solutions for a wide spectrum of applications. In real-time localization systems (RTLSs), the tags (agents, mobile units) are localized by measuring the distances from the tag to the anchors (ground station, static units) with known positions. The distances between the anchors and the tags can be measured with the time-of-arrival (TOA) [8] or the time-difference-of-arrival (TDOA) [9] methods. The accuracy of the measured distances depends on the accuracy of the tag's position [10]. An orientation-dependent error is present in UWB-radio distance measurements [11–15]. The speed of propagation in various materials around the antenna's electrical center point cannot be empirically determined. The error is a superposition of multiple factors: antenna design and its radiation diagram; the electronic circuit build around the antenna and the radio module; the protective housing and its dielectric properties. A non-empirical model that would contain a large set of distance and orientation variations could be relevant for effective error mitigation.

check for updates

Citation: Krapež, P; Vidmar, M.; Munih, M. Distance Measurements in UWB-Radio Localization Systems Corrected with a Feedforward Neural Network Model. *Sensors* **2021**, 21, 2294. https://doi.org/10.3390/ s21072294

Academic Editor: Volodymyr Mosorov

Received: 17 February 2021 Accepted: 22 March 2021 Published: 25 March 2021

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

![](_page_172_Picture_16.jpeg)

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

Sensors 2021, 21, 2294. https://doi.org/10.3390/s21072294

https://www.mdpi.com/journal/sensors

MDPI

In [16], the authors presented a time-difference-of-arrival (TDOA) localization system for monitoring elderly people utilizing UWB technology, presenting 1 m error for stationary measurements. In [17], UWB technology combined with motion capture is used for the localization of people and goods at an industrial site with 0.15 m root mean square error (RMSE) in 2D space. Another case of UWB real-time localization systems (RTLSs) used in an industrial environment is presented in [18], where authors achieved 2D positioning errors from 0.02 m to 0.38 m in six tag positions. Tieman et al. [19] presented a UWB time-of-flight-based localization system for parking an electric vehicle on a dedicated recharging parking lot. With only two anchors an error of less than 10 cm was obtained in the experiments.

Much work was carried out to improve distance measurements between radio modules with the use of machine learning. In [20], the authors used a neural network (NN) with a received-signal-strength indicator (RSSI) and an RGB image as the input to produce the estimated distance between two modules with greater accuracy in non-complex environments without buildings. Authors achieved 0.5 m ranging errors in open scenarios and under 0.9 m ranging errors in more complex scenarios with objects in proximity of modules. Chen et al. [21] presented a ranging model based on a backpropagation NN (BNN). The model showed better performance in simulations than shadowing models and the capability to adapt to a specific environment with an average ranging error of 0.34 m. Schmid et al. [22] investigated machine learning approaches in error mitigation using additional diagnostics data and without the tag's orientation. Their goal was to reduce the error due to multipath effects. With an artificial NN and 10 input parameters obtained from the modules, they were able to reduce the mean absolute ranging error from 0.08 m to 0.035 m. With histograms of errors, they showed that the error could be reduced to a smaller extent with only two out of 10 input parameters, the measured distance and the maximum observed noise during the first path detection.

In previous work, an orientation-dependent distance error was observed when measuring the distance between two UWB modules. In [11], the authors proposed a method to correct the positioning error due to the antenna's orientation in a time-difference-ofarrival (TDOA) localization system. In simulations with line-of-sight (LOS) conditions and 1.24 mm ranging noise, they achieved a sub-mm (0.1 mm) range RMSE with 10 base stations. A configuration with a smaller number of base stations did not converge to the mm-range RMSE. The authors in [12] observed the effect of a custom UWB antenna's orientation when ranging between two modules in a TOA system. In experiments, they measured the antenna in five different orientations for two planes and observed different distance errors for different antenna orientations at 0.5- and 1-m distances between the receiver and transmitter antennas. The minimum error obtained was 0.001 m, and the maximum error was 0.045 m. In [13], the authors presented experiments in a vehicle with transmitting antenna in four different orientations. The effects of the antenna orientation and the multipath environment were analyzed through the channel impulse response (CIR). A linear piecewise model of the power-delay profile in logarithmic scale and a generalized extreme value model of a small-scale digital fading are presented. Bregar et al. [14] used two methods where the CIR is used with two convolutional neural networks (CNNs) for non-line-of-sight (NLOS) classification and ranging-error-regression modeling. They showed that ranging-error regression performs better than filtering the NLOS ranges and that combining the methods improves the performance compared to the least-squares (LS) and weighted LS methods. With 10 anchors and a weighted LS location estimator with ranging error mitigation, they achieved a mean localization error of 0.113 m.

The authors in [15] presented an orientation-dependent neural network model for error mitigation. They experimentally determined and analyzed the error through the channel response from two experiments: indoor and outdoor. The authors observed the optimal mode of operation for the selected UWB module where the orientation-induced error is the smallest. The neural network is trained with channel-response data. Using the

2 of 18

Sensors 2021, 21, 2294

trained model on the data that were not used in the training process, ranging errors of less than 1 cm were obtained for the optimal mode of operation.

A novel, simplified method to improve the distance measurement with a UWB radio used in real-time localization systems is proposed in this paper. The presented model is heavily simplified compared to previously used NN models for mitigating orientationdependent ranging error [15] in NN architecture and input parameters' complexity. Only two parameters are used for the distance corrections: the measured distance between the anchor and the tag, and the tag's orientation. These parameters are fed to an NN, previously taught with a learning dataset consisting of distance measurements between two UWB modules at different distances and with different orientations. The trained model in this work is first evaluated with data from the training-measurement campaign that were not used in the training process and then in the experimental setup of 12 anchors and one tag in six different poses, presenting the model results in more realistic conditions. The results show that the used model improved the overall distance measurement in 3D space. Consequently, the localization of the tag is improved.

In the first part of the paper, the RTLS system design, training-data-measurements equipment and procedure, the NN model, the RTLS setup with 12 anchors and the reference measurements for the evaluation are described. Then, all the results from the training measurement and the RTLS experiment are presented in the results section.

#### 2. Materials and Methods

2.1. System Design

The real-time localization system consists of 1 tag and 12 anchors to ensure dense enough placement of anchors in the RTLS system in an experimental environment. Each module consists of a printed-circuit board with ultra-wideband (UWB) DWM1000 modules for ranging, an STM32L4 microprocessor and a USB port for power supply and data transfer to the computer for further processing (Figure 1). The modules are enclosed in a protective ABS plastic housing designed to be fixed to the wall with custom mounts (Figure 2).

For distance measurements, the double-sided two-way ranging version with four messages is implemented on the UWB modules [23]. Implemented ranging method reduces error due to the clock drift on both devices and does not require symmetrical reply delays. The scheme (Figure 3) represents one ranging cycle required for calculating the distance, where the tag initiates the ranging and all the timestamps are obtained on the tag's side with the fourth packet.

![](_page_174_Picture_9.jpeg)

Figure 1. Top and bottom sides of the designed board with the ultra-wideband (UWB) radio module.

3 of 18

![](_page_175_Figure_1.jpeg)

Sensors 2021, 21, 2294

5 of 18

#### 2.2. Neural Network Model and Training Data Measurements

For collecting the training dataset needed for the NN's training, the gimbal was designed (Figure 4). The gimbal enables the rotation of the UWB module around the azimuth and in the elevation plane relative to the antenna center with the USB cable connected to the module for the power supply and data transfer. For axis positions, two absolute rotary encoder RLS Orbis were used. To minimize the volume of any material around the UWB antenna, an elevation motor was placed behind the module, as low as possible. The motor is then connected to the gimbal axis via a timing belt. Position control is implemented on a microcontroller and can be driven with a PC over a USB cable.

![](_page_176_Figure_5.jpeg)

Figure 4. Gimbal mechanism for rotation of the UWB module around the azimuth and elevation axis centered in the antenna phase center with stepper motors and RLS Orbis absolute rotary encoders.

The training dataset was measured with two UWB modules that were not used in the RTLS setup. One module was stationary on a stand and connected to a power supply. The second was attached to the gimbal to rotate the UWB module around the azimuth and elevation angles around the antenna's center (Figure 5). The reference distance between modules was measured with a laser distance meter with an accuracy of 1 mm.

![](_page_176_Figure_8.jpeg)

**Figure 5.** Setup for training-data measurements with module M2 on a stand and module M1 on a stand with the gimbal. For M1, the range of motion for the elevation was from -70 to 70 degrees and for azimuth, from -80 to 80 degrees.

![](_page_177_Figure_1.jpeg)

![](_page_178_Figure_1.jpeg)

dinate system was calculated. The anchors' orientations were known from the reference coordinate system was calculated. The anchors' orientations were known from the setup as marked in Figure 7 and are constant relative to the reference coordinate system. The azimuth estimation for the model input was computed from the tag and anchors' orientations around the *z*-axis (Figure 9a). An elevation estimation was computed from the known anchors' heights and the tag's positions:

$$d_h = h_A - h_T$$
  

$$E = asin(\frac{d_h}{d}),$$
(4)

where  $h_A$  is the height of the anchor,  $h_T$  the height of the tag and d the distance between the anchor and the tag (Figure 9b).

![](_page_179_Figure_1.jpeg)

Figure 8. Experimental setup of 12 anchors and 1 tag for the model evaluation with the reference system Optotrak.

![](_page_179_Figure_3.jpeg)

**Figure 9.** Tag's azimuth and elevation relative to the individual anchor–tag pair. (a) The azimuth is computed from the anchor's known orientation and the measured tag's orientation around the *z*-axis in the reference coordinate system. (b) The elevation is obtained from the known heights of the anchor and tag and the distance between them.

2.5. Method for Range Bias Distance Correction without the Tag's Orientation Information

In cases where better accuracy is required in RTLS applications, additional corrections of the measured distance are recommended by UWB-radio manufacturers. In the presented work, a method that does not include the tag's orientation information is used. It is called a range bias, which is the error induced due to the received signal power level. Tables are provided where the distance correction is mapped with the received signal power level and
## Sensors 2021, 21, 2294

are translated to the measured distances [25]. The measured distance is directly used with the correction tables, from which the predicted error is selected for the measured distance.

## 3. Results

The following sections present the experimental results. First, the acquired data used in the NN model training are shown. Second, the results from choosing the number of hidden neurons in the NN model. Third, the results from the NN model with the reduced training data are presented to evaluate the impact of the amount of data on the results. Finally, the NN model results for the elevation/azimuth data that were not used in the NN model training and the data from the RTLS experimental setup are presented.

## 3.1. Training Dataset

The training dataset was measured at 15 different distances from 1 m to 8 m in 0.5-m increments, marked with the gray vertical lines (Figure 10), where the blue line represents the reference distance and the orange, the measured distance. For each distance, 29 elevations and 33 azimuth positions were measured, resulting in 957 angular values. For each angular value, 250 repetition samples were measured. Training dataset parameters are presented in Table 1. Each distance contains distance measurements where the elevation changes from -70 degrees to 70 degrees from left to right in 5-degree steps. The azimuth was changing from -80 degrees to 80 degrees in 5-degree steps from left to right inside each constant-elevation value (Figure 11), representing one azimuth sweep. When the elevation and azimuth values were 0 degrees, the UWB modules were oriented face to face. A similar trend is seen for each distance, where the distance is varying with elevation, with the lowest measured distances at central elevations. There are some exceptions with increased values at the edges of the elevation. Multiple sets of training data were measured. All the sets had similar measured distances for all the azimuth and elevation values and for all the selected distances.



**Figure 10.** Training dataset with 15 different distances. For each distance, 33 azimuth and 29 elevation points were measured, and for each point, 250 samples were measured. The blue line represents the reference distance. Each distance between the UWB modules is separated with gray vertical lines. The black rectangle shows zoomed distances presented in separate figures.

Table 1. Training dataset parameters.

	Min	Max	Step
distance range/m	1	8	0.5
azimuth range/°	-80	80	5
elevation range/°	-70	70	5

9 of 18









**Figure 15.** Mean error over all six tags' poses for the NN models with the number of neurons from 2 to 20, with increments of 2 using the data from the RTLS experiment.

The same process was repeated with a subset of data from the training experiment that was not used in the learning process (Figure 16 and Table 3 bottom row). The error with the subset of training data is decreasing with the increasing number of hidden neurons. The smallest errors are for NN models with 14, 16, 18 and 20 hidden neurons. Please note that the smallest RMSE values here are in the range of 0.033 m, while the smallest values in the RTLS experiment are 0.073 m.



Table 3. Mean error over all six tags' poses for a different number of hidden neurons in the NN model. The first row, RTLS, presents model errors when measured distances from the RTLS experiment were used. The second row, SUBSET-TRAIN, presents model errors when a subset of data from the training campaign was used that was not included in the NN model's training process.

Hidden Neurons	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
RTLS error/m	0.073	0.073	0.074	0.084	0.087	0.090	0.096	0.096	0.096	0.091
SUBSET-TRAIN error/m	0.043	0.042	0.041	0.041	0.037	0.038	0.033	0.033	0.032	0.034

Table 4. Average training time for NN models with a different number of hidden neurons.

Hidden Neurons	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
train time/s	280	487	795	1643	2173	2546	2489	3445	3774	3919	

3.4. Reduced Learning Dataset

For example, in Figures 12 and 13 can be seen increased distance values for low and high elevation angles, which is the most left and right in the figures. These values can represent the actual situation of the UWB module or are caused by outside parameters present during the training experiment. To test this, the elevation range was first reduced to -50 degrees to 50 degrees span and further to -40 degrees to 40 degrees span. Overall, the NN model with a full range learning dataset obtained the smallest RMSE (Figure 17), where the mean values over all the tag's poses are 0.074, 0.078 and 0.081 m for the full dataset, -50 degree to 50 degree span data set and -40 degree to 40 degree span dataset, respectively (Table 5). The NN model with the full training data is, in all tag poses, better or equal to the reduced model, except in the fifth tag pose, where the least-reduced model has a smaller error.

Table 5. NN models' mean error with an elevation range of -80:80, -50:50 and -40:40 when RTLS experiment measurements were used.

Elevation Range/°	-80:80	-50:50	-40:40
mean error/m	0.074	0.078	0.081



Sensors 2021, 21, 2294

Table 6. Mean, max and min error for all six tags' poses for the presented model, non-orientational method and raw measured distances.

	NN Model	Range Bias	Raw
mean error/m	0.074	0.120	0.092
max error/m min error/m	0.100	0.094	0.107 0.074

## 4. Discussion

Previous work presented an antenna-orientation-induced error in ranging with UWB radios as well as a model for ranging-error prediction. Generally, all the models used a channel impulse response or received the signal power as inputs, enabling a good errorprediction model. This approach makes the model more complex and requires additional data from the modules. This paper presents a simple ranging-error model with only distance, azimuth and elevation as the input, which improves the measured distance in real-time localization systems in a realistic situation, in 3D space.

For training NN models, the training data were first acquired at different distances and orientations between two UWB modules. Patterns can be observed in the measured values, for the elevation and azimuth observations (Figures 12 and 13). One azimuth sweep is made for one constant elevation value. Peak values of the measured distances are present at the edges of and in the middle of the azimuth sweep. Although the shapes are not the same for all the elevation values, the neighboring azimuth sweeps have a similar shape. This pattern is changing when changing the angle of elevation. The most significant changes are present in the boundary-elevation values with the greatest distance deviations within one azimuth sweep. When observing the elevation changes, the hyperbolic shape is seen in the measured values with the largest measured distances at the boundary angles when the UWB module faced the floor and at the ceiling. Multiple, very similar training datasets were measured with little difference between them, showing repeatability of the distance measurement with a designed gimbal and measuring procedure. This result is confirmed by evaluating the NN model with a data subset from training, where an RMSE error of 4 cm was achieved. Larger distance deviations at the elevation-boundary values are further discussed later on with additional NN models.

Based on the results presented in Figures 15 and 16, the NN model with six hidden neurons was selected for further evaluations. The error is increasing with a larger number of hidden neurons in the NN model when using the RTLS experimental data (Figure 15). RMSE has a similar value for the NN models with 2-6 hidden neurons with a sudden increase for 1 cm with an increase of the hidden neurons to 8. This suggests that more neurons do not add to the model's capability to describe an orientation-dependent ranging error in real conditions. The opposite is happening with an error when the training data subset is used (Figure 16). The error is slowly decreasing with an increasing number of hidden neurons. This is an expected result, as a more complex NN model can model the error better when similar data are used for the evaluation. In this case, more complex NN models perform better. Although the NN model with a larger number of hidden neurons had the smallest error with the training-data subset, they did not perform better in real-scenario measurements. The best NN-model candidates for the real environment were the NN models with 2, 4 and 6 hidden neurons, as they had a similar error in the RTLS experiments. This was achieved for shorter training times (Table 4). The NN model with six neurons was selected due to a slightly smaller error with the training data subset.

Training data have occurrences of longer measured distances at the boundary-elevation values for all the repeated sets. This means that the propagation times were the longest at these angles. Additional NN models with reduced training measurements were made to test whether longer distances at the edges of the elevation values are caused by the UWB module or by the gimbal and the testing environment. The training data were reduced to the elevation ranges -50 degrees to degrees 50 and -40 degrees to 40 degrees. When

15 of 18

			16 of 18
Table 7. Results from p	new NN models were used on the RTLS of when observing the mean error over all six smaller than the error from the full range N by factors not solely caused by the UWB r training data and the process of measuring The performance of the new NN mo 0.315 m and 0.132 m, respectively, where full training experiments are used, which The error of 4 cm was achieved with a f without the NN model. Compared to the results were achieved. Schmid et al. [22] ac orientation between a pair of modules and had better results than the presented mode error was achieved with the channel impu achieved a larger error compared to [15, simpler, with only distance as an input, in input for the presented model and [15].	data, the same or lar x tags' poses (Figure IN model, the training nodule. The results g the training data. odel, Range Bias and the distance measu a were not utilized in 69% improvement of results from previou chieved slightly bette additional diagnosti lel and Schmid, whe lse response as the ir 22], but the model's addition to the orien	ger errors were computed 17). If the errors would be g data would be influenced confirm the validity of the I the Raw data is 0.041 m rements' subsets from the n the NN training process compared to the situation is research (Table 7) similar er results but with constan cs data. Tiemann et al. [15] re an approximately 1-cm uput. The presented mode implementation is much tation, which is a commor
models with RTLS mea	surements in realistic conditions.	presenting ranging er	TOIS Obtained with ININ
	Notes	Error/m	RTLS Error/m
Wu et al. [20]	CNN-RSSI + Image *	0.5-0.9	/
Schmid et al. [21]	NN-ranging + diagnostics data *	0.035	/
Tiemann et al. [15]	NN-ranging + diagnostics data	0.01	/
Presented model	NN-ranging; simple model, smaller payload	0.041	0.074
	the RTLS experiment in realistic indoor of improved the measured distance in the RTL method that was used for comparison di expected as the non-orientation method Correcting the distance only based on th corrections and larger errors. The NN mode even if not all possible orientations from the data. This means that there is a possibility to with the proposed orientation-dependent to Following the presentation of results model is a simple ranging model suitable for and without additional parameters.	onditions in 3D space S system by 2 cm (Ta d not improve the r does not take a tag's the measured distance el was proved to impri- e RLTS experiment we improve further the ranging-error model. in this paper, it cou or RTLS applications	e. Overall, the NN mode ble 6). The non-orientation neasured distance. This is s orientation into accoun- e can result in the wrong eventhe measured distance ere captured in the training overall measured distances ld be claimed that the NN with easy implementation
	5. Conclusions		

21, 21, 2294 17 of 18
model trained with the full range training dataset obtained the best results. The NN model's performance is validated with a data subset from the training measurements that was not used in the training process, achieving a 4 cm error. Compared to the literature the errors are not improved to the same extent, but the model's complexity and additional requirements for acquiring the necessary input parameters are smaller in this case. Finally the first demonstration of the orientational ranging-error model in the RTLS experiment with real conditions is presented, where the NN model showed improvements in 3D measured distances by 2 cm with a mean error of 7.4 cm. It should be underlined that the distances are estimated in 3D. In future work, extended training datasets will be tested and consequently, the complexity of the training data vs. the distance improvement compared New measurements are planned for testing the model in dynamic conditions. Further research should focus on investigating the use of additional NN model input parameters e.g., speed of the user.
Author Contributions: Conceptualization, P.K. and M.M.; methodology, P.K. and M.M.; soft ware, P.K.; validation, P.K., M.M. and M.V.; formal analysis, P.K., M.M. and M.V.; investigation P.K.; resources, M.V. and M.M.; data curation, P.K.; writing—original draft preparation, P.K. writing—review and editing, M.M.; visualization, P.K.; supervision, M.M.; project administration M.M.; funding acquisition, M.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
<b>Funding:</b> The authors acknowledge the financial support from the Slovenian Research Agency (research core founding No. P2-0228).
Data Availability Statement: All data are integral part of the correspondent author's PhD thesis.
Acknowledgments: The authors would like to thank G. Štebe M.S. from the Faculty of Civil and Geodetic Engineering for the reference-point measurements.
Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.
Abbreviations
The following abbreviations are used in this manuscript:
BNNBackpropagation neural networkCIRChannel impulse responseCNNConvolutional neural networkGPSGlobal positioning systemLOSLine-of-sightLSLeast squaresNLOSNon-line-of-sightNNNeural networkRMSERoot mean square errorRSSIReceived signal strength indicatorRTLSReal-time localization systemTDOATime-of-arrivalTOATime-of-arrivalTOFTime-of-flightUWBUltra-wideband
ices
kała, Ł.; Typiak, A.; Typiak, R. Research on Developing an Outdoor Location System Based on the Ultra-Wideband Technology Isors <b>2020</b> , 20, 6171. [CrossRef] [PubMed]
ng, Y.; Zhang, W.; Li, F.; Shi, Y.; Nie, F.; Huang, Q. UAPF: A UWB Aided Particle Filter Localization For Scenarios with Few atures. Sensors 2020, 20, 6814. [CrossRef] [PubMed]
ndins, M.; Schmidt, S.O.; Hellbrück, H. MAMPI-UWB—Multipath-Assisted Device-Free Localization with Magnitude and
ase information with OWB fransceivers. Sensors 2020, 20, 7090. [CrossRef] anin-Pascual, F.; Ortiz, A. UWB-Based Self-Localization Strategies: A Novel ICP-Based Method and a Comparative Assessment

