

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Marco Pintér



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

LOKALIZACE A NAVIGACE DRONU VE ZNÁMÉM PROSTŘEDÍ BEZ VYUŽITÍ GNSS

DRONE LOCALIZATION AND NAVIGATION IN A FAMILIAR ENVIRONMENT WITHOUT GNSS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marco Pintér

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Raichl

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Marco Pintér

ID: 221010

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace a navigace dronu ve známém prostředí bez využití GNSS

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou lokalizace objektů ve známém prostředí bez využití GNSS.
2. Seznamte se s Robot Operating System(ROS) za účelem programování dronů.
3. Navrhnete vhodnou metodu lokalizace.
4. Vyberte potřebné senzorní vybavení. Zdůvodněte.
5. Naprogramujte řídicí počítač dronu pro navigaci na vybrané souřadnice.
6. Vytvořte testovací scénář vybrané metody lokalizace a proveďte praktický test. Výsledky popište.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] RUSSELL, Stuart J. a Peter NORVIG. Artificial intelligence: a modern approach. 3rd ed. Harlow: Pearson Education, c2014. ISBN 978-1-29202-420-2.
- [2] KOUBAA, Anis. Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 3). Imprint: Springer, 2019. Studies in Computational Intelligence, 778. ISBN 9783319915906.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Petr Raichl

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá vývojom lokalizačného systému bez využitia GNSS. V prvej časti práce sú charakterizované technológie, ktoré je možné použiť na určovanie polohy v priestore. Taktiež sú opísané metódy určovania vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom. V ďalšej časti práce je vysvetlený spôsob komunikácie ROS-u s letovým kontrolérom PixHawk. Na základe získaných poznatkov je opísaný výber vhodnej technológie a metódy určovania vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

GNSS, ROS, WPS, UWB, Bluetooth, Lidar, RSSI, AoA, ToA, TDoA, Hybridná metóda, Fingerprint Positioning, ToF, Trilaterácia, DWM1000

ABSTRACT

This thesis is aimed at development of the localization system without using GNSS. The first part describes technologies, enable determination of position in the area. Methods for determining distance between transmitter and receiver are also described. In the next part of the thesis describes ROS communication form with flight controller PixHawk. On the basis of the acquired knowledge is described choosage of preferred technology and method of determination of the distance between transmitter and receiver.

KEYWORDS

GNSS, ROS, WPS, UWB, Bluetooth, Lidar, RSSI, AoA, ToA, TDoA, Hybrid method, Fingerprint Positioning, ToF, Trilateration, DWM1000

PINTÉR, Marco. *Lokalizace a navigace dronu ve známém prostředí bez využití GNSS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 74 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Petr Raichl,

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Marco Pintér
VUT ID autora: 221010
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma záverečnej práce: Lokalizace a navigace dronu ve známém prostředí bez využití GNSS

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu semestrálnej práce pánovi Ing. Petrovi Raichlovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	13
1 Problematika lokalizácie objektov	
v známom prostredí bez využitia GNSS	14
1.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)	14
1.2 Technológie na určovanie polohy	15
1.2.1 WPS (Wi-Fi – based positioning system)	15
1.2.2 UWB (Ultra-Wideband)	16
1.2.3 Bluetooth	17
1.2.4 Lidar (Light Detection and Ranging)	18
1.3 Metódy určovania vzdialenosti medzi prijímačom a vysielačom	19
1.3.1 RSSI (Received signal strength indication)	19
1.3.2 AoA (Angle of Arrival)	20
1.3.3 ToA (Time of Arrival)	21
1.3.4 TDoA (Time Difference of Arrival)	21
1.3.5 Hybridná metóda	22
1.3.6 Fingerprint Positioning	23
1.3.7 ToF (Time of Flight)	24
1.4 Trilaterácia	25
2 ROS (Robot operating system)	26
2.1 História	26
2.2 Filozofia	27
2.3 Štruktúra	28
2.3.1 Nodes	28
2.3.2 Topics	29
2.3.3 Services	29
2.3.4 Parameter server	29
2.4 Prepojenie s letovým kontrolérom dronu	29
2.4.1 Knižnica px4_msgs	29
2.4.2 Knižnica px4_ros_com	30
2.4.3 MicroRTPS bridge	30
2.4.4 uORB správy	31
3 Výber senzorického vybavenia	32
3.1 Výber vhodnej technológie	32
3.2 Výber vhodného UWB modulu	33

3.3	DWM1000 modul	34
3.3.1	Spôsob merania vzdialenosti	35
3.3.2	Knižnica DW1000	37
3.3.3	Zapojenie modulu DWM1000	37
3.4	Výber vhodného mikrokontroléra	38
3.4.1	Skúšobné zapojenie DWM1000 s mikrokontrolérom ESP	38
3.5	Schild s modulom DWM1000	39
3.5.1	Schéma zapojenia	39
3.5.2	Návrh dosky plošného spoja	40
3.6	Napájanie statických bodov	42
3.7	Finálna podoba hardvéru	43
3.7.1	Statické body	43
3.7.2	Tag	44
3.8	Možný koncept tagu	45
4	Návrh metódy lokalizácie	46
4.1	Výber počtu UWB modulov	46
4.2	Výber metódy určovania vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom	47
4.3	Meranie vzdialenosti medzi dvoma bodmi	47
4.4	Meranie určovania polohy v priestore	49
4.5	Rozmiestnenie UWB modulov	51
4.6	Prvé testy určovania polohy	52
4.7	Pozorovanie počas testovania	53
4.7.1	Meranie nepravdivej vzdialenosti	53
4.7.2	Odpájanie modulov	55
5	Komunikácia a spracovanie dát	56
5.1	Komunikácia medzi UWB tagom a Nvidia Jetson	56
5.1.1	Forma správy	56
5.1.2	Spracovanie a zdieľanie dát pomocou ROS topicu	56
5.2	Výpočet relatívnej polohy v priestore	57
5.3	Štruktúra výmeny dát	58
5.4	Prepojenie jednotlivých častí	58
5.4.1	Mavlink	59
6	Simulácia	60
6.1	Vysielanie UWB modulov	60
6.2	Testovací dron	61
6.2.1	Ovládanie dronu	61
6.3	Testovanie	62

Záver	65
Literatúra	66
Zoznam symbolov a skratiek	68
Zoznam príloh	69
A Schéma zapojenia shieldu	70
B Namerané hodnoty	71
B.1 Meranie vzdialenosti medzi dvoma bodmi	71
B.2 Meranie určovania relatívnej polohy v priestore	72
C Obsah priloženého CD	73
C.1 catkin_ws	73
C.1.1 src	73
C.2 schemaGerberShieldu	73
C.3 zdrojoveSuboryAnchorTag	73

Zoznam obrázkov

1.1	GNSS	14
1.2	Ilustrácia použitia WPS	15
1.3	UWB modul DWM1000	17
1.4	Príklad použitia Lidaru	18
1.5	Príklad závislosti intenzity signálu od vzdialenosti	19
1.6	Grafické znázornenie AoA	20
1.7	TDoA	22
1.8	Hybridná technológia ToA, AoA a RSS fingerprintov	22
1.9	Grafické znázornenie Fingerprint Positioning	23
1.10	ToF	24
1.11	Grafické znázornenie trilaterácie	25
2.1	ROS	26
2.2	Filozofia ROSu	27
2.3	Štruktúra ROSu	28
2.4	Prepojenie ROSu a letového kontroléru	30
2.5	MicroRTPS Bridge	31
3.1	UWB modul DWM1000-Qorvo	34
3.2	Koncept TWR	35
3.3	Výmena správ vo fáze hľadania a merania	36
3.4	Výstupné piny modulu DWM1000	37
3.5	Skúšobné zapojenie modulu DWM1000 s ESP8266	38
3.6	Schéma zapojenia schieldu	39
3.7	Layout shieldu, horná vrstva	40
3.8	Layout shieldu, spodná vrstva	41
3.9	Hotový shield	41
3.10	Battery shield	42
3.11	Batéria	42
3.12	Finálna podoba statického bodu	43
3.13	Finálna podoba statického bodu	43
3.14	Finálna podoba tagu	44
3.15	Tag umiestnený na drone	44
4.1	Nákres možného rozmiestnenia UWB modulov	46
4.2	Namerané hodnoty vzdialenosti medzi dvoma bodmi	48
4.3	Priebeh absolútnej chyby merania vzdialenosti medzi dvoma bodmi	48
4.4	Meranie určovania polohy v priestore	49
4.5	Absolútna chyba určovania polohy v priestore	50
4.6	Rozmiestnenie modulov na štvorcovej ploche	51

4.7	Možné rozmiestnenie modulov na štvorcovej ploche	52
4.8	Vizualizované zaznamenané dáta určenej polohy	53
4.9	Merané dáta 3. vysielajú	54
4.10	Merané dáta 3. vysielajú s aplikovaným filtrom	54
5.1	Príklad vyslanej správy z UWB tagu	56
5.2	Príklad uwb data topic správy v ROS-e	57
5.3	Výstup vypočítanej relatívnej polohy	57
5.4	Blokový diagram výmeny a spracovania dát	58
5.5	Bloková schéma prepojenia jednotlivých častí	59
6.1	Umiestnenie UWB modulov v prostredí Rviz	60
6.2	Testovací dron hector-quadrotor	61
6.3	Rozhranie na ovládanie drona	61
6.4	Dron v simulačnom prostredí Gazebo	62
6.5	Dron v simulačnom prostredí Rviz po spustení	62
6.6	Dron po spustení simulácie	63
6.7	Dron po zmene polohy	63
A.1	Schéma zapojenia shieldu	70

Zoznam tabuliek

3.1	Porovnanie parametrov technológií	32
3.2	Prehľad dostupných UWB integrovaných obvodov	34
4.1	Súradnice umiestnenie UWB modulov	50
B.1	Namerané hodnoty vzdialenosti medzi dvoma bodmi	71
B.2	Namerané hodnoty určovania relatívnej polohy v priestore	72

Úvod

Cielom tejto práce je navrhnuť lokalizačný systém, ktorý bude schopný určiť polohu drona v známom prostredí bez využitia GNSS. Hlavnou motiváciou pri tvorbe tejto práce je možné využitie vytvoreného systému pre vojenské účely, prípadne pri automatizácii dronov v budúcnosti. Ako je známe, väčšina súčasných systémov na určovanie polohy je závislá na prijíme signálu zo satelitov. Avšak tieto systémy, ako napríklad celosvetovo najznámejší používaný spôsob lokalizácie objektov v priestore, ktorým je GPS, nie je v praxi možné použiť vo vnútorných priestoroch z dôvodu blokovania signálu stenami. Prijímače nie sú schopné zachytiť signál zo satelitov, pretože vysielaný signál zo satelitov nemôže prejsť cez stropy a steny budov. Taktiež vo vojenských priestoroch môžu byť signály GNSS zámerne rušené, prípadne môžu byť vysielané signály, ktoré by mohli viesť k zámernému skresleniu lokalizácie a navigácie daného objektu. Spôsob lokalizácie by nemal byť ovplyvnený meteorologickými podmienkami, ako napr. hmla.

V tejto práci sa budeme zaoberať vývojom systému, pomocou ktorého bude možné lokalizovať dron v známom prostredí bez využitia GNSS. V práci sa oboznámime s technológiami, ktoré by bolo možné využiť na určovanie polohy. Zároveň sa taktiež zoznámime s rôznymi metódami, pomocou ktorých je možné určovať vzdialenosť medzi prijímačom a vysielateľom. Zhodnotíme si výhody, nevýhody jednotlivých metód a podmienky ich použitia.

V ďalšej časti práce sa oboznámime s ROS-om. Ide o zbierku softvérových frameworkov určených na vývoj robotov. Vysvetlíme štruktúru a komunikáciu medzi jednotlivými uzlami ROS-u. Zoznámime sa s využitím ROS-u na programovanie s dronmi. Konkrétne sa oboznámime s výmenou dát a formátom správ medzi letovým kontrolérom PixHawk PX4 a ROSom.

Ďalej sa budeme zaoberať výberom vhodnej technológie pre naše použitie. Na základe dostupných integrovaných obvodov pre danú technológiu si zvolíme vhodný modul, ktorý bude možné použiť pri riešení danej problematiky. Taktiež sa budeme zaoberať výberom vhodnej metódy určovania polohy medzi vysielateľmi a prijímačom na základe teoretických predpokladov. Zároveň si zvolíme vhodný počet vysielateľov, ktorý bude vhodný pre našu aplikáciu.

Výsledkom tejto práce by mal byť systém, pomocou ktorého bude môcť identifikovať polohu dronu v danom známom prostredí bez využitia GNSS. V rámci tejto bakalárskej práce budeme uvažovať skúšobné prostredie ako periméter s približnými rozmermi 10 m x 8 m. Jedným z hlavných predpokladov lokalizácie bude dosiahnutie čo najvyššej presnosti a spoľahlivosti určenia polohy v danom prostredí.

1 Problematika lokalizácie objektov v známom prostredí bez využitia GNSS

V tejto kapitole sa postupne oboznámime s dostupnými technológiami na určovanie polohy a metódami na určovanie vzdialenosti medzi vysielačmi a prijímačmi. Taktiež sa zoznámime s najmodernejším systémom na určovanie polohy GNSS.

1.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)

GNSS je celosvetový systém na určovanie polohy a času, zahŕňajúci konšteláciu satelitov obiehajúcich zemeguľu, ktoré vysielajú ich polohu v priestore a čase. Je používaný vo všetkých druhoch dopravy, ako napr. v letectve, lodnej doprave a v najväčšej miere v automobiloch.

Známejší pod názvom „*satelitná navigácia*“ je služba, ktorá umožňuje za pomoci družíc autonómne priestorové určovanie polohy, rýchlosti a času s celosvetovým pokrytím. Používatelia tejto služby musia disponovať nejakým typom rádiového prijímača, ktorý je schopný na základe prijatých signálov z družíc vypočítať polohu. Presnosť je závislá od počtu prijatých signálov z družíc, môže sa pohybovať v rozmedzí desiatok metrov až po jednotky centimetrov. GNSS spája dokopy všetky doterajšie satelitné systémy ako americký GPS (Global Positioning System), ruský GLONASS, európsky Galileo a čínsky BeiDou.



Obr. 1.1: GNSS

Od septembra 2020 je systém plne funkčný. Momentálne je v prevádzke systému GNSS 119 satelitov (GPS – 30, GLONASS – 23, BeiDou – 44, GALILEO – 22). Spojením viacerých navigačných systémov sa výrazne zvýšila presnosť určovania polohy. Napr. samostatný systém GPS má presnosť v jednotkách metrov, avšak v spojení s ostatnými systémami tvoriacimi GNSS je presnosť v jednotkách centimetrov. [1]

Nevýhodou tohto systému je jeho možné použitie iba vo vonkajších priestoroch. Systém nie je možné prakticky použiť vo vnútorných priestoroch. Dôvodom je blokovanie priechodu signálu cez steny budov medzi prijímačom a satelitmi.

1.2 Technológie na určovanie polohy

V tejto podkapitole sa zoznámime s dostupnými technológiami, ktoré je možné použiť na určovanie polohy v priestore.

1.2.1 WPS (Wi-Fi – based positioning system)

Je systém na určovanie polohy, ktorý využíva ako zdroj signálu na určovanie polohy všetky Wi-Fi zariadenia, ako napr. Wi-Fi hospoty, wireless access pointy. Táto technológia sa využíva tam, kde je GPS nedostatočne presné, prípadne vôbec nepoužiteľné z dôvodu blokovania signálu stenami budov alebo veľmi dlhého času, ktorý by bol potrebný na zameranie presnej polohy. V súčasnosti sa najčastejšie používa na určovanie polohy vo vnútorných priestoroch.



Obr. 1.2: Ilustrácia použitia WPS [3]

Určovanie polohy pomocou Wi-Fi zohráva stále väčšiu úlohu pri zlepšovaní kvality, pretože dobré umiestnenie môže zlepšiť kvalitu určovania polohy v interiéroch bez použitia ďalších zariadení. To spôsobí, že budeme využívať existujúcu Wi-Fi infraštruktúru, ktorá nikdy nebola dizajnovaná na určovanie polohy. Metódy, ktoré boli používané pre iné technológie, môžu byť použité aj s Wi-Fi.[2]

Výhodou Wi-Fi je hlavne to, že na určovanie polohy nie je potrebný žiadny špecifický hardvér alebo softvér. Najznámejšia technika na určovanie vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom pracuje na základe intenzity prijatého signálu RSS. Techniky založené na meraní času, ako napr. ToA alebo TDoA, sú menej používané, pretože meranie času je zložité. Tak ako aj pri iných technikách poloha prístupových bodov (vysielateľov) musí byť vždy známa a presne určená. Polohu v priestore je možné vypočítať na základe nameraných intenzít prijatých signálov napr. trilateráciou.[5]

1.2.2 UWB (Ultra-Wideband)

UWB je technológia, ktorá je založená na vysielaní veľmi krátkych pulzov menších než 1ns s veľmi nízkou striedou od 1 do 1000. Vyslaný signál je distribuovaný cez široké pásmo. Týmto UWB umožňuje presnú lokalizáciu a sledovanie aj vo vnútorných priestoroch.

Táto technológia je zvyčajne používaná výskumníkmi, v priemysle a v iných rôznych oblastiach vrátane určovania polohy vo vnútorných priestoroch s cieľom zlepšiť dosiahnutie vysokého rozlíšenia a presnosti určovania polohy, nízkej možnosti rušenia a taktiež možnosť kombinácie určovania polohy a komunikáciu pre dáta v jednom systéme. Táto technológia je škálovateľná a môže byť použitá v nízkonákladových aplikáciách s nízkou spotrebou energie.

Vzdialenosť medzi bodom vysielateľa a prijímateľa je určená na základe vysielaných rádiových signálov. Pozície vysielateľov musia byť dopredu určené a známe. Určiť vzdialenosť je možné pomocou ToA, AoA, RSS, TDoA a taktiež je možné použiť hybridnú technológiu. Vo všeobecnosti sa dá s technológiou UWB dosiahnuť presnosť na centimetre, napr. s trojrozmerným určovaním polohy na základe ToA bola dosiahnutá presnosť 15cm. Komponenty viacestného signálu sú rozdelené UWB prijímačmi, pretože vysielajú široké pásmo.

Pri aplikáciách s technológiou UWB sú metódy určovania polohy na základe času, ako napr. ToA, výhodnejšie z hľadiska presnosti v porovnaní s určovaním polohy na základe intenzity signálu RSS. Široké pásmo UWB nie je efektívne používať s RSS. Je to z dôvodu možnej interferencie v danom pásme signálu. V spojení so zvyšovaním presnosti určovania polohy je výhodnejšie použiť techniky založené na základe času.

V porovnaní s Wi-Fi, ktorej šírka pásma jedného kanálu sa pohybuje medzi 20 – 80 MHz, minimálna šírka pásma kanálu UWB je 500 MHz. Cez širšie pásmo je možné previesť väčšie množstvo dát za rovnaký čas. Šírka pásma UWB modulov sa pohybuje medzi 3,1 – 10,6 GHz, avšak najpoužívanejšie moduly od firmy Qorvo pracujú v pásme 3,5 – 6,5 GHz (DW1000), 6 – 8,5 GHz (DW3000). Český telekomunikačný úrad povoľuje kmitočty v rozsahu 3,1 – 4,8 GHz a 6 – 9 GHz, takže najnovšie moduly od výrobcu CEVA, ktoré pracujú v pásme 3,1 – 10,6 GHz nie je možné v ČR používať.[5]



Obr. 1.3: UWB modul DWM1000

1.2.3 Bluetooth

Ide o bezdrôtovú technológiu krátkeho dosahu, ktorá sa používa na výmenu dát medzi zariadeniami na malej vzdialenosti pomocou UHF rádiových vln, v pásme 2,402 GHz až 2,48 GHz. Originálne bol vymyslený ako bezdrôtová náhrada RS-232. Pôvodne Bluetooth nebol na určovanie polohy, ako napr. GPS. Avšak s riešením spojeným s Bluetooth LE (Low Energy) prišla firma Apple. Systém pomenovali iBeacon a bol predstavený v roku 2013.

Zariadenie vysiela univerzálny unikátny identifikátor, ktorý je následne zachytený kompatibilným zariadením. Identifikátorom je rozlíšené, z ktorého zariadenia signál prišiel. Následne z prijatých údajov je možné určiť fyzickú polohu zariadenia. Určovanie od jednotlivých vysielateľov iBeacon sa rozdeľuje do troch rozsahov: okamžitá (niekoľko centimetrov), blízko (niekoľko metrov), ďaleko (viac ako 10 m). Avšak táto technológia má veľmi nízky dosah, typický dosah Bluetooth je do 10 m. Táto technológia však napreduje, Bluetooth 5.0 deklaruje dosah 40 – 400m. Presnosť je závislá od vzdialenosti, napr. do jedného metra je možné dosiahnuť presnosť +/- 10 cm, pri vzdialenosti 5 m a viac je presnosť +/- 2 m. Čím je vzdialenosť väčšia tým je aj nižšia presnosť. Táto závislosť dosť obmedzuje využitie tohto systému na väčšie vzdialenosti.[6]

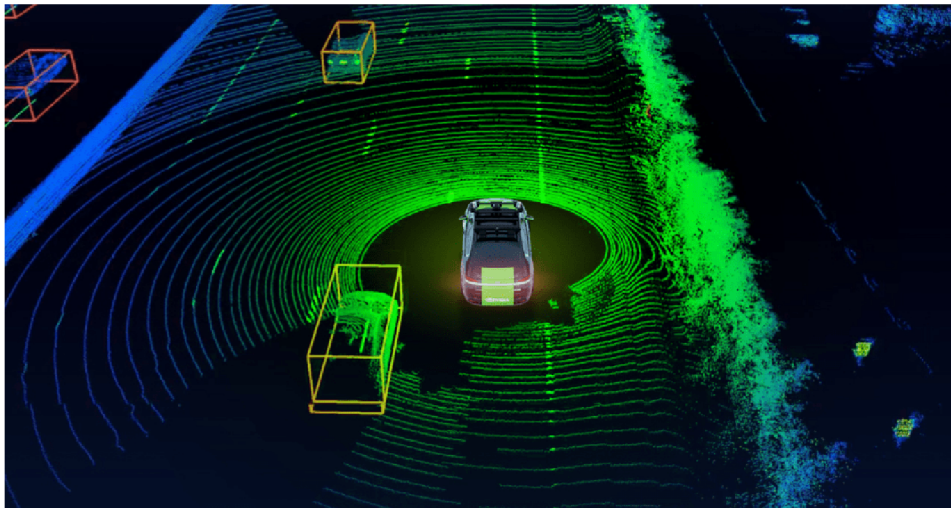
1.2.4 Lidar (Light Detection and Ranging)

Je technológiou na určovanie vzdialenosti na základe vysielania laserového lúča a merania času, ako dlho trvá svetlu po odrazení vrátiť sa späť do vysielача. V praxi sa používa na mapovanie, 3D skenovanie povrchu a v mnohých ďalších oblastiach. Táto technológia sa taktiež v praxi používa na navigáciu autonómnych áut.

Lidary môžeme rozdeliť na dva druhy, topografické a batymetrické. Topografické sa používajú na mapovanie zemského povrchu, vlnová dĺžka lasera sa pohybuje od 905 nm do 1550 nm. Batymetrické sa používajú na mapovanie riek, jazier a vodných plôch. Pri tomto type lidarom sa používajú lasery s kratšou vlnovou dĺžkou ako pri topografických. Laser s kratšou vlnovou dĺžkou preniká cez vodu s menším útlmom ako laser s dlhšou vlnovou dĺžkou.

Základná konštrukcia lidarom pozostáva z lasera a zrkadla, ktoré môže byť natáčané buď len v jednej, alebo dvoch osiach. Natáčaním zrkadla môžeme postupne získať vzdialenosti po jednotlivých stupňoch. Kombináciou rotovania zrkadla môžeme získať všetky vzdialenosti v 360 stupňoch. Dosah sa môže pohybovať od jednotiek metrov až po viac ako 200 m.

Na určenie vzdialenosti medzi lidarom a objektom sa využíva ToF (Time of Flight). Zdroj svetla je laser, odrazené svetlo je zachytené fotosenzorom, napr. fotodiódou. Sleduje sa fáza vyslaného a prijatého svetla. Rozdiel vo fáze je prepočítaný na čas.[7]



Obr. 1.4: Príklad použitia Lidaru

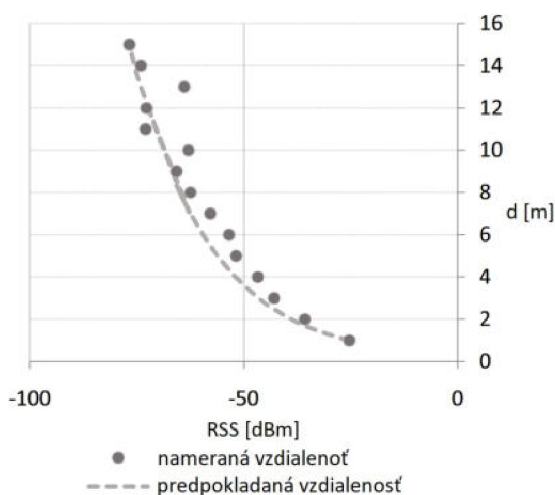
1.3 Metódy určovania vzdialenosti medzi prijímačom a vysielateľom

V súčasnosti vývoj riešení pre lokalizáciu objektov na základe efektívnych algoritmov je veľmi sľubný, avšak zároveň ťažký a komplexný problém. Na meranie vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom sa využívajú techniky, ako napr. RSSI (Received signal strength indication), AoA (Angle of arrival), ToA (Time of arrival) alebo aj Fingerprinting. V tejto kapitole sa postupne oboznámime s každou z týchto metód.

1.3.1 RSSI (Received signal strength indication)

Je metóda, ktorá je založená na meraní intenzity signálu z niekoľkých rôznych prístupových bodov. Týmto spôsobom je možné určiť vzdialenosť medzi klientským zariadením a prístupovými bodmi. Avšak takto určená vzdialenosť nám určí iba rádius, v ktorom sa nachádza klientské zariadenie.

Intenzitu prijatého signálu je možné použiť na odhad vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom. Hodnota RSSI exponenciálne klesá v závislosti od vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom a náhodným šumom. Preto túto závislosť môžeme považovať za funkciu vzdialenosti. Vzdialenosť odhadovaná pomocou RSSI je prezentovaná ako rádius okolo prístupového bodu. Taktiež, ako aj pri iných metódach na určenie relatívnej polohy v priestore, je potrebné použiť napr. trilateráciu.[3]



Obr. 1.5: Príklad závislosti intenzity signálu od vzdialenosti [3]

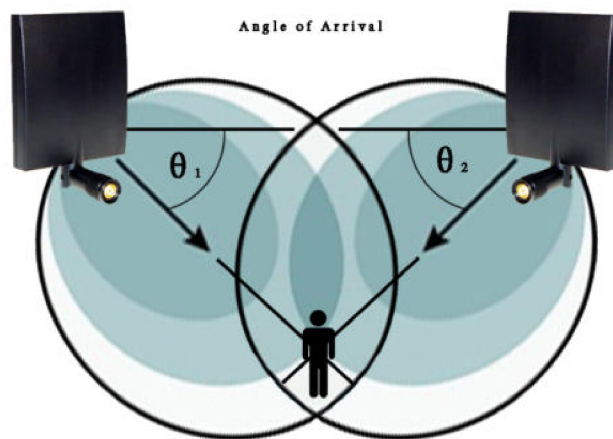
Intenzita zachyteného signálu je meraná v dBm. Je to logaritmickej jednotka výkonu, ktorá sa používa na indikáciu výkonu vyjadrenú v decibeloch v závislosti na jednom miliwate.

Na obrázku 1.5 je vykreslená závislosť reálnej a vypočítanej vzdialenosti medzi prístupovým bodom a mobilným zariadením. Od deviateho metra môžeme pozorovať výrazné chyby, ktoré sú spôsobené tým, že prijímaný signál prechádzal stenou. Ide o jednu z najlacnejších a najjednoduchších metód na implementáciu, avšak vo vnútorných priestoroch neposkytuje veľmi dobrú presnosť (v priemere dva až štyri metre). Tento problém je spôsobený blokovaním priechodu signálu cez steny.[3]

1.3.2 AoA (Angle of Arrival)

Pri tejto metóde sa určuje uhol prijímaného signálu, pomocou geometrie je možné určiť polohu zariadenia. Na určenie polohy je potrebné použiť minimálne dva zdroje signálu. Odhad uhla má nepresnosť napr. pri použití s technológiou Wi-Fi iba dva stupne. Použitie tejto metódy si vyžaduje špecifický hardvér, avšak poskytuje veľmi dobré výsledky. Výhodou je taktiež to, že je potrebný menší počet vysieláčov v porovnaní s inými metódami.

Na určenie polohy sú potrebné špeciálne antény. Tieto antény musia byť schopné merať fázový posun prichádzajúcich signálov. Preto je najlepšie použiť všesmerové antény alebo použiť väčšiu sústavu antén. Smer môže byť určený pomocou TDoA (Time Difference of Arrival). Keď signál zasiahne anténu v pravom uhle, TDoA je rovné nule. V ostatných prípadoch signál zasiahne iba časť antény ako prvú, ktorá má najmenšiu vzdialenosť od zdroja signálu. Týmto spôsob je možné určiť, z akého smeru bol signál zachytený. Časový rozdiel prijímania na ďalšej časti antény je zmeraný, následne pomocou rozdielu je možné vypočítať uhol.



Obr. 1.6: Grafické znázornenie AoA [2]

Presnosť určovania uhla má nepresnosť iba dva stupne, avšak táto hodnota sa môže meniť v závislosti od použitých anténach. Taktiež je veľmi komplikované a náročné zabudovať sústavu antén alebo všesmerovú anténu, pomocou ktorej by bolo možné dosiahnuť dobré výsledky. Veľkou nevýhodou je hlavne to, že túto metódu nie je možné použiť s hocíjakým dostupným hardvérom. Ďalšou nevýhodou je vysoká obstarávacia cena špecifického hardvéru.[2]

1.3.3 ToA (Time of Arrival)

ToA je čas šírenia signálu prechádzajúceho medzi vysielačom a prijímačom. Nevýhodou tejto metódy je nutnosť synchronizovať čas všetkých vysielačov. Toto znamená, že zdroj vysielačného signálu a všetky prijímače je potrebné presne synchronizovať pre meranie ToA. Získaný čas je potom vynásobený známou rýchlosťou šírenia, ktorá sa zvyčajne označuje písmenom c . Tak ako aj pri RSSI takto vypočítaná vzdialenosť nám určí iba to, v akom rádiuse okolo vysielača sa prijímač nachádza. Na získanie polohy v 2D priestore je potrebné použiť trilateráciu.[4]

Určovanie relatívnej polohy je založené na trilaterácii v kombinácii s meraním času. Minimálne musia byť použité tri zdroje signálu. Súradnice polohy vysielačov musia byť presne definované. Túto metódu nie je možné použiť s Wi-Fi, pretože nie je možné synchronizovať presne čas medzi všetkými vysielačmi a prijímačom. Výslednú vzdialenosť je možné vyjadriť vzorcom:

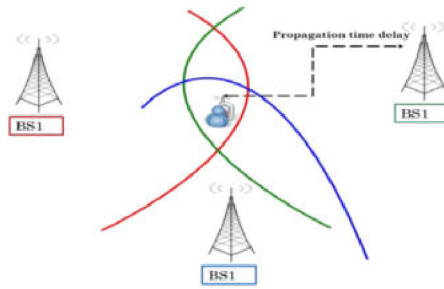
$$d_x = t_x * c \quad (1.1)$$

kde d_x je výsledná vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom, t_x čas signálu medzi vyslaním a prijatím a c je rýchlosť šírenia.

1.3.4 TDoA (Time Difference of Arrival)

Tak ako aj ToA, TDoA taktiež potrebuje synchronizovaný čas medzi vysielačmi. Určuje sa rozdiel časov medzi jednotlivými prijatými signálmi. Na základe rozdielu času sa určuje poloha zariadenia od vysielača. Čiže ide vlastne o oneskorenie medzi vysielačmi jednotlivých signálov.

Tak ako aj pri väčšine metód pozícia vysielačov musí byť známa a presne určená. Na určenie polohy v priestore je potrebné napr. trilateráciu, čiže na určenie polohy sú potrebné minimálne tri vysielače signálu. Túto technológiu nie je možné taktiež ako ToA použiť v spojení s Wi-Fi, pretože Wi-Fi nie je určená na meranie presného času. Túto metódu je napr. možné použiť v spojení s technológiou UWB.[5]

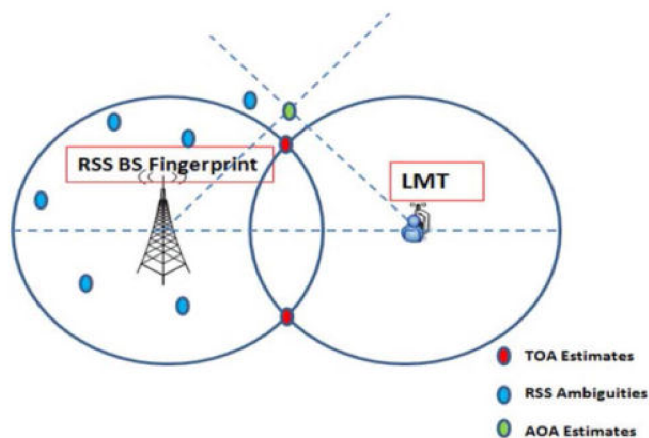


Obr. 1.7: TDoA [5]

1.3.5 Hybridná metóda

V poslednej dobe sa rozmáha hybridné a kooperatívne určovanie polohy. Táto metóda ukazuje nový spôsob bezdrôtového určovania polohy. Základnou myšlienkou je využiť kooperatívne určovanie polohy, ktoré sa bude spoliehať na presné merania krátkeho dosahu s cieľom zvýšiť presnosť určenia polohy.

Rôznymi kombináciami základných metód, ako sú RSS, ToA, TDoA, AoA a iné, by boli implementované s cieľom zvýšiť presnosť určovania polohy. Na obrázku 1.8 môžeme pozorovať možné použitie hybridnej technológie, v tomto prípade je to kombinácia ToA, AoA a RSS fingerprintov. Pomocou tejto metódy je možné dosiahnuť väčšiu presnosť, ako napr. pri samostatných metódach ToA, TDoA, AoA alebo RSS. Avšak táto metóda si vyžaduje veľmi špecifický hardvér, kvôli použitiu AoA. Taktiež z časového hľadiska je vytváranie RSS fingerprintov veľmi zdĺhavý proces, avšak prináša dobré výsledky.



Obr. 1.8: Hybridná technológia ToA, AoA a RSS fingerprintov[5]

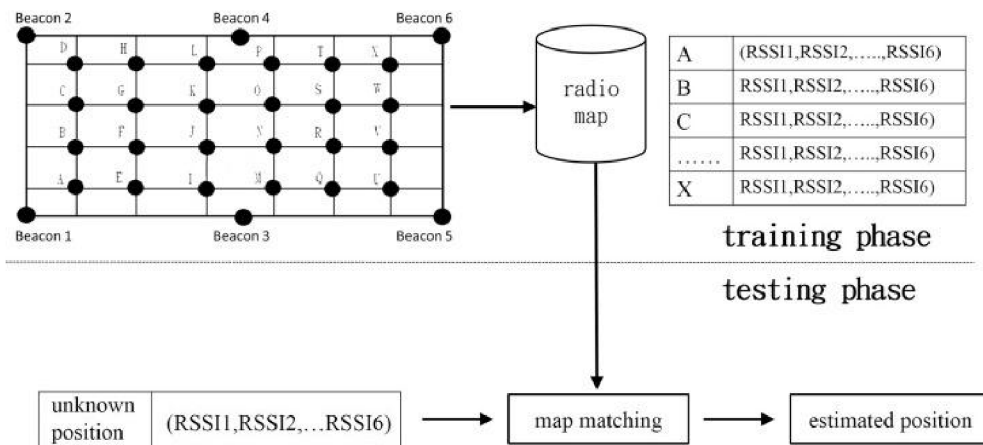
1.3.6 Fingerprint Positioning

Inak známy pod menom Location Patterning. Tento spôsob lokalizácie využíva na určenie polohy vopred vytvorenú databázu signálových obrazcov, ktoré následne porovnáva a hľadá zhodu v databáze. Na rozdiel od AoA si nevyžaduje nejaký špeciicky upravený hardvér a taktiež nie je potrebná synchronizácia času medzi zdrojmi signálu.

Predtým, ako je možné začať túto metódu používať, je potrebné dôkladne zmapovať dané prostredie a vytvoriť databázu, táto časť sa zvyčajne označuje ako prvá fáza. Krok po kroku musí byť vytvorená mapa bodov, ktorú získame napr. pomocou RSS (Received Signal Strength). Každý zaznamenaný bod musí obsahovať vzdialenosti od všetkých zdrojov signálu. Počet staníc musí byť vopred známy a môže byť zmenený, iba ak by sme znova vytvorili databázu.

Vo fáze zisťovania polohy zariadenia sa postupne zisťuje intenzita všetkých prijatých signálov v dosahu. Tieto namerané dáta sa uložia vektoru, ktorý sa bude porovnávať s vektormi uloženými v databáze. Na určenie najbližšieho bodu sa využíva euklidovská vzdialenosť medzi dvoma vektormi. Následne sa vyberie bod, ktorého euklidovská vzdialenosť bude najmenšia, tento bod sa bude považovať za aktuálnu polohu. Nevýhodou tejto metódy je, že si vyžaduje veľmi komplexnú prípravu predtým, ako bude možné systém používať.

Zaujímavosťou tejto metódy je, že na určenie polohy nie je potrebné poznať súradnice zdrojov signálov. Potrebné je mať len databázu vytvorených bodov. Výhodou tejto metódy je vysoká presnosť, pokiaľ je dôkladne vytvorená databáza bodov. Zároveň však vytvorenie databázy bodov je jednak časovo náročné, a zároveň oproti ostatným metódam potrebuje značne väčšie úložisko.[2]

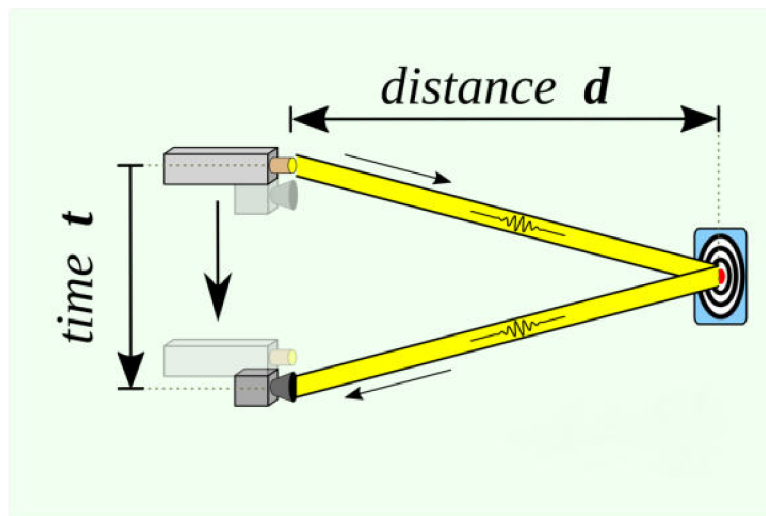


Obr. 1.9: Grafické znázornenie Fingerprint Positioning

1.3.7 ToF (Time of Flight)

Je metóda založená na meraní času, koľko trvá signálu od jeho vyslania z vysielajúča odrazenie a návrat späť do prijímača. Tak ako už bolo spomenuté zariadenie, ktoré pracuje pomocou ToF, musí disponovať nejakým zdrojom signálu a taktiež detektorom signálu. Typickým príkladom je napr. Lidar, zdrojom vysielajúča je laser a prijímačom je napr. fotodióda.

Meranie času je založené na sledovaní fázy vyslaného a prijatého signálu. Rozdiel fáz signálov nám určí dobu letu. Ak je nám známy čas letu, môžeme jednoducho vypočítať vzdialenosť objektu, od ktorého sa signál odrazil. Pri tomto treba myslieť na to, že zmeraný čas letu je dvojnásobný.



Obr. 1.10: ToF

Na výpočet vzdialenosti je potrebné vynásobiť čas konštantou rýchlosti šírenia. Tento výsledok je ešte potrebné vydeliť dvojkou, aby sme dostali vzdialenosť medzi zariadením a objektom.

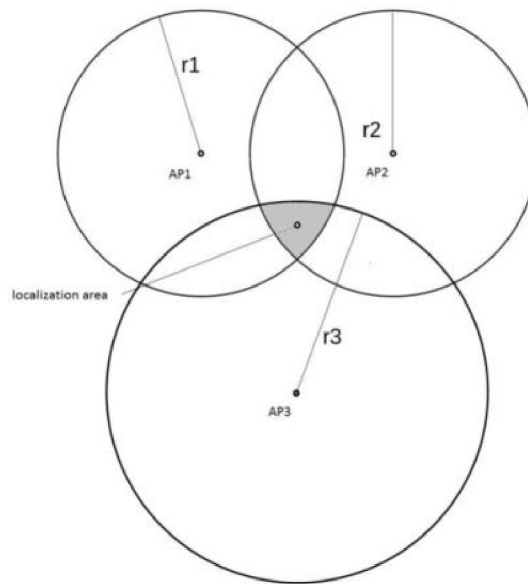
$$d = \frac{c * t}{2} \quad (1.2)$$

1.4 Trilaterácia

Trilaterácia je jednou z techník, ako môže byť vypočítaná odhadovaná poloha klientského zariadenia relatívne k známej polohe prístupových bodov pomocou geometrie. Aby tento výpočet bolo možné uskutočniť, je potrebné použiť minimálne tri zdroje signálu. Priesečník týchto troch rádiusov nám určí bod alebo plochu, kde sa zariadenie nachádza. Tento model môže byť zobrazený ako systém rovníc:

$$\begin{aligned}d_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\d_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\&\dots \\d_n^2 &= (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2\end{aligned}\tag{1.3}$$

kde $x_1, x_2, x_n, y_1, y_2, y_n$ sú súradnice prístupových bodov, d_1, d_2, d_n sú predpokladané vzdialenosti do jednotlivých prístupových bodov.



Obr. 1.11: Grafické znázornenie trilaterácie [3]

Určovanie polohy sa vo všeobecnosti skladá z dvoch krokov. Prvý krok je zistenie vzdialenosti od jednotlivých zdrojov signálov napr. pomocou RSSI, tým sa určí rádius od vysielača. V druhom kroku sa na základe vypočítaných vzdialeností a známej polohy prístupových bodov určí poloha zariadenia v priestore. Potrebné je použiť aspoň tri vysielače. Dôvodom je, že pri použití iba dvoch vysielačov by nám vznikli dva priesečníky a nebolo by možné určiť, ktorý priesečník označuje polohu zariadenia. Pridaním ďalšieho vysielača sa tento problém odstráni.

2 ROS (Robot operating system)

Je zbierka open-source middleware balíčkov, ktoré je možné použiť na komplexné ovládanie robotických systémov. Nejde teda o operačný systém, ale o zbierku softvérových frameworkov určených na vývoj robotov. V praxi predstavuje premostenie medzi aktuátormi, senzormi a riadením robota v rámci jedného komplexného systému.[8]



Obr. 2.1: ROS [8]

2.1 História

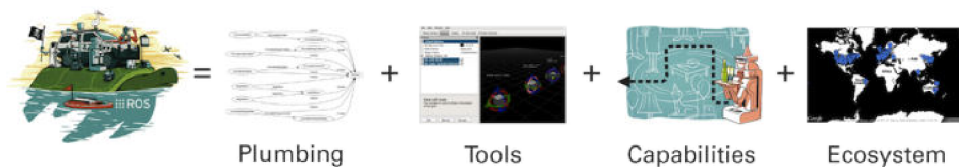
Niekedy pred rokom 2007 dvaja študenti doktorandského štúdia Standfordskej univerzity Eric Berger a Keenan Wyrobek pracovali na projekte Personal Robotics Program. Pri práci s robotmi, ktoré vykonávali manipulačné úlohy v ľudskom prostredí, si títo študenti všimli, že ich pri vývoji veľmi brzdí takzvaná „rozmanitosť robotiky“. Tým mysleli, že vývojár softvéru nemusí mať potrebnú znalosť hardvéru, alebo niekto, kto pracuje na vývoji najmodernejšej cesty plánovania trasy, nemusí vedieť, ako vytvoriť dokonalé počítačové videnie. V snahe napraviť túto situáciu, sa títo dvaja študenti rozhodli, že vytvoria nejaký základný systém, na ktorom by mohli stavať ostatní v akademickej obci.

Takto započali vývoj, získali dotáciu 50 000 dolárov na vývoj základnej verzie. Pri hľadaní financií na ďalší vývoj sa stretli s Scottom Hassanom, zakladateľom spoločnosti Willow Garage, ktorý v tej dobe pracoval na vývoji autonómnych áut. Hassan zdieľal ich myšlienku a pozval ich, aby prišli pracovať do jeho firmy Willow Garage. Následne v siedmeho novembra 2007 bola vydaná prvá verzia ROS-u.

2.2 Filozofia

ROS bol navrhnutý s ohľadom na open-source s cieľom, aby si používatelia mohli vybrať konfiguráciu nástrojov a knižníc, ktoré zaintegrujú do jadra ROS-u tak, aby vyhovovali aplikácii používateľa. Hlavným cieľom ROS-u nie je len prepájať jednotlivé štruktúry. Poskytuje sadu nástrojov na simulácie, širokú škálu knižníc, pomocou ktorých môžu rôzne systémy medzi sebou komunikovať a taktiež komunitu (ekosystém).

Z hľadiska komunikácie je cieľom decentralizovanosť, čiže zabezpečiť peer-to-peer komunikáciu medzi jednotlivými uzlami. Taktiež je možné používať rôzne programovacie jazyky, ako napr. C++ alebo Python, alebo aj iné novšie jazyky. Dôraz sa taktiež kladie na to, aby bol open-source.



Obr. 2.2: Filozofia ROSu [8]

Plumbing znamená prepojenie. ROS poskytuje systém výmeny správ, často nazývaný ako *middleware*. Komunikácia je jednou z prvých vecí, ktoré je potrebné implementovať pri vývoji nejakého robotického systému alebo nejakého softvéru, ktorý bude interagovať s hardvérom. Vstavaný systém ROS-u urýchľuje vývoj a šetrí čas pri spracovávaní komunikácií medzi jednotlivými uzlami prostredníctvom publish/subscribe konceptu. Tento prístup podporuje osvedčené postupy v vývoji softvéru, vrátane izolácií prípadných chýb a funkčných zariadení.

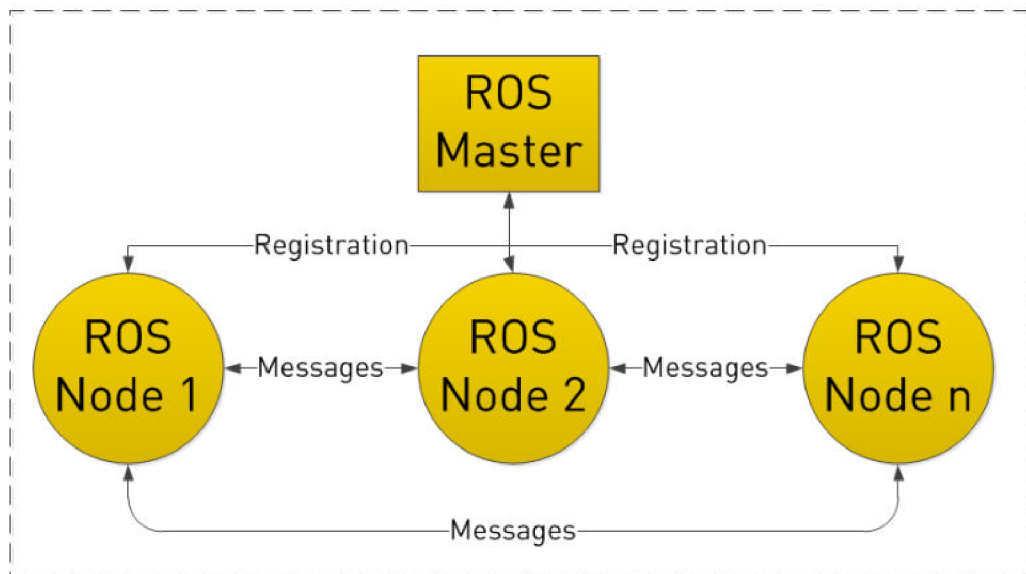
Tools (nástroje) sú dôležitou súčasťou pri vývoji aplikácií. Súčasťou ROSu sú nástroje, ktoré umožňujú simuláciu, vizualizáciu, zaznamenávanie a prehrávanie. Jedným z nástrojov je napr. Gazebo.

Capabilities (schopnosti). Cieľom projektu ROS je neustále znižovať bariéru, ktorá stojí medzi nápadom a realizáciou aplikácie. Každý s dobrým nápadom by ho mal byť schopný zrealizovať aj bez toho, aby rozumel všetkému o základnom hardvéri a softvéri.

V neposlednom rade ROS taktiež poskytuje komunitu, ktorá pozostáva zo študentov a fanúšikov až po nadnárodné korporácie. Týmto sa neustále podporuje vývoj ROS-u. [8]

2.3 Štruktúra

Všetky procesy v štruktúre sú reprezentované ako nodes (uzly), navzájom sú prepojené pomocou topics (témy). Jednotlivé uzly môžu medzi sebou odosielať správy pomocou topics, poskytovať služby iným nodeom, nastaviť alebo získavať zdieľané dáta zo spoločnej databázy, ktorá sa volá parameter server. Hlavným procesom je ROS Master, ktorý uskutočňuje registrovanie jednotlivých uzlov, vytvára komunikáciu medzi jednotlivými uzlami prostredníctvom topics. Správy medzi uzlami neprechádzajú cez master. Master nastaví peer-to-peer komunikáciu medzi všetkými uzlami, potom čo sa zaregistrovali u mastera. Táto decentralizovaná architektúra je vhodná pre systémy, ktoré pozostávajú z menších podmnožín, ktoré môžu medzi sebou komunikovať.



Obr. 2.3: Štruktúra ROSu [8]

2.3.1 Nodes

Každý uzol reprezentuje jeden proces v štruktúre. Každý uzol musí mať unikátne meno, ktoré sa musí zaregistrovať u ROS Mastera predtým, ako bude môcť vykonávať nejakú činnosť. V prípade, že meno nebolo definované, môže ísť o anonymný uzol. K anonymnému uzlu sa vždy automaticky vytvorí nejaký iný identifikátor.

2.3.2 Topics

Témy sú pomenované zbernice, pomocou ktorých si uzly posielajú a prijímajú správy medzi sebou. Každé meno témy musí byť unikátne. Na poslanie správy musí uzol zverejniť (publish) správu v danej téme. Naopak, na prijatie správy musí odoberať danú tému. Tento model zverejňovania/odoberania (publish/subscribe) je anonymný. To znamená, že žiadny uzol nevie, ktoré uzly v danej téme vysielajú alebo prijímajú. Je známe iba to, že v danej téme dochádza k vysielaniu alebo prijímaniu.

2.3.3 Services

Uzly môžu taktiež poskytovať služby. Niektorý klientský uzol môže požiadať o poskytnutie nejakých dát iný uzol, ktorý ho obsluži. Klientský uzol vyšle správu o požiadavku a čaká na odpoveď od nejakého uzla, ktorý poskytuje daný servis.

2.3.4 Parameter server

Je databáza, ktorá je zdieľaná medzi všetkými uzlami. Táto databáza umožňuje spoločný prístup k statickým alebo nie často aktualizovaným informáciám. Nie je určený pre náročné dátové operácie. Je určený pre dáta, ktoré sa nebudú často aktualizovať ako napríklad nejaké konfiguračné parametre.

2.4 Prepojenie s letovým kontrolérom dronu

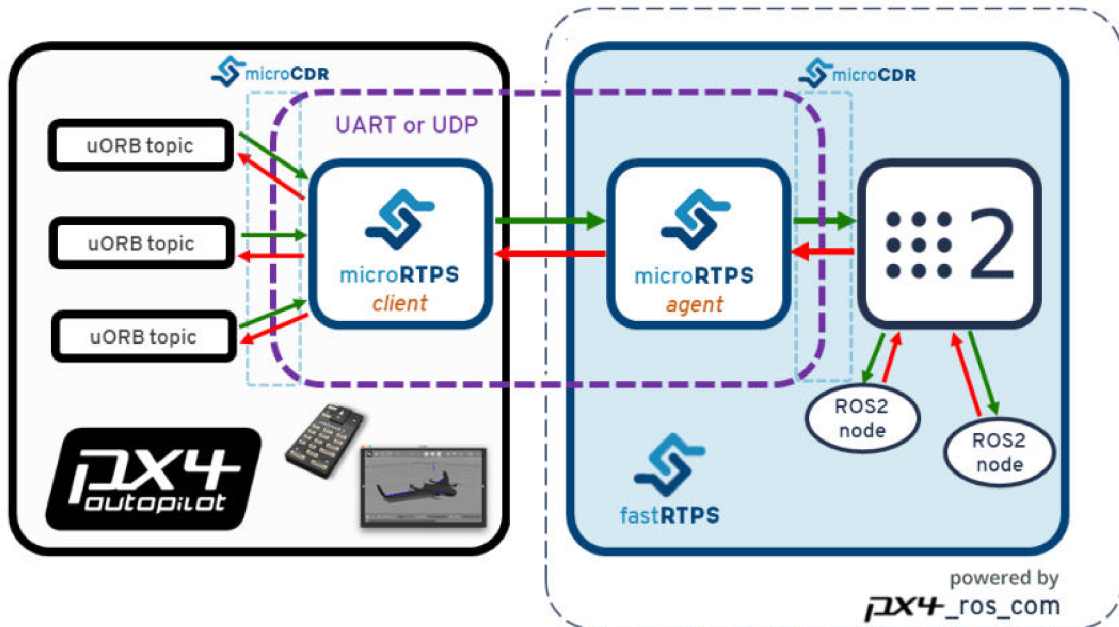
ROS 2 ponúka pre komunikáciu s letovými kontrolérmi Pixhawk dve knižnice `px4_msgs` a `px4_ros_com`, pomocou ktorých je možné uskutočniť výmenu dát medzi agentom bežiacim na ROS-e a letovým kontrolérom. Na obrázku 2.4 je diagram, ktorý znázorňuje vzájomné prepojenie.[9]

2.4.1 Knižnica `px4_msgs`

Táto knižnica definuje ROS2 správy, ktoré sa používajú v Pixhawk PX4 ekosystéme. Zároveň vytvorí všetky potrebné rozhrania na prepojenie ROS uzlov a internými zariadeniami PX4, ktoré používajú uORB. Zároveň je táto knižnica závislá na knižnici `px4_ros_com`, pretože táto knižnica vytvára iba definície správ.[9]

2.4.2 Knížnica px4_ros_com

Táto knížnica vytvára časť PX4-FastRTPS premostenia na strane ROS-u 2. Vytvára premostenie medzi letovým kontrolérom PX4 cez micro-RTPS bridge, Fast-RTPS (DDS) a ROS-om 2. Taktiež je priamo závislá od knížnice `px4_msgs`, pretože závisí na IDL súboroch, ktoré potrebuje na vytvorenie ROS 2 agenta.[9]



Obr. 2.4: Prepojenie ROSu a letového kontroléru [9]

2.4.3 MicroRTPS bridge

Pozostáva z dvoch častí: klienta, ktorý beží na letovom kontroléri Pixhawk a agenta, ktorý beží na ROS-e. Umožňuje obojsmernú komunikáciu medzi UORB správami letového kontroléru a ROS 2 správami. Toto premostenie nám umožňuje vytvoriť na strane ROS-u uzly, ktoré budú môcť priamo zdieľať a prijímať dáta z letového kontroléru Pixhawk. Jednotlivé správy sú serializované predtým, ako sú vyslané pomocou CDR (Common data representation), aby bol zabezpečený nejaký formát, pomocou ktorého bude možné vymieňať dáta medzi rozdielnymi platformami. Hlavné súčasti tejto komunikácie sú zobrazené na obrázku 2.5 .[9]

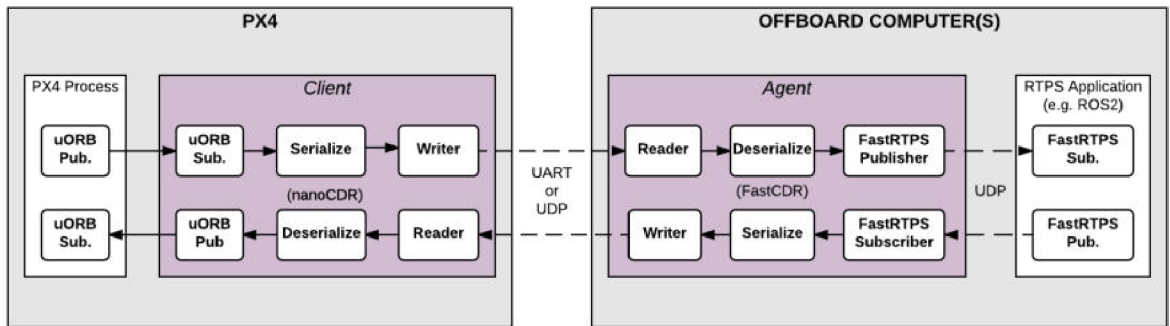
MicroRTPS klient

Je proces, ktorý beží priamo na letovom kontroléri. Klient odoberá uORB témy, ktoré sú zároveň zdieľané ostatnými komponentami letového kontroléru. Hocijaké

aktualizácie sú poslané do microRTPS Agenta cez UART alebo UDP. Zároveň prijíma správy, ktoré Agent zdieľal ako uORB správu určenú pre letový kontrolér.

MicroRTPS agent

Je proces, ktorý beží mimo letového kontroléru napr. na nejakom počítači s ROSom. Agent sleduje updaty, ktoré klient vysiela.



Obr. 2.5: MicroRTPS Bridge [9]

2.4.4 uORB správy

Je asynchrónny publish/subscribe (zverejní/odoberaj) spôsob posielania správ. Letový kontrolér Pixhawk používa tento typ správ na internú komunikáciu medzi perifériami. Tak ako aj ROS jednotlivé periférie letového kontroléra komunikujú medzi sebou na základe topics (tém).

3 Výber senzorkého vybavenia

V tejto kapitole sa oboznámime s výberom vhodnej technológie na lokalizáciu a výber konkrétneho modulu na meranie vzdialenosti.

3.1 Výber vhodnej technológie

V súčasnej dobe sú k dispozícii rôzne technológie, ktoré je možné použiť na lokalizáciu objektov v priestore. Do popredia sa dostáva technológia UWB (Ultra-Wide band – ultraširoké pásmo). Ide o novú technológiu s podobným využitím ako bluetooth. Hodnota šírky pásma jedného kanálu technológie UWB je 500 MHz a viac v porovnaní s technológiou Bluetooth, ktorej šírka pásma jedného kanálu je 1 MHz. Je zrejmé, že technológia UWB dokáže preniesť omnoho väčšie množstvo dát za rovnaký čas.

Tab. 3.1: Porovnanie parametrov technológií

Technológia	WPS	UWB	Bluetooth	Lidar
Pásmo	2,40 – 2,49 GHz 5,15 – 5,85 GHz	3,1 – 10,6 GHz	2,402 – 2,480 GHz	–
Šírka pásma	22 MHz	500 MHz	1 MHz	–
Dosah	100 m	> 200 m	10 m	< 200 m
Presnosť	+/- 10 m	< 10 cm	10 m	0,5 – 10 mm
RSSI	✓	✓	✓	✗
AoA	✓	✓	✓	✗
ToA	✗	✓	✓	✗
TDoA	✗	✓	✓	✗
ToF	✓	✓	✓	✓

V tabuľke 3.1 sú porovnané parametre jednotlivých technológií, ktoré by bolo možné použiť na lokalizáciu. Pre jednotlivé technológie je opísané pásmo, v ktorom môže pracovať, šírka pásma jednotlivých kanálov, dosah, presnosť a metódy určovania vzdialenosti medzi vysielačom a prijímačom, ktoré je možné použiť s danou technológiou.

Technológiu WPS nie je možné použiť v spojení s metódami ToA a TDoA. Je to z dôvodu potrebnej synchronizácie času medzi všetkými zariadeniami. Staršie štandardy Wi-Fi mali pásmo rozdelené tak, že bez interferencie kanálov navzájom bolo možné používať zároveň iba tri kanály. V prípade použitia vyššieho počtu kanálov sa pásma jednotlivých kanálov prekrývali medzi sebou.

Nevýhodou Lidaru je, že navigáciu je možné realizovať iba v prostredí, ktoré už bolo dopredu zoskenované. Následne na základe porovnávania meraných dát so známou mapou môžeme určovať polohu v priestore. Tento faktor je dosť limitujúci z hľadiska variabilného použitia systému. Pri ostatných technológiách nie je potrebné presne poznať miesto, na ktorom budeme určovať polohu. V podstate stačí iba umiestniť vysielače napr. do rohov perimetra, v ktorom chceme určovať polohu. Potrebné je iba vedieť presné pozície vysielačov. V porovnaní s Lidarom stačí pri zavedení systému iba nastaviť presnú polohu vysielačov. Tento úkon je menej časovo náročný ako skenovanie celej oblasti. Presnosť Lidaru je veľmi vysoká, je rádovo v milimetroch. Dosah sa pohybuje do 200 m, avšak pri určovaní polohy pomocou Lidaru by bola z hľadiska dosahu limitujúca hlavne veľkosť naskenovanej oblasti.

Bluetooth by nebolo veľmi vhodné použiť pre našu aplikáciu z dôvodu jeho presnosti a dosahu. Dosah je veľmi nízky, čo by pre našu aplikáciu nebolo vhodné. Taktiež presnosť je so zvyšujúcou sa vzdialenosťou medzi prijímačom a vysielačom veľmi nízka, rádovo v metroch.

Technológia UWB sa momentálne dostáva do popredia ako nástupca Bluetoothu. Súčasné UWB moduly môžu pracovať v pásme 3,1 – 10,6 GHz. Pri tejto technológii je pásmo pre jednotlivé kanály rozdelené tak, že nedochádza k prekrývaniu pásiem jednotlivých kanálov. Šírka pásma jedného kanálu je v porovnaní s Wi-fi alebo Bluetooth niekoľkonásobne väčšia. V praxi je možné pomocou tejto technológie za rovnaký čas preniesť väčšie množstvo dát. Táto technológia dosahuje veľmi dobrú presnosť: +/- 10 cm. Taktiež má dostačujúci dosah: viac ako 200 m. Týmto môžeme povedať, že pre našu aplikáciu bude najvhodnejšia technológia UWB.

3.2 Výber vhodného UWB modulu

V tabuľke 4.1 je prehľad dostupných UWB integrovaných obvodov od rôznych výrobcov. V komerčných produktoch sa používa napríklad integrovaný obvod od firmy NXP SR100T. Konkrétne je integrovaný v najnovšom smartfóne Galaxy Note20 Ultra od firmy Samsung. Taktiež firma Apple vyvinula vlastný UWB integrovaný obvod U1, ktorý zaintegrovali do svojich zariadení iPhone11, Apple Watch 6 a novších. Jednotlivé integrované obvody sa medzi sebou líšia v šírke pásma, v ktorom sú schopné pracovať. Jedným z najpoužívanejších nekomerčným a najdostupnejším UWB integrovaných obvodom je DW1000 od firmy Qorvo.

DW1000 je plne integrovaný jednočipový UWB transceiver kompatibilný so štandardom IEEE802.15.4-2011. Podporuje 6 kanálov so šírkou pásma 500 MHz v pásme medzi 3,5 – 6,5 GHz. Má programovateľný výstupný výkon. Presnosť udávaná výrobcom je 10 cm. Komunikačný dosah je až 290 m pri rýchlosti prenosu dát 110 kbps.

Tab. 3.2: Prehľad dostupných UWB integrovaných obvodov

Výrobca	Názov produktu	Pásmo	Predstavenie
NXP	NCJ29D5	6 – 8,5 GHz	12.11.2019
NXP	SR100T	6 – 9 GHz	17.09.2019
Apple	U1	6 – 8,5 GHz	11.09.2019
Qorvo	DW1000	3,5 – 6,5 GHz	07.11.2013
Qorvo	DW3000	6 – 8,5 GHz	01.01.2019
CEVA	RivieraWaves UWB	3,1 – 10,6 GHz	24.06.2021

3.3 DWM1000 modul

Je bezdrôtový modul schopný obojsmernej komunikácie, ktorý je kompatibilný s IEEE802.15.4-2011. Základom tohto modulu je integrovaný obvod DW1000 od firmy Decawave (Qorvo). Tento modul umožňuje lokalizáciu objektov v reálnom čase s presnosťou 10 cm vo vnútorných priestoroch. Vo vonkajších priestoroch poskytuje dosah až 300 m s presnosťou približne na 1 cm, čo je niekoľkonásobne väčšia presnosť ako pri Bluetooth alebo WiFi.[10]

Výhodou je, že tento modul v sebe integruje samotný UWB integrovaný obvod DW1000, lineárne polarizovanú anténu a obvody na napájanie. Taktiež poskytuje jednoduchú implementáciu so širokou škálou mikrokontrolérov. Modul podporuje rôzne metódy určovania vzdialenosti, ako RSSI, ToA, TDoA, ToF.

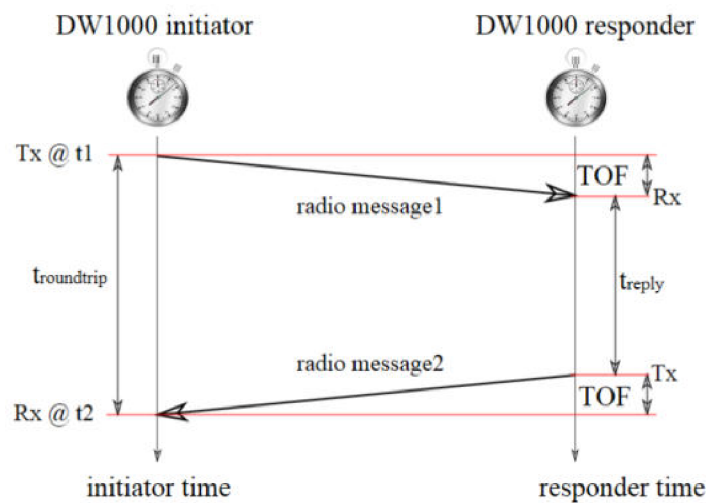
Veľmi malé rozmery modulu sú taktiež kľúčové pre vhodnú implementáciu. Rozmery tohto konkrétneho modulu sú 23 mm x 13 mm x 2,9 mm. Tento modul je možné jednoducho prispájať k inej doske plošného spoja pomocou bočných kontaktov.



Obr. 3.1: UWB modul DWM1000 od firmy Qorvo

3.3.1 Spôsob merania vzdialenosti

Na meranie času letu signálu medzi vysielačom a prijímačom sa využíva metóda, ktorá sa označuje ako TWR (Two-way ranging). Ak využívame páry modulov DWM-1000, kde jeden z nich môžeme označiť ako iniciátor a druhý ako responder, môžeme TWR opísať nasledovne. Iniciátor odošle správu responderovi a zaznamená si čas letu t_1 . Responder po prijatí správy následne odošle odpoveď po určitom čase oneskorenia t_{reply} . Iniciátor následne prijme odpoveď od respondera a zaznamená si čas letu t_2 . Tento celý proces je znázornený na obrázku 3.2. Následne ak poznáme čas letu t_1 a t_2 , iniciátor môže vypočítať čas príchodu signálu pričom nám musí byť známy čas odpovede t_{reply} .



Obr. 3.2: Koncept TWR (Two-way ranging)

Ak poznáme tieto časy, čas letu môže byť vypočítaný podľa:

$$TOF = \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2}$$

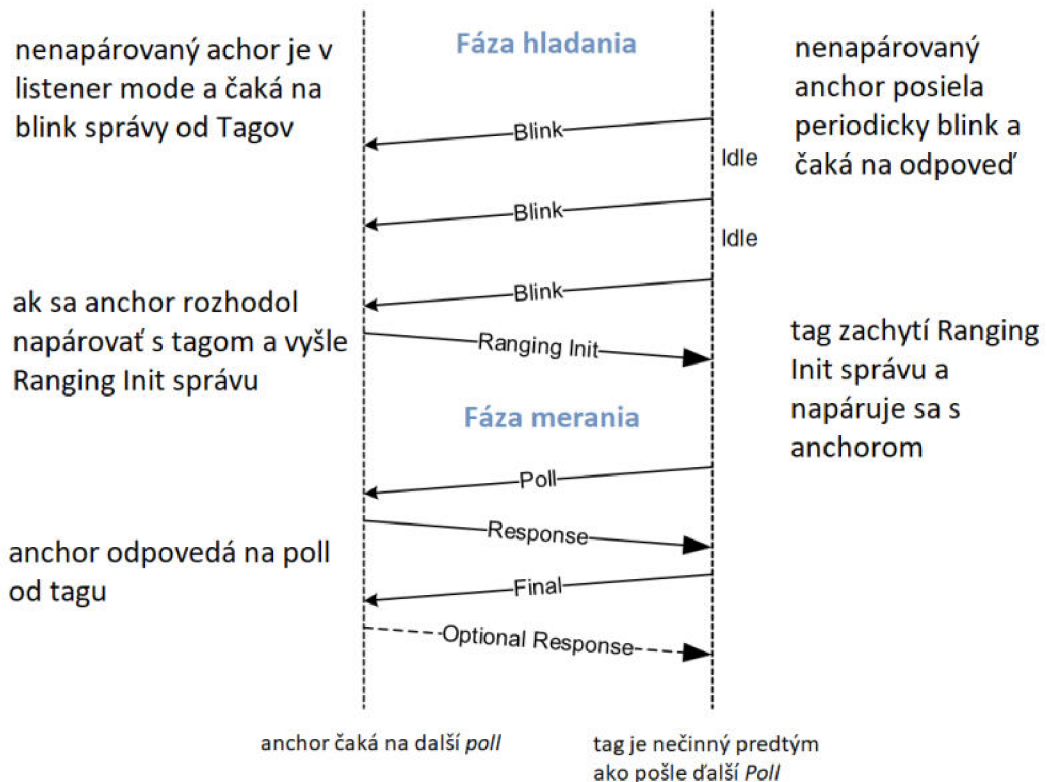
Ak predpokladáme, že rýchlosť šírenia rádiových vln je úmerná rýchlosti svetla c , potom vzdialenosť medzi iniciátorom a reponderom sa dá vypočítať podľa vzorca:

$$vzdialenosť = c * \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2}$$

V prípade obojsmernej komunikácie medzi statickými bodmi (anchors) a tagmi existuje množstvo zdrojov chýb v dôsledku rozdielu času a frekvencií. Avšak v implementácii od firmy Decawave je použitá asymetrická obojsmerná TWR. Táto implementácia znižuje chybu v dôsledku rozdielu času a frekvencie.

Implementácia merania vzdialenosti

Jednotky fungujú medzi sebou ako páry. Jednotka, ktorá nie je statická, vystupuje ako **tag** a inicializuje meranie vzdialenosti s druhými jednotkami, ktoré sú statické body. Tieto body označujeme ako **anchors**, v preklade kotvy. Anchory čakajú na správy od tagov, s ktorými si pomocou TWR vymieňajú vzdialenosti.



Obr. 3.3: Výmena správ vo fáze hľadania a merania

Fáza hľadania

Vo fáze hľadania tag pravidelne vysiela blink správy, ktoré obsahujú jeho adresu. Čakajú na odpoveď Ranging Init od anchoru. Keď tag nedostane odpoveď, čaká určitý čas predtým, ako vyšle znova blink. Anchor funguje prakticky presne opačne. Čaká na blink správu od tagu. V prípade, že zachytí blink správu, anchor vyšle Ranging Init správu do tagu. Týmto je ukončená fáza hľadania a vstúpi do fázy merania.

Fáza merania

V tejto fáze si tag periodicky vymieňa TWR správy s anchormi. Každá TWR výmena správ pozostáva z vyslania **Poll** správy tagom. Následne anchor odpovedá **Response** správou. Tag opäťovne odpovedá **Final** správou, na ktorú v prípade, že je to potrebné, anchor opäťovne odpovedá. Výmena správ je graficky znázornená na obrázku 3.3. [11]

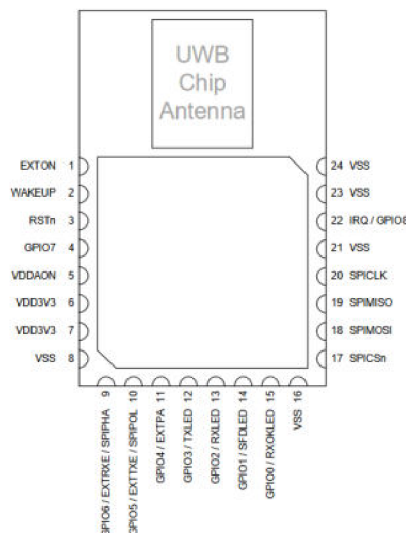
3.3.2 Knižnica DW1000

Ponúka funkcie na použitie s čipmi/modulmi DW1000. Podporuje prenos správ, manipuláciu s časovými značkami, implementuje rôzne prevádzkové režimy, ktoré ponúka. Knižnica poskytuje ľahko použiteľné rozhranie pre inak zložité a časovo náročné ovládanie DW1000.

Súčasťou tejto knižnice je taktiež trieda **DWMRanging**, pomocou ktorej sme schopní jednoducho inicializovať komunikáciu s UWB modulom. Taktiež umožňuje nastaviť, v akom režime bude UWB modul pracovať. Teda či bude Anchor alebo bude Tag. Ďalej ponúka nastavenie adresy a módu, v ktorom bude pracovať. [10]

3.3.3 Zapojenie modulu DWM1000

Modul je potrebné k mikrokotroléru pripojiť pomocou SPI zberbnice, pretože napájacie napätie modulu 3,3 V aj riadiace signály musia byť na tejto úrovni. Ďalej je potrebné pripojiť RSTn (Reset) a IRQ (Interrupt Request). Na obrázku 3.4 sú opísané výstupné piny modulu DWM1000.



Obr. 3.4: Výstupné piny modulu DWM1000

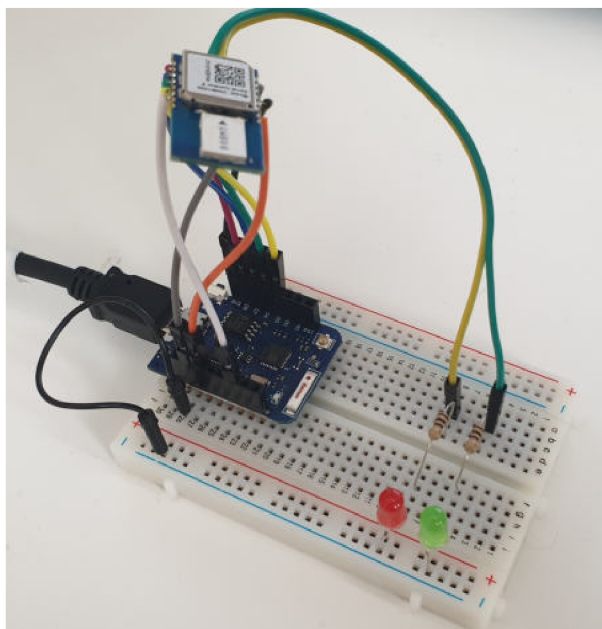
3.4 Výber vhodného mikrokontroléra

Použitie mikrokontroléra z rodiny ESP umožňuje jednoduché pripojenie modulu bez nutnosti použitia meničov logickej úrovne. Bolo by možné taktiež použiť napr. mikrokontrolér z rodiny AVR Atmega328, známy z vývojových kitov Arduino. Avšak tieto procesory majú niekoľkonásobne nižšiu frekvenciu procesora v porovnaní s ESP. Taktiež majú niekoľkonásobne väčšiu spotrebu elektrickej energie.

Všetky ESP vývojové dosky majú vstavaný 3,3 V regulátor napätia. To umožňuje jednoducho napájať mikrokontrolér aj UWB modul cez mikro-usb konektor, prípadne nejakým externým napájaním. Z rodiny mikrokontrolérov ESP sú najdostupnejšie ESP8266 a ESP32S. Veľmi obľúbenou a dostupnou vývojovou doskou je WeMos D1 mini s mikrokontrolérom ESP8266. K tejto vývojovej doske je dostupné veľké množstvo schém. Malé rozmery tejto vývojovej dosky sú taktiež výhodou.

3.4.1 Skúšobné zapojenie DWM1000 s mikrokontrolérom ESP

V rámci testovania som použil dva typy mikrokontrolérov z rodiny ESP, a to ESP8266 a ESP32S. Modul DWM1000 disponuje GPIO (General-purpose input/output) pinmi, ktoré je možné konfigurovať. Piny GPIO2 a GPIO3 je možné nakonfigurovať tak, aby signalizovali činnosť modulu, a to vysielanie (TX) a prijímanie (RX). Na obrázku 3.5 je zapojenie DWM1000 s doskou Wemos D1 mini, ktorá má mikrokontrolér ESP8266.



Obr. 3.5: Skúšobné zapojenie modulu DWM1000 s ESP8266

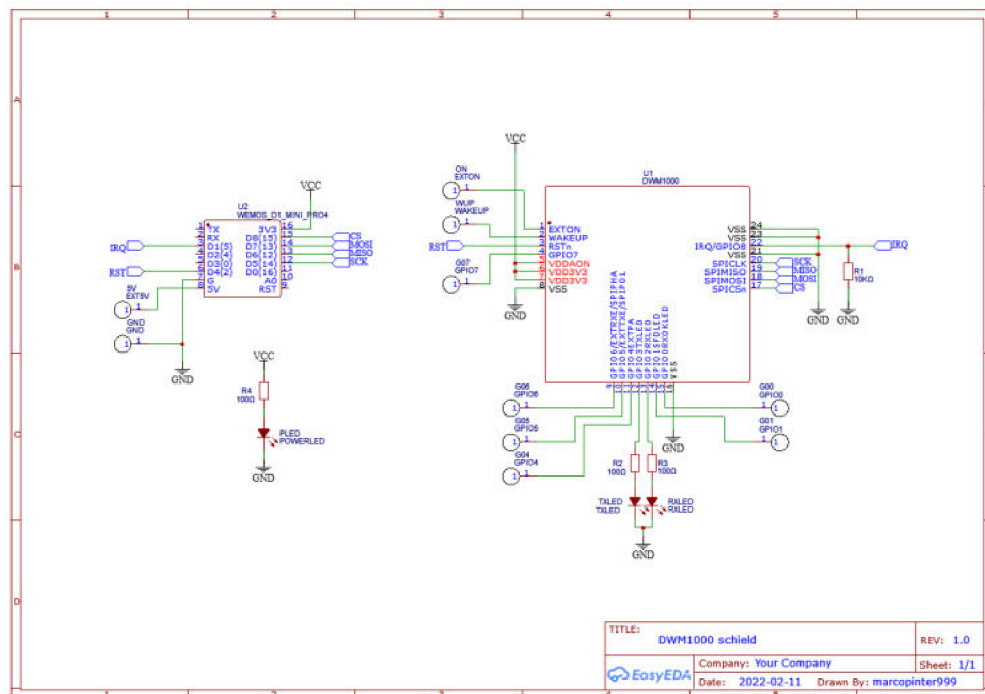
Po odskúšaní som sa rozhodol, že pre statické body (anchory) použijem vývojové dosky Wedos D1 mini. Ako už bolo spomenuté, má malé rozmery a taktiež je dostupné veľké množstvo schieldov. Jedným z dostupných schieldov je napr. WeMos Battery schield. Súčasťou tohto schieldu je integrovaný obvod TP5410, ktorý slúži na nabíjanie jednočlánkovej LiPol batérie cez mikro-USB konektor, prípadne z externého zdroja napájania. Táto batéria potom slúži ako napájanie pre ESP dosku.

3.5 Schield s modulom DWM1000

Na tvorbu schémy zapojenia som využil cloudový CAD nástroj na návrh a dizajn plošných spojov EasyEDA. Pri tvorbe schémy som využil dostupné knižnice pre WeMos D1 Mini a UWB modul DWM1000.

3.5.1 Schéma zapojenia

UWB modul je pripojený k mikrokontroléru tak, ako sa píše v odseku 3.3.3. Na schield som pridal LED diódy signalizujúce vysielanie a prijímanie modulu DWM1000. Taktiež som pridal LED diódu, ktorá signalizuje zapojenie napájania modulu. Nepoužitú piny modulu som vyviedol na spájkovacie plošky. Výsledná schéma zapojenia je na obrázku 3.6.



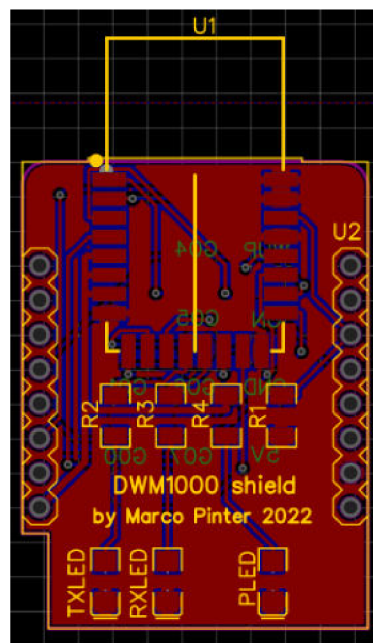
Obr. 3.6: Schéma zapojenia schieldu

3.5.2 Návrh dosky plošného spoja

Po návrhu schémy zapojenia nasleduje návrh dosky plošného spoja.

Rozmiestnenie súčiastok

Súčiastky som rozmiestnil podľa funkcionality. Tvar dosky plošného spoja presne zodpovedá tvaru dosky WeMos D1 Mini, tak ako pri väčšine dostupných shieldov. Hlavnou súčasťou schieldu je UWB modul, ktorý je potrebné umiestniť podľa zásad udávaných výrobcom. Anténu UWB modulu je potrebné umiestniť tak, aby nedochádzalo k rušeniu. Čiže je potrebné umiestniť modul tak, aby anténa presahovala okraj plošného spoja. Na spodnú časť som umiestnil LED diódy signalizujúce vysielanie a prijímanie UWB modulu a LED diódu signalizujúcu napájanie. Výsledný layout dosky je zobrazený na obrázkoch číslo 3.7 a 3.8.

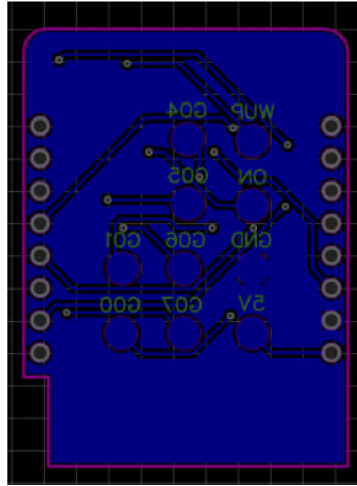


Obr. 3.7: Layout schieldu, horná vrstva

Výrobné parametre

Zvolil som dvojvrstvovú dosku plošného spoja, pretože je plne dostačujúca pre našu aplikáciu. Minimálna šírka medzi vodičmi, prekovmi a padmi je 0,15 mm. Šírka ciest pre napájanie je 0,5 mm a pre signály 0,25 mm. Hrúbku dosky som zvolil 1,5 mm.

Dosky som dal vyrobiť firmou JLCPCB. Na výrobu je potrebné dodať vygenerované súbory na výrobu z CAD softvéru EasyEDA v Gerber formáte.



Obr. 3.8: Layout schieldu, spodná vrstva

Osadenie súčiastok

Po výrobe dosky plošného spoja nasledovalo osadenie súčiastkami. Na spájkovanie som použil mikrospájkovačku. Ako prvé som naspájkoval rezistory a LED diódy. Následne som k doske prispájkoval UWB modul. Ako posledné som spájkoval headre. Použil som takzvané „stacking shield headre“, čiže headre, ktoré je možné skladať nad seba. Osadený shield je na obrázku 3.9.



Obr. 3.9: Hotový shield

3.6 Napájanie statických bodov

Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.4.1, pre dosku WeMos D1 mini je dostupné veľké množstvo shieldov. Jedným z nich je Battery shield. Jeho súčasťou je integrovaný obvod TP5410, ktorý slúži jednak na zabezpečenie stabilizovaného 5 V napájania pre ESP dosku, jednak na nabíjanie jednočlánkovej LiPol batérie. Nabíjanie je možné cez micro-USB port, ktorý je súčasťou shieldu. Na shielde sú taktiež umiestnené LED diódy signalizujúce nabitie a vybitie batérie.



Obr. 3.10: Battery shield

LiPol články som použil zo starej batérie, ktorú som mal doma. Išlo o trojčlánkovú LiPol batériu s kapacitou 1000 mAh. Túto batériu som rozobral na jednotlivé články. Pre každú batériu som vytlačil na 3D tlačiarňi kryt. Ku každej batérii som doplnil vypínač a konektor, pomocou ktorého je možné ju pripojiť k Battery shieldu. Hotová batéria je na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Batéria

3.7 Finálna podoba hardvéru

V tejto kapitole je znázornená finálna podoba hardvéru statických bodov a tagu.

3.7.1 Statické body

Spojením jednotlivých shieldov a ESP dosky WeMos D1 mini vznikla finálna podoba statického bodu, ktorú môžeme vidieť na obrázku 3.12. Na obrázku 3.13 je hotový statický bod vrátane batérie a stojanu.



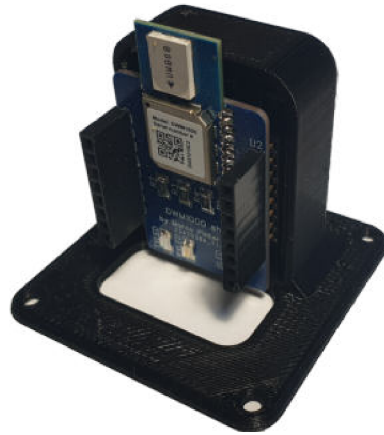
Obr. 3.12: Finálna podoba statického bodu



Obr. 3.13: Finálna podoba statického bodu

3.7.2 Tag

Hardvér tagu je prakticky identický s hardvérom statických bodov s tým rozdielom, že neobsahuje battery shield, pretože bude napájaný priamo cez USB port ESP dosky. Aby bolo možné prichytiť ESP dosku so shieldom k dronu, bol navrhnutý držiak, ktorý je možné pripevniť k montáži na drone. Na obrázkoch 3.14 a 3.15 je hotový tag vrátane montáže umiestnený na drone.



Obr. 3.14: Finálna podoba tagu



Obr. 3.15: Tag umiestnený na drone

3.8 Možný koncept tagu

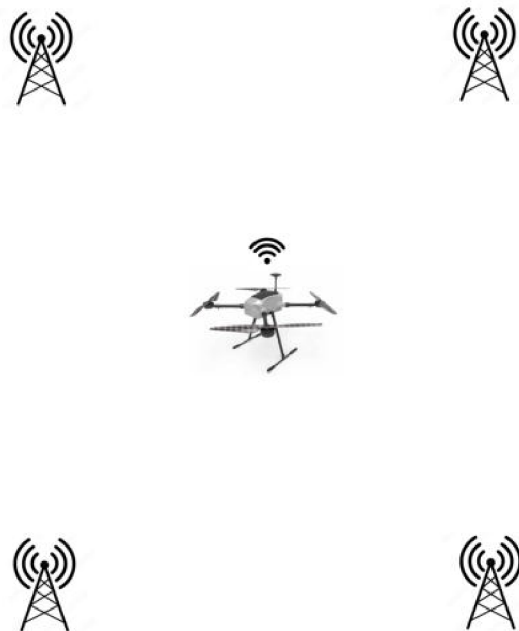
Vzhľadom na pozorovania, ktoré sú opísané v kapitole 4.7, sa môžeme zamýšľať nad konceptom tagu, ktorého súčasťou by boli napr. 4 moduly, ktoré by nezávisle od seba merali vzdialenosť medzi jednotlivými statickými bodmi a tagom. Toto riešenie by mohlo zvýšiť spoľahlivosť systému, pretože by každý modul komunikoval len s jedným statickým bodom. Avšak toto riešenie je značne hardvérovo náročnejšie v porovnaní s použitím jedného modulu.

4 Návrh metódy lokalizácie

V tejto kapitole sa oboznámime s výberom vhodného počtu UWB modulov a spôsobom, ako budeme určovať vzdialenosť medzi prijímačom a jednotlivými vysielačmi.

4.1 Výber počtu UWB modulov

Na základe trilaterácie môžeme povedať, že bude potrebné použiť minimálne tri zdroje signálu plus jeden, ktorý by slúžil ako prijímač na drone. Vo všeobecnosti je známe, že pokiaľ chceme dosiahnuť vyššiu presnosť, potrebujeme vyšší počet zdrojov signálu. Tak ako napr. pri GPS, kde je potrebné na určenie polohy minimálne tri satelity, ale presnosť pri tomto počte je rádovo v desiatkách metroch. Na dosiahnutie presnosti rádovo v metroch je potrebné desať a viac satelitov. V rámci tejto práce sa uvažuje maximálna plocha, na ktorej sa bude testovať, vo veľkosti obdĺžnika s približnými rozmermi 10 m x 5 m. Pôvodne sme uvažovali nad použitím šiestich modulov, v každom rohu jeden a na dlhšej strane ešte dva medzi. Avšak nakoniec sme sa rozhodli, že štyri moduly v každom rohu na danú vzdialenosť budú poskytovať dostatočnú presnosť. Na drone bude jeden UWB modul, ktorý bude prijímať signály zo všetkých vysielačov.



Obr. 4.1: Nákres možného rozmiestnenia UWB modulov

4.2 Výber metódy určovania vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom

S technológiou UWB je možné prakticky použiť všetky dostupné metódy na určovanie vzdialenosti. Najjednoduchšou na implementáciu je metóda RSSI, avšak podľa teórie by nemala byť najvhodnejšia, pretože môže dôjsť k ovplyvňovaniu meraných dát medzi jednotlivými kanálmi.

Metóda AoA by si vyžadovala úpravu hardvéru, teda konkrétne antén, čo by časovo a finančne značne predražilo vývoj. Avšak pri použití tejto metódy by teoreticky stačil menší počet vysielacích modulov.

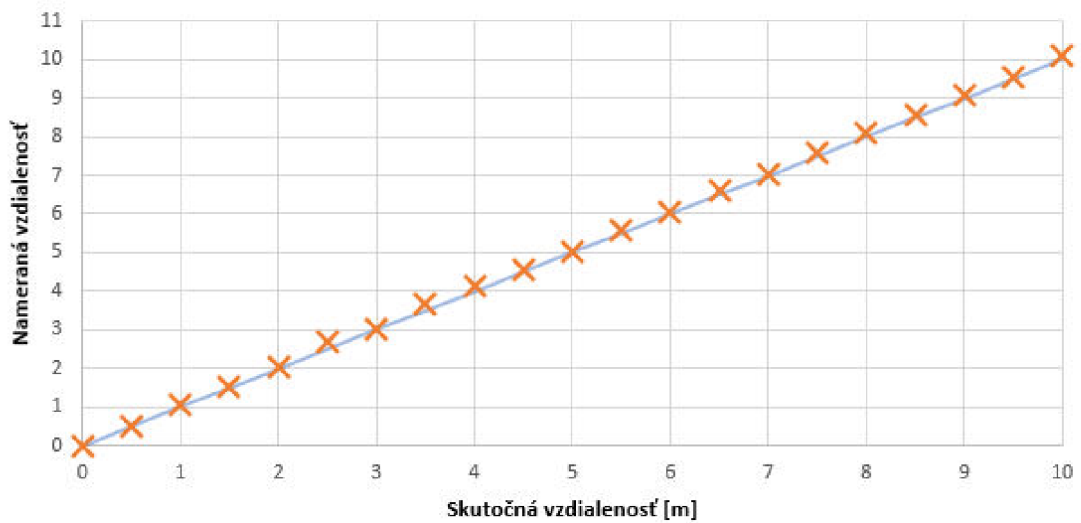
Metóda FingerPrint positioning, ktorá využíva mapu nameraných bodov na určenie polohy, by dosahovala vysokú presnosť. Avšak vyžaduje si veľmi náročnú a zdĺhavú prípravu databázy bodov, podľa ktorej dochádza k výpočtu polohy. Problémom tejto metódy je, že pri premiestnení systému na iné miesto, prípadne zmeny vzdialenosti medzi jednotlivými vysielateľmi je potrebné zakaždým vytvoriť novú databázu.

Najvhodnejšou metódou je ToF, ToA alebo TDoA, teda metódy založené na meraní času. Tieto metódy si nevyžadujú žiadnu úpravu hardvéru ani nejakú databázu meraných bodov na určovanie polohy. Tieto metódy si vyžadujú iba synchronizáciu času medzi jednotlivými modulmi. Tento problém je však vyriešený v knižnici, ktorá je dostupná k modulu DWM1000. Podľa teórie by mala táto metóda dosahovať vyššiu presnosť ako RSSI. Konkrétne budem využívať metódu Two-way ranging, ktorá je založená na metóde ToF. Metóda Two-way ranging je opísaná v kapitole 3.3.1.

4.3 Meranie vzdialenosti medzi dvoma bodmi

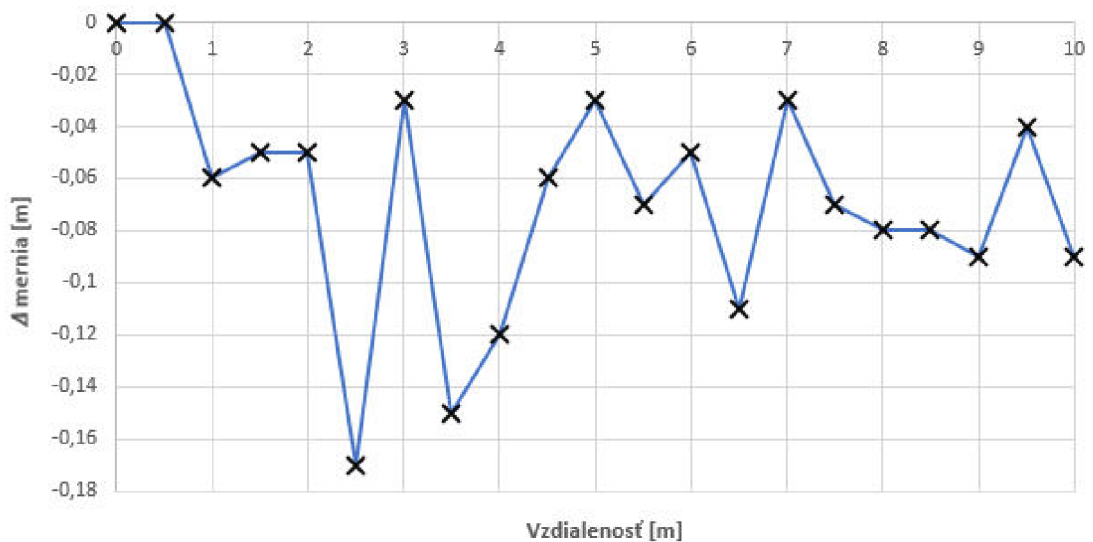
Po skompletovaní hardvéru a otestovaní správneho zapojenia UWB modulov k ESP doske sme sa rozhodli overiť presnosť merania vzdialenosti s UWB modulmi. Pri meraní sme mohli pozorovať, že pri priblížení modulov k sebe bolo možné stále vidieť nejakú meranú vzdialenosť (offset). Napr. pri meraní, ktoré je znázornené na grafe 4.2, bol offset 0,55 m. Avšak napr. pri meraní na stole bol offset 0,3 m. Offset sa mení v závislosti od prostredia, v ktorom sa vykonáva meranie. Toto meranie bolo vykonané na voľnom priestranstve v rozsahu 0 až 10 metrov s krokom 0,5 m. Ako referenčné meradlo bol použitý navíjací meter. Namerané hodnoty sú zobrazené na grafe 4.2 voči ideálnej lineárnej charakteristike merania vzdialenosti medzi dvoma bodmi. Ako môžeme pozorovať z grafu, presnosť merania na danom rozsahu je dosť vysoká. V grafe 4.3 je zobrazený priebeh absolútnej chyby merania vzdialenosti medzi dvoma bodmi. Maximálna nameraná absolútna chyba bola 17 cm. V priemere

bola absolútna chyba merania rovná 7 cm. Meranie mohlo byť ovplyvnené zvoleným referenčným meradlom.



Obr. 4.2: Namerané hodnoty vzdialenosti medzi dvoma bodmi

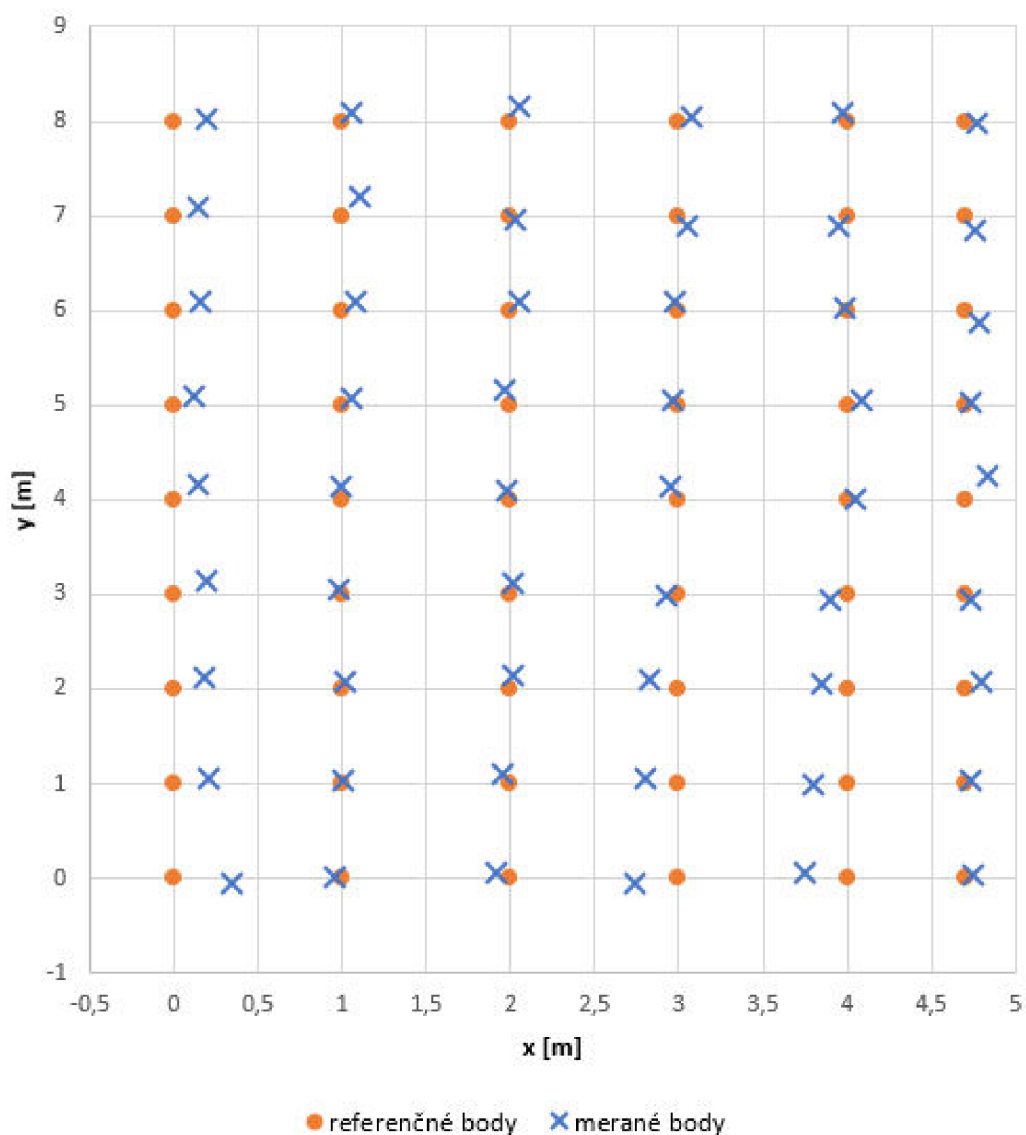
Na základe tohto merania sme si overili presnosť merania medzi dvoma bodmi. Môžeme povedať, že dosahujeme presnosť merania, ktorá je charakteristická pre danú technológiu.



Obr. 4.3: Priebeh absolútnej chyby merania vzdialenosti medzi dvoma bodmi

4.4 Meranie určovania polohy v priestore

Počas tohto merania sme sa snažili overiť funkčnosť a presnosť určovania polohy v priestore. Meranie bolo vykonané na záhrade, kde boli vysielače umiestnené na rohoch trávinatej plochy s rozmermi približne 5 x 10 metrov. V tabuľke 4.1 sú údaje súradníc, na ktorých boli umiestnené UWB moduly. Počas merania sme postupne zaznamenávali určenú polohu voči referenčným bodom. Namerané hodnoty určenej polohy a referenčné body sú znázornené na grafe 4.4. Ako môžeme vidieť v okolí súradnice 0,0, je zdanlivá chyba. Táto chyba bola pravdepodobne spôsobená buď nepresným umiestnením statického bodu alebo zvoleným offsetom.

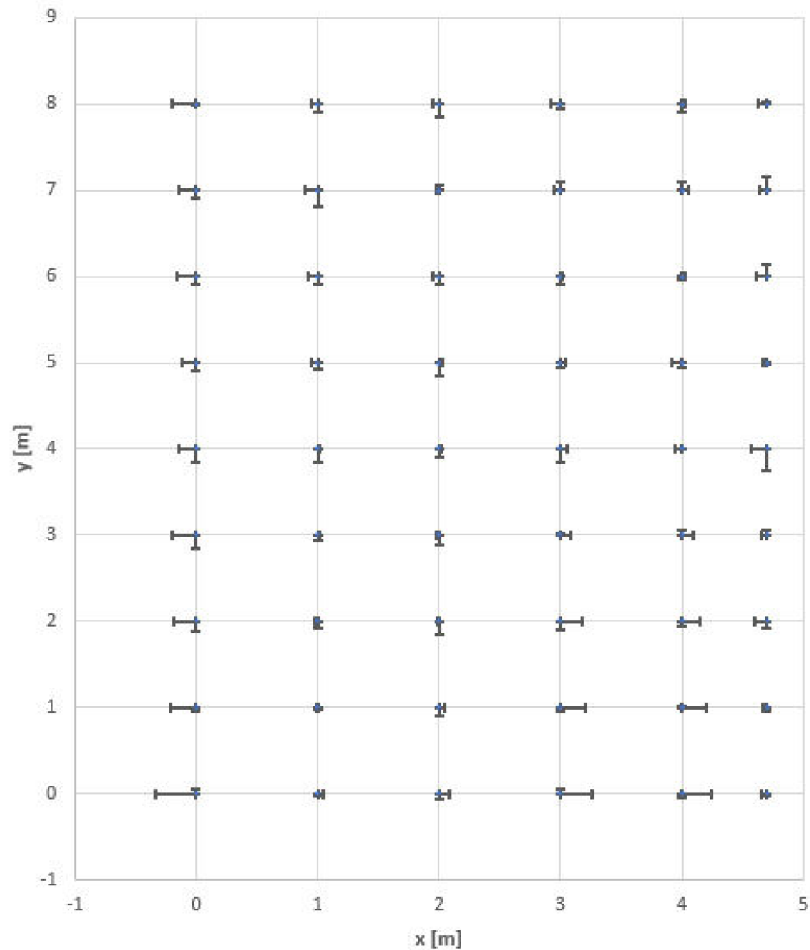


Obr. 4.4: Meranie určovania polohy v priestore

Chyba sa prejavuje hlavne v blízkosti statických bodov, kde dochádza k skresleniu tak ako môžeme vidieť napr. na obrázku 4.8. Maximálna absolútna chyba merania v ose x bola 34 cm a v ose y bola 25 cm. Priemerná absolútna chyba merania v ose x bola 9 cm a v ose y bola 8,2 cm. Počas experimentu boli statické body položené na zemi. V budúcnosti by bolo vhodné statické body umiestniť do určitej výšky, nakoľko umiestnenie na zemi mohlo spôsobovať určité problémy.

Tab. 4.1: Súradnice umiestnenie UWB modulov

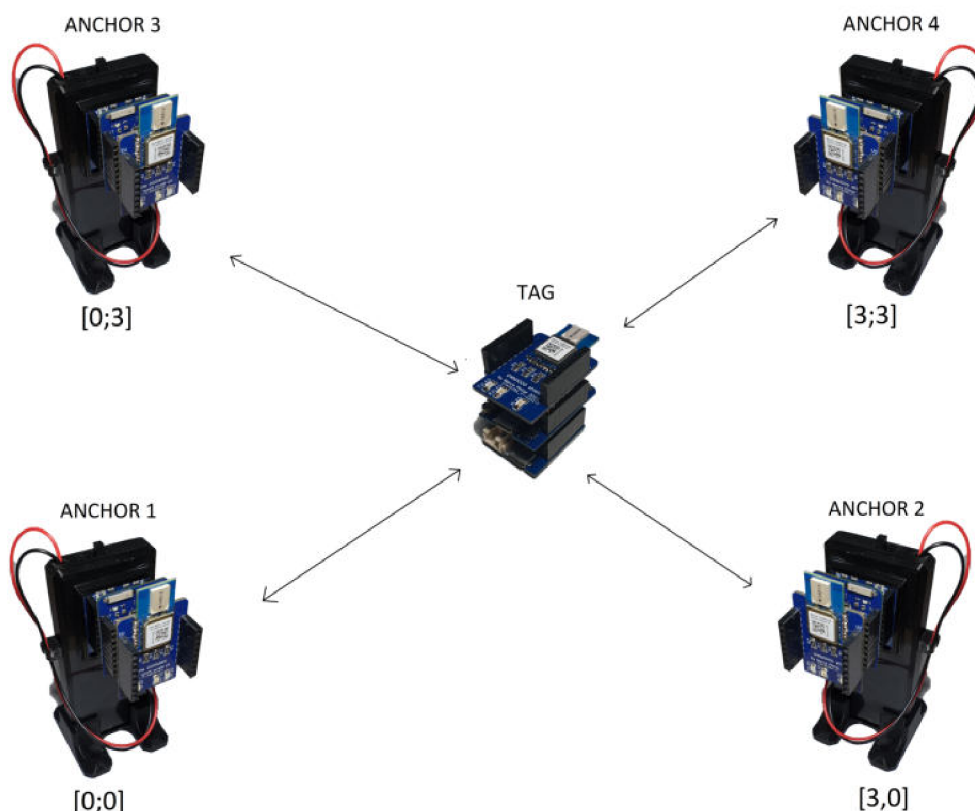
	x [m]	y [m]
1	0,0	0,0
2	0,0	8,6
3	4,7	8,6
4	0,0	4,7



Obr. 4.5: Absolútna chyba určovania polohy v priestore

4.5 Rozmiestnenie UWB modulov

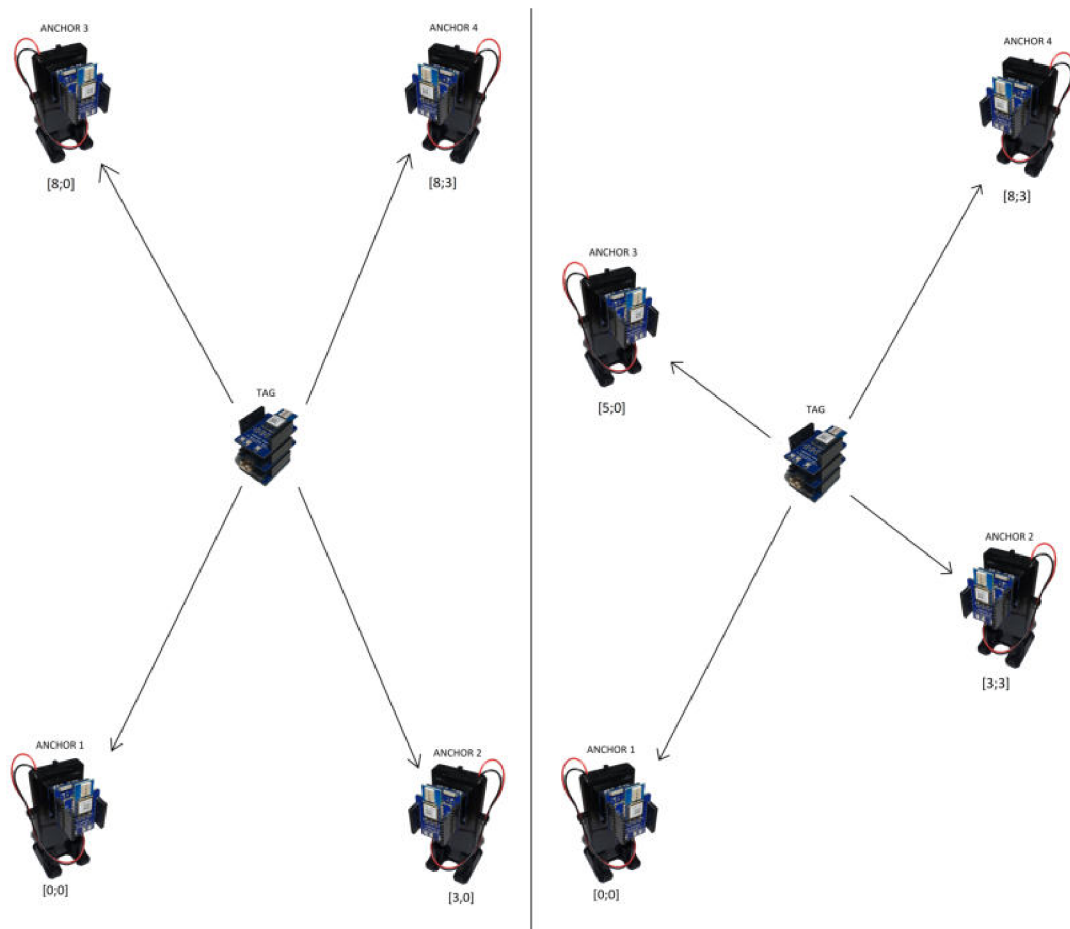
Ako prvé je potrebné určiť, na akej ploche plánujeme určovať polohu. Či pôjde o štvorcovú alebo obdĺžnikú plochu. Pri štvorcovej, pokiaľ nejde o nejakú väčšiu plochu, pri ktorej by bolo potrebné použiť viac ako 4 vysieláče, bude jednoznačne najlepšou voľbou umiestniť vysieláče do rohov plochy. Možné rozmiestnenie na štvorcovej ploche je znázornené na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Rozmiestnenie modulov na štvorcovej ploche

Pri obdĺžnikových plochách môžeme začať uvažovať takiež na rozmiestnením do trojuholníka. Toto umiestnenie nám zmenší merané vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom pri väčších obdĺžnikových plochách. Samozrejme, pri menších obdĺžnikových plochách rozdiel medzi umiestnením v rohoch a do trojuholníka nebude až taký veľký. Avšak pri väčších plochách rozdiel bude väčší, čo môže viesť k lepším výsledkom určovania polohy. Vo všeobecnosti by sme sa mali snažiť udržiavať čo najmenšie vzdialenosti medzi vysielateľmi a prijímačom, pokiaľ je to možné. Na obrázku 4.7 je znázornené porovnanie rozloženia modulov na obdĺžnikovej ploche. Na ľavej strane sú moduly umiestnené v rohoch, na pravej strane sú rozmiesnené do

trojuholníka. Na prvý pohľad je zrejmé, že pri väčšej ploche je výhodnejšie použiť rozloženie do trojuholníka. Ako môžeme vidieť na obrázku, vzdialenosti medzi vysielačmi a prijímačom sú omnoho menšie.



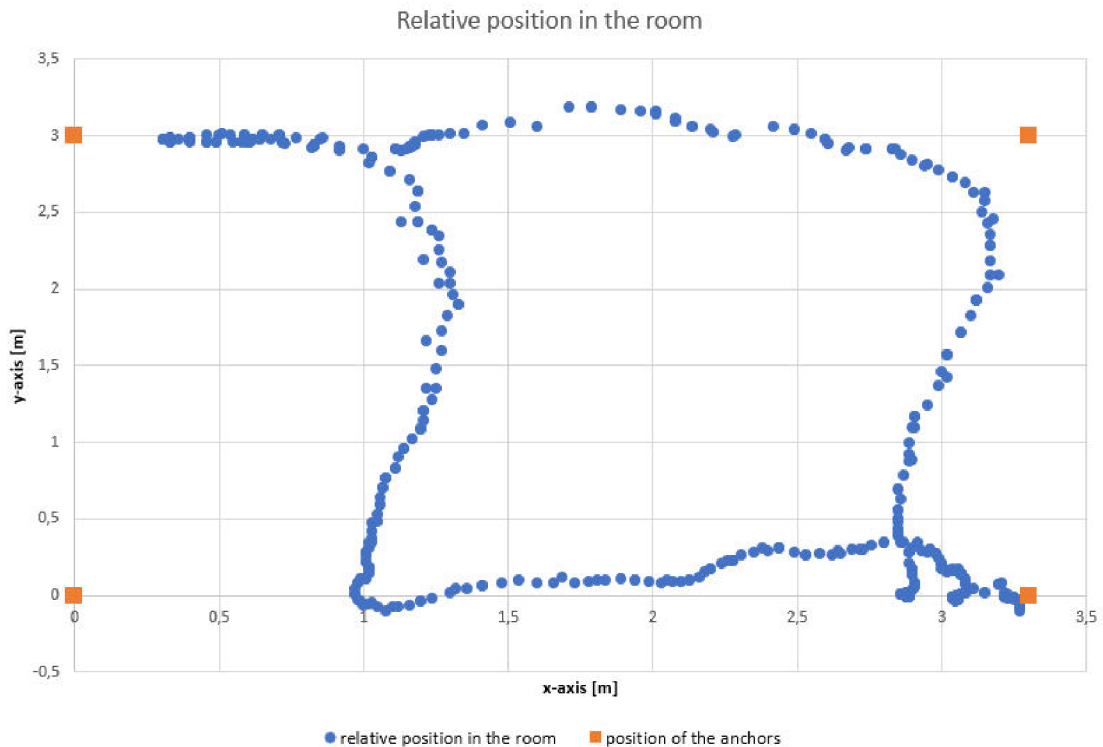
Obr. 4.7: Možné rozmiestnenie modulov na obdĺžnikovej ploche

Samozrejme, pri väčších plochách je potrebné použiť väčšie množstvo statických bodov na dosiahnutie pokrytia celej plochy.

4.6 Prvé testy určovania polohy

V rámci prvých testov som sa snažil určovať polohu v priestore izby s rozmermi približne 3 x 3,5 m. Počas testu som chodil po miestnosti a zaznamenával som určenú polohu v priestore. Následne som výsledky spracoval a graficky vykreslil pomocou programu Excel. V grafe je znázornená taktiež poloha všetkých vysielačov. Počas testu som sa snažil chodiť s prijímačom do štvorca. Na grafe 4.8 je viditeľný pohyb po miestnosti v štvorci. V osi x dochádzalo k miernemu zagulateniu trajektórie,

ktoré bolo spôsobené nepresným určením polohy vysielača v ľavom hornom rohu. Taktiež na grafe môžeme pozorovať, že som sa snažil priblížiť k ľavému hornému rohu miestnosti.



Obr. 4.8: Vizualizované zaznamenané určenej polohy

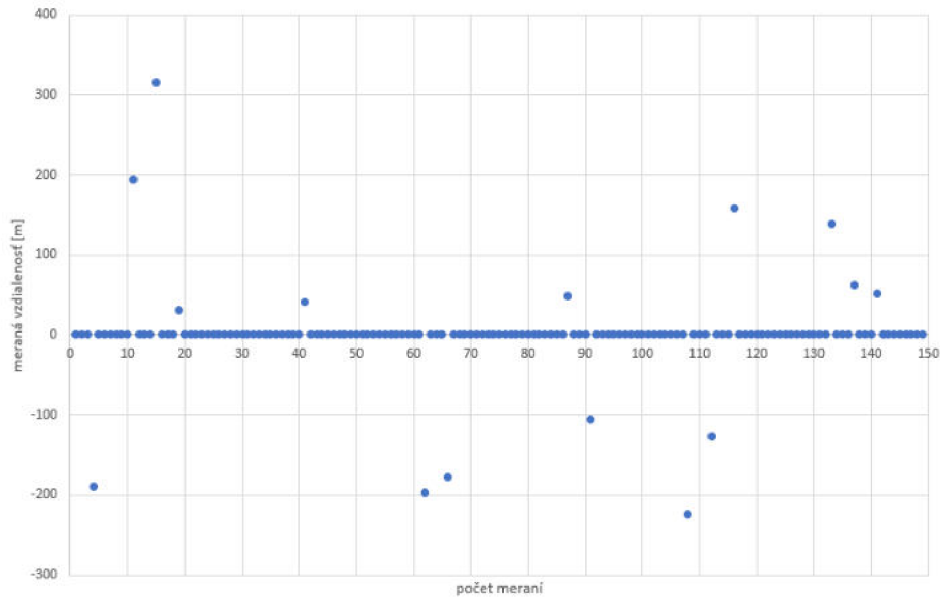
4.7 Pozorovanie počas testovania

V tejto kapitole sú opísané spozorované chyby, ku ktorým dochádza počas merania.

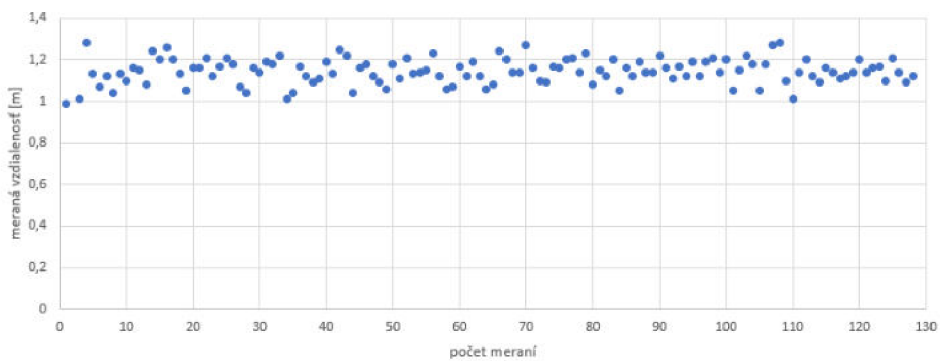
4.7.1 Meranie nepravdivej vzdialenosti

V rámci testovania som spozoroval, že pri meraní vzdialenosti z väčšieho počtu vysielačov dochádza k občasnému meraniu nesprávnych hodnôt v nepravidelných intervaloch. Táto chyba sa vyskytuje spravidla vždy na vysielačoch, ktoré sa pripoja v treťom a vyššom poradí. Merané hodnoty chybné vzdialenosti často dosahujú taktiež záporné hodnoty. Chyba sa vyskytuje pri meraní menších vzdialeností ako 2 metre. Túto chybu je možné odstrániť jednoduchým filtrom, ktorý bude ignorovať vyššie nezmyselne vysoké hodnoty a záporné hodnoty. Na obrázku 4.9 môžeme vidieť meraní vzdialenosť z tretieho pripojeného vysielača. Môžeme pozorovať, že v

nepravdivých intervaloch dochádza k nesprávnemu meraniu vzdialenosti. Na obrázku 4.10 sú merané dáta s aplikovaným jednoduchým filtrom. Ako môžeme vidieť, už nedochádza k záporným a nepravdivým vysokým hodnotám. Toto riešenie chybu potlačí, avšak chybu neodstráni. Chyba je pravdepodobne spôsobená desynchronizáciou pri prijímaní správ z väčšieho počtu zdrojov pri meraní malých vzdialeností, kde dochádza k vyššej frekvencii výmeny dát, keďže je vzdialenosť malá. Pri väčších vzdialenostiach sa táto chyba neprejavuje.



Obr. 4.9: Merané dáta 3. vysielaču



Obr. 4.10: Merané dáta 3. vysielaču s aplikovaným filtrom

4.7.2 Odpájanie modulov

Počas testovania som taktiež pozoroval, za akých okolností dochádza k odpojeniu modulu. Jednak to môže byť spôsobené vyjdením z dosahu, prípadne nejakou prekážkou medzi vysielačom a prijímačom. Po preštudovaní knižnice DWM1000 som zistil, že odpojenie je implementované tak, že pokiaľ nedôjde k výmene dát do času, ktorý je označený ako **inactive time**, dôjde k odpojeniu. Predvolené nastavenie **inactive time** je 1000 ms. Pri určovaní relatívnej polohy s väčším počtom vysielačov často dochádzalo k odpájaniu modulov, a tak som hodnotu **inactive time** upravil na hodnotu 5000 ms.

5 Komunikácia a spracovanie dát

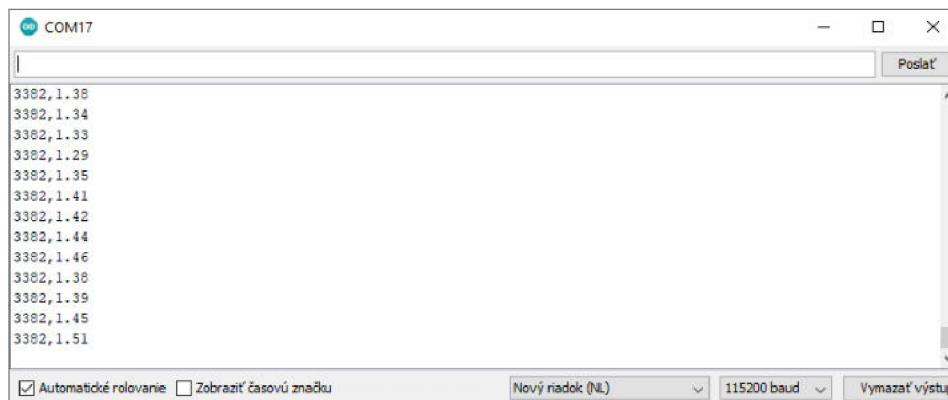
V tejto kapitole je opísaná komunikácia medzi vývojovou doskou Nvidia Jetson Nano, UWB tagom a letovým kontrolérom PixHawk.

5.1 Komunikácia medzi UWB tagom a Nvidia Jetson

Vývojová doska Nvidia Jetson Nano disponuje širokým spektrom komunikačných zberníc. Vývojová doska WeMos D1 má vstavaný USB seriový prevodník, pomocou ktorého sa programuje. Po zvážení všetkých možností sme sa rozhodli použiť USB sériovú komunikáciu medzi UWB tagom a doskou Nvidia Jetson. Toto riešenie nám taktiež vyrieši problém s napájaním UWB tagu.

5.1.1 Forma správy

Správa vyslaná z UWB tagu obsahuje identifikačný znak statického bodu, od ktorého bola zameraná vzdialenosť, a nameranú vzdialenosť medzi tagom a statickým bodom. Aby bolo následne pri spracovaní možné poslané hodnoty opätovne rozdeliť, hodnoty sú oddelené oddelovacím znakom. Na obrázku 5.1 je zobrazený výstup z UWB tagu. Môžeme tam vidieť identifikačný znak statického bodu a meranú vzdialenosť oddelenú čiarkami.



Obr. 5.1: Príklad vyslanej správy z UWB tagu

5.1.2 Spracovanie a zdieľanie dát pomocou ROS topicu

Zachytené dáta obsahujúce identifikačný kľúč a nameranú vzdialenosť z UWB tagu sú rozdelené na jednotlivé zložky. Na zdieľanie dát vrámci ROS-u bol vytvorený

topic s názvom **uwb data topic**, ktorý obsahuje správu formátu **uwb data**. Obsahom tejto správy sú identifikačné znaky jednotlivých statických bodov, namerané vzdialenosti a časová pečiatka. Takto zdieľané údaje si môžeme následne odoberať v inom kóde na ďalšie spracovanie. Na obrázku 5.2 môžeme vidieť príklad správy s nameranými vzdialenosťami z jednotlivých statických bodov.

```
destination_id: [1182, 2228, 3382, 4482]
distance: [330.0, 400.0, 490.0, 210.0]
stamp:
-
secs:1652285092
nsecs:992011070
-
secs:1652285092
nsecs:992372989
-
secs:1652285092
nsecs:992594957
```

Obr. 5.2: Príklad uwb data topic správy v ROS-e

Z prijatých správ z UWB tagu sa hľadajú páry identifikačných kľúčov. Pri zhode identifikačných kľúčov sa priradí nameraná vzdialenosť k príslušnému identifikačnému kľúču. V prípade, že nie sú k dispozícii dáta, hodnota meranej vzdialenosti bude 9999.

5.2 Výpočet relatívnej polohy v priestore

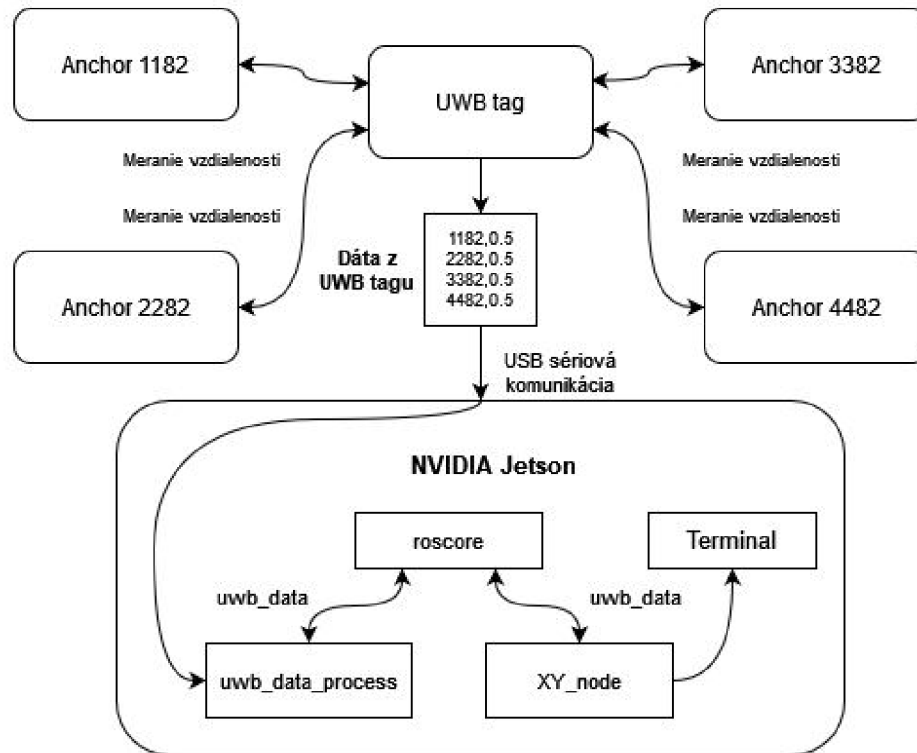
Na základe nameraných hodnôt vzdialenosti medzi statickými bodmi a tagom sme schopní určiť relatívnu polohu v priestore. Na výpočet relatívnej polohy bol použitý trilaterálny algoritmus. Výpočet polohy je pripojený k ROS-u uzlom **XY node**. Tento uzol odoberá **uwb data topic**, ktorý obsahuje namerané vzdialenosti. Výpočítanú polohu môžeme sledovať napr. pomocou konzolového výstupu. Na obrázku 5.3 je zobrazený konzolový výstup.

```
Anchor 0 : 3167.24, Anchor 1 : 1128.47, Anchor 2 : 4127.43, Anchor 3 : 2871.58,
Computed position -> x: -1.56393 y: 0.875531
Anchor 0 : 3124.52, Anchor 1 : 1134.78, Anchor 2 : 4061.28, Anchor 3 : 2880.93,
Computed position -> x: -1.51337 y: 0.841423
Anchor 0 : 3150.47, Anchor 1 : 1121.79, Anchor 2 : 4078.57, Anchor 3 : 2889.69,
Computed position -> x: -1.54769 y: 0.838656
Anchor 0 : 3135.77, Anchor 1 : 1122.93, Anchor 2 : 4083.13, Anchor 3 : 2877.1,
Computed position -> x: -1.53073 y: 0.854857
Anchor 0 : 3130.5, Anchor 1 : 1137.65, Anchor 2 : 4089.08, Anchor 3 : 2878.33,
Computed position -> x: -1.51889 y: 0.865065
```

Obr. 5.3: Výstup vypočítanej relatívnej polohy

5.3 Štruktúra výmeny dát

Na obrázku 5.4 je zobrazený blokový diagram výmeny a spracovania dát. Výstupom UWB tagu sú namerané vzdialenosti od jednotlivých statických bodov. Ako je bližšie opísané v kapitole 5.5, UWB tag je prepojený s doskou Nvidia Jetson pomocou USB sériovej komunikácie. Tieto prijaté dáta sú spracované pomocou ROS nodu **uwb_data_process**. Výsledná relatívna poloha v priestore je vypočítaná pomocou ROS nodu **XY_node**. Výsledná vypočítaná poloha je vypísaná do terminálu.



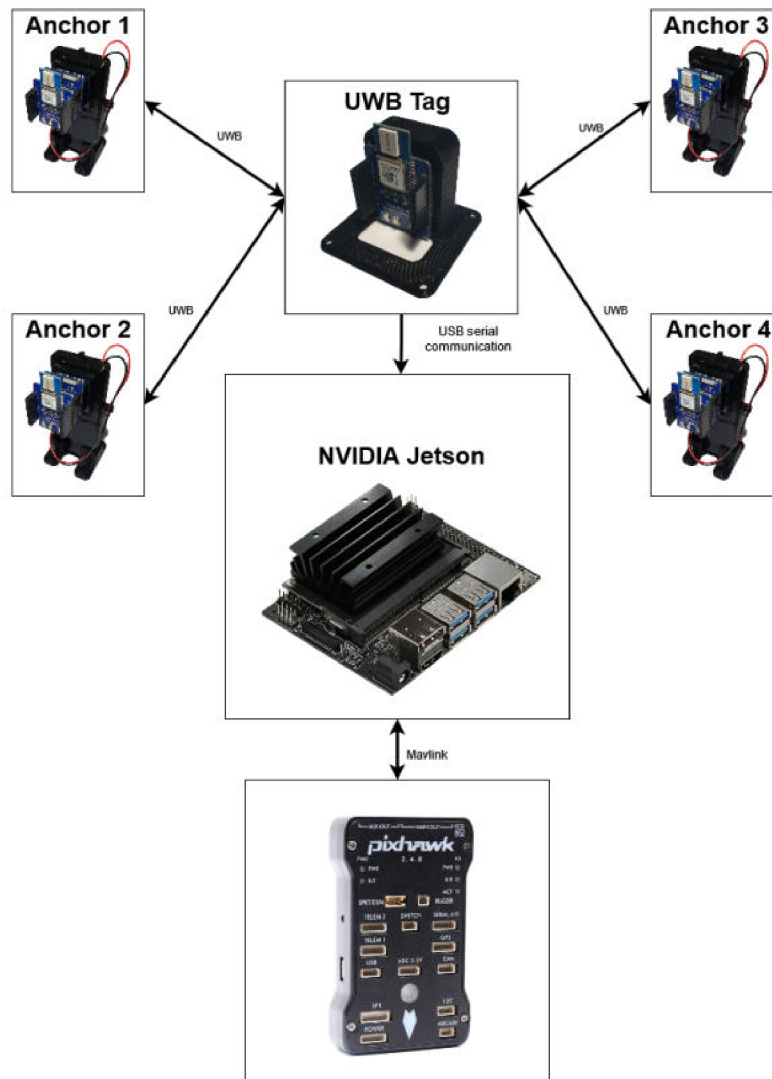
Obr. 5.4: Blokový diagram výmeny a spracovania dát

Výhodou použitia ROS-u je hlavne to, že ak by sme chceli napr. vytvoriť novú úlohu, ktorá bude riešiť iné zadanie, stačí jednoducho vytvoriť nový node, v ktorom si odoberieme potrebné hodnoty, ktoré máme k dispozícii vrámci ROS-u.

5.4 Prepojenie jednotlivých častí

V tejto kapitole je opísané prepojenie jednotlivých častí systému. Na obrázku 5.5 je zobrazená bloková schéma prepojenia. Tak ako už bolo opísané, meranie vzdialenosti medzi statickými bodmi a tagom je pomocou technológie UWB. Následne sú

namerané dáta posielané cez USB sériovú komunikáciu do dosky Nvidia Jetson. Prepojenie s letovým kontrolérom Pixhawk je cez protokol Mavlink. Protokol Mavlink je opísaný v nasledujúcej podkapitole 6.1.



Obr. 5.5: Bloková schéma prepojenia jednotlivých častí

5.4.1 Mavlink

Je protokol, ktorý sa v praxi používa na vzdialenú konfiguráciu, riadenie z pozemnej stanice. Taktiež sa používa na zdieľanie telemetrie z bezpilotných zariadení. Správy sú definované pomocou XML súborov. Podobne ako ROS je založený na publisher-subscriber komunikácii.

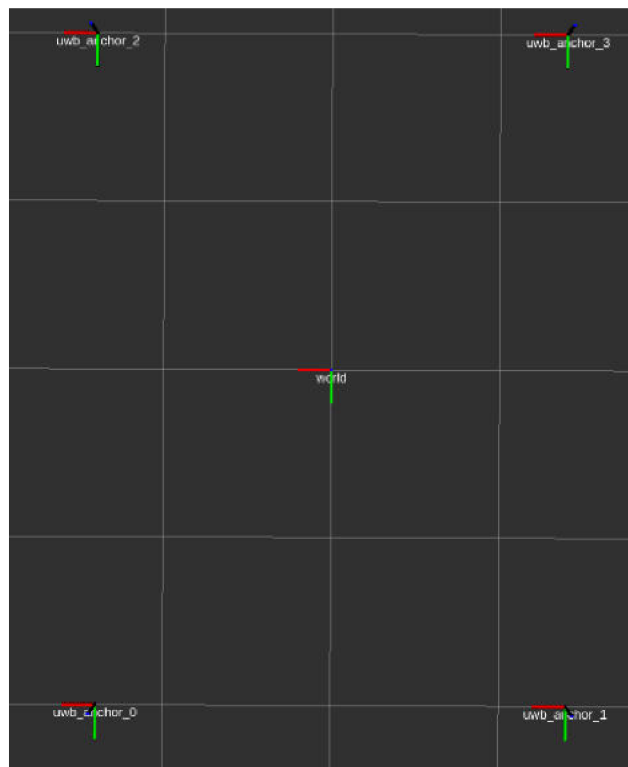
6 Simulácia

Aby sme boli schopní overiť správnu funkčnosť výpočtu relatívnej polohy v priestore, je vhodné si dané úlohy odsimulovať. Ako už bolo spomenuté, ROS ponúka simulačné prostredie Gazebo a Rviz. Taktiež je to komunitný projekt, v rámci ktorého je možné si sťahovať a modifikovať knižnice.

6.1 Vysielanie UWB modulov

Simulácia vysielania UWB zabezpečuje zdieľanie dát meranej vzdialenosti do ROS topicu **uwb data topic**. Meraná vzdialenosť sa získa ako diferenciacia súradnice dronu (robota), na ktorom je umiestnený tag, a samotnými statickými bodmi. Pre napodobnenie reálnych UWB modulov je k meranej vzdialenosti pridaný šum. Pre zdieľanie topicu bol vytvorený node **uwb simulation**.

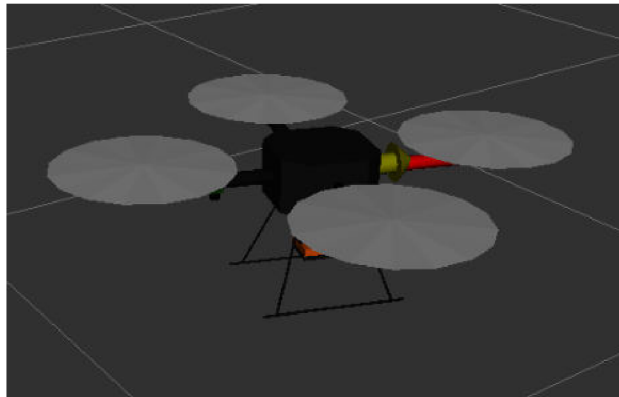
Umiestnenie UWB modulov do prostredia Rviz je realizované pomocou súboru **.launch**, v ktorom si vytvoríme node typu **tf static transform publisher**. Tento node môžeme umiestniť do sveta na zvolené súradnice v referencii k súradnému systému sveta. Na obrázku 6.1 môžeme vidieť umiestnené statické body.



Obr. 6.1: Umiestnenie UWB modulov v prostredí Rviz

6.2 Testovací dron

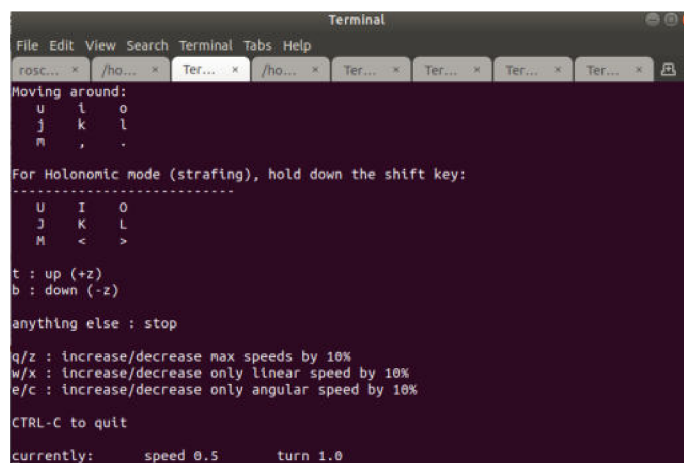
Na testovanie som sa rozhodol použiť **hector-quadrotor**. Pomocou tejto knižnice je možné si dron umiesniť do Rvizu aj do prostredia Gazebo. Súčasťou tejto knižnice sú rôzne scenérie a rôzne periférie dronu, s ktorými je možné pracovať. Pre našu úlohu je dôležitá hlavne možnosť ovládania dronu. Na obrázku 6.2 je zobrazený testovací dron.



Obr. 6.2: Testovací dron hector-quadrotor

6.2.1 Ovládanie dronu

Dron je možné ovládať pomocou **teleop twist keyboard**. Je to knižnica, ktorá umožňuje ovládanie dronu pomocou klávesnice. Na obrázku 6.3 je zobrazené okno prostredia na ovládanie dronu.



```
Terminal
File Edit View Search Terminal Tabs Help
ros... x /ho... x Ter... x /ho... x Ter... x Ter... x Ter... x Ter... x
Moving around:
u i o
j k l
m , .

For Holonomic mode (strafing), hold down the shift key:
-----
U I O
J K L
M < >

t : up (+z)
b : down (-z)

anything else : stop

q/z : increase/decrease max speeds by 10%
w/x : increase/decrease only linear speed by 10%
e/c : increase/decrease only angular speed by 10%

CTRL-C to quit

currently: speed 0.5 turn 1.0
```

Obr. 6.3: Rozhranie na ovládanie drona

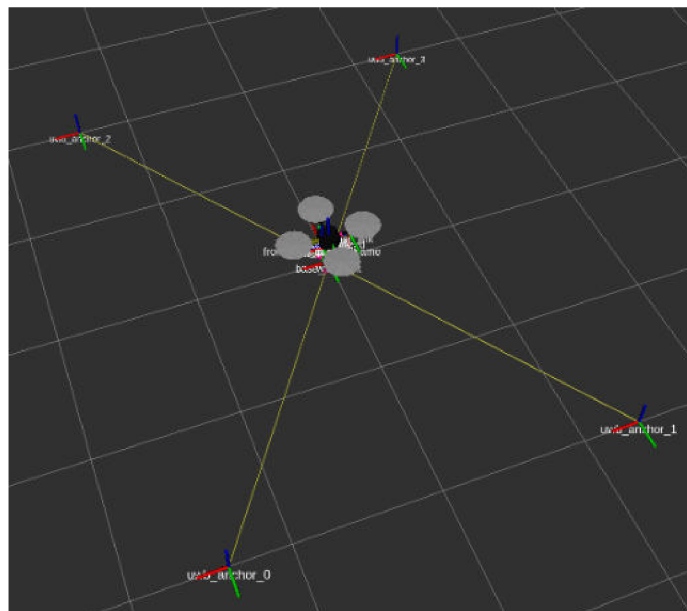
6.3 Testovanie

V tejto kapitole je opísané testovanie určovania polohy. Po spojzdení a spustení simulácie, umiestnení drona, spustení simulácie UWB merania a určovania polohy, sme si mohli overiť správnosť určovania relatívnej polohy v priestore.



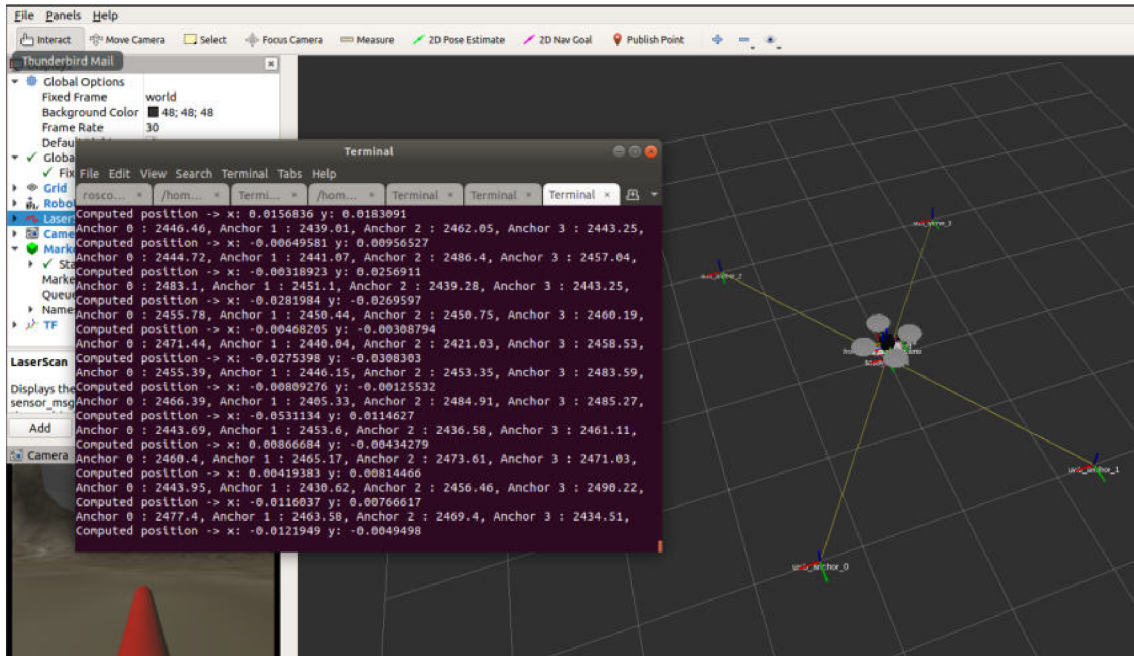
Obr. 6.4: Dron v simulačnom prostredí Gazebo

Po spustení drona je ako prvé potrebné „armnúť“ (spustiť) motory. Toto je jednoducho možné zavolaním **rosservice call /enable motors 'enable: true'**. Ak nám service odpovie **success: true**, tak je dron pripravený na vzlet. Následne už môžeme dron ovládať pomocou **teleop twist keyboard**.

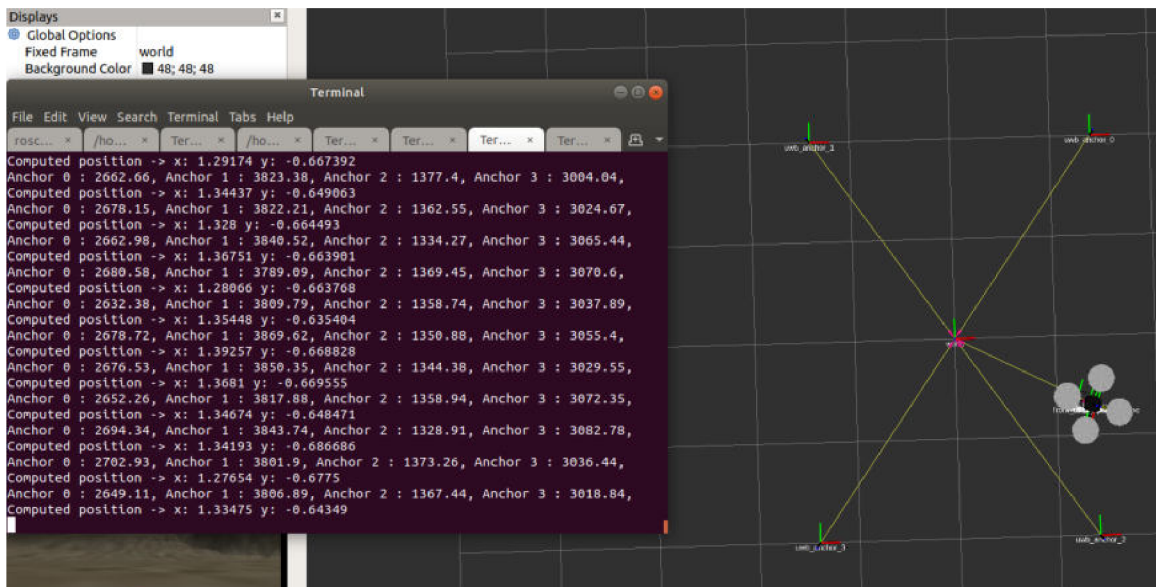


Obr. 6.5: Dron v simulačnom prostredí Rviz po spustení

Po spustení simulácie bol dron umiestnený na súradnici 0,0. Teda ako prvé sme si mohli overiť, či výstup určenej relatívnej polohy v priestore bude zodpovedať súradniciam 0,0. Ako môžeme vidieť na obrázku 6.6 hodnota určenej relatívnej polohy v priestore zodpovedá súradniciam 0,0.



Obr. 6.6: Dron po spustení simulácie



Obr. 6.7: Dron po zmene polohy

Ďalej sme dronom ľubovolne pohybovali a porovnávali polohu. Na obrázku 6.7 je zachytený moment po zmene polohy drona na ľubovolnú pozíciu. Hodnota poslednej určenej relatívnej polohy v priestore je 1.33,-0.64. Ako referencia je mriežka v simulačnom prostredí Rviz, ktorá ma raster 1 m. Táto hodnota zodpovedá polohe drona voči statickým bodom. Ako môžeme vidieť, na určenej hodnote relatívnej polohy sa prejavuje šum meraných hodnôt medzi statickými bodmi a tagom.

Záver

V rámci tejto bakalárskej práce sme sa zoznámili s technológiami a metódami, ktoré je možné použiť pre určovanie polohy v priestore bez využitia GNSS. Zhodnotili sme výhody, nevýhody jednotlivých technológií a podmienky ich použitia. Na základe získaných poznatkov sme vybrali najvhodnejšiu technológiu pre našu aplikáciu. Ako najvhodnejšou pre našu aplikáciu je technológia UWB, ktorá má z dostupných technológií najširšiu šírku pásma, najväčší dosah a dostatočnú presnosť. Zároveň je túto technológiu možné použiť prakticky so všetkými dostupnými metódami pre určovanie vzdialenosti medzi vysielateľom a prijímačom. Ako najvhodnejšie sa javia metódy založené na meraní času. Pre našu aplikáciu bola zvolená metóda TWR. Jedná sa o koncept, ktorý je založený na metóde ToF.

V ďalšej časti práce je opísaný výber konkrétneho UWB modulu. Taktiež sme navrhli spôsob lokalizácie pomocou UWB modulov. Navrhli sme vhodný počet vysielateľov, ktorý bude dostatočný pre našu aplikáciu. Bol vybraný vhodný mikroprocesor pre použitie s UWB modulmi. Pre zvolenú vývojovú dosku bol navrhnutý a vyrobený shield s UWB modulom DWM1000. Schéma a doska plošného spoja bola navrhnutá v cloudovom CAD nástroji pre návrh a dizajn plošných spojov Easy-EDA. Bola navrhnutá a vyrobená montáž UWB tagu na kvadrokoptéru. Napájanie statických bodov je zabezpečené z LiPol batérií.

Bolo vykonané meranie vzdialenosti medzi dvoma bodmi. Výsledky merania sú popísané v kapitole 4.5. Na základe meraných vzdialeností medzi tagom a statickými bodmi bolo už možné určovať polohu v priestore. Výsledky merania určovania polohy v priestore sú popísané v kapitole 4.4.

Bol navrhnutý a implementovaný spôsob komunikácie medzi UWB tagom a vývojovou doskou Nvidia Jetson. K nameraným dátam je možné pristupovať pomocou ROS topicu. Taktiež bol implementovaný ROS node pre výpočet relatívnej polohy v priestore na základe nameraných dát.

Pre možný vývoj a overenie správnosti implementácie bola vytvorená simulácia v prostredí Rviz a Gazebo. Túto simuláciu bude možné v budúcnosti využiť pre vývoj a ladenie rôznych aplikácií založených na tejto práci.

Výsledkom tejto bakalárskej práce je funkčný koncept systému, pomocou ktorého je možné lokalizovať a navigovať dron v známom prostredí bez využitia GNSS. V budúcnosti by bolo vhodné navrhnuť a implementovať nejaké grafické užívateľsky prívetivé rozhranie pre konfiguráciu systému.

Literatúra

- [1] Úřad pro civilní letectví: *Letecký předpis L 10/I : O civilní letecké telekomunikační službě: Svazek I: Radionavigační prostředky* [online]. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2003, poslední změna 2010-11-18 [cit. 2011-10-20]. Uveřejněno pod č. j. 1285/2003-220-SP/1. Dostupné z URL: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>.
- [2] Henniges, R: *Current approaches of Wifi Positioning*. 2012, Dostupné z URL: https://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1112/snet-project/wifi-positioning_henniges.pdf.
- [3] Shchekotov M.: *Indoor Localization Methods Based on Wi-Fi Lateration and Signal Strength Data Collection* ITMO University, St.Petersburg, Rusko, Dostupné z URL: <https://www.fruct.org/publications/fruct17/files/Shc.pdf>.
- [4] Ravindra S. : *TIME OF ARRIVAL BASED LOCALIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS: A LINEAR APPROACH* Jawaharlal Nehru National College of Engineering, Shimoga-577204. Visvesvaraya Technological University, Belguam, Karnataka, India. Dostupné z URL: <https://airconline.com/sipij/V4M4/4413sipij02.pdf>.
- [5] Ali Yassin, Youssef Nasser: *Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications* EEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS, VOL. 19, NO. 2 Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7762095/>.
- [6] Liu Liu, Bofeng Li: *Real-Time Indoor Positioning Approach Using iBeacons and Smartphone Sensors* College of Surveying and GeoInformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/6/2003/pdf>.
- [7] Bill Schweber: *LIDAR and Time of Flight, Part 2: Operation* Dostupné z URL: www.microcontrollertips.com/lidar-and-time-of-flight-part-2-operation/.
- [8] ROS: *Reference* Dostupné z URL: <https://www.ros.org/>.
- [9] PX4: *ROS 2 User Guide (PX4-ROS 2 Bridge)* Dostupné z URL: https://docs.px4.io/v1.12/en/ros/ros2_comm.html.
- [10] DWM1000: *Dokumentácia* Dostupné z URL: <https://www.decawave.com/product/dwm1000-module/>.

- [11] The implementation of two- way ranging with the DW1000: *Dokumentácia*
Dostupné z URL:
<https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS013_The-Implementation-of-Two-Way-Ranging-with-the-DW1000_v2.3.pdf>.

Zoznam symbolov a skratiek

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
WPS	Wi-Fi - based positioning system
RSSI	Received signal strength indication
AoA	Angle of arrival
ToA	Time of arrival
TDoA	Time Difference of arrival
ToF	Time of flight
RSS	Received Signal Strength
ROS	Robot Operating System
Lidar	Light Detection and Ranging
MicroRTPS	Micro Real Time Publish Subscribe
TWR	Two-way ranging
GPIO	General-purpose input/output
MAVLink	Micro Air Vehicle Link

Zoznam príloh

A	Schéma zapojenia shieldu	70
B	Namerané hodnoty	71
B.1	Meranie vzdialenosti medzi dvoma bodmi	71
B.2	Meranie určovania relatívnej polohy v priestore	72
C	Obsah priloženého CD	73
C.1	catkin_ws	73
C.1.1	src	73
C.2	schemaGerberShieldu	73
C.3	zdrojoveSuboryAnchorTag	73

B Namerané hodnoty

B.1 Meranie vzdialenosti medzi dvoma bodmi

Namerané hodnoty pre grafy 4.2 a 4.3.

Tab. B.1: Namerané hodnoty vzdialenosti medzi dvoma bodmi

Meraná vzdialenosť [m]	Nameraná hodnota [m]	Nameraná hodnota s odčítaním offsetu [m]	Absolútna chyba merania [m]
0,0	0,55	0,00	0,00
0,5	1,05	0,50	0,00
1,0	1,61	1,06	-0,06
1,5	2,10	1,55	-0,05
2,0	2,6	2,05	-0,05
2,5	3,22	2,67	-0,17
3,0	3,58	3,03	-0,03
3,5	4,20	3,65	-0,15
4,0	4,67	4,12	-0,12
4,5	5,11	4,56	-0,06
5,0	5,58	5,03	-0,03
5,5	6,12	5,57	-0,07
6,0	6,60	6,05	-0,05
6,5	7,16	6,61	-0,11
7,0	7,58	7,03	-0,03
7,5	8,12	7,57	-0,07
8,0	8,63	8,08	-0,08
8,5	9,13	8,58	-0,08
9,0	9,64	9,09	-0,09
9,5	10,09	9,54	-0,04
10,0	10,64	10,09	-0,09

B.2 Meranie určovania relatívnej polohy v priestore

Namerané hodnoty pre grafy 4.4 a 4.5.

Tab. B.2: Namerané hodnoty určovania relatívnej polohy v priestore

Namerané hodnoty											
Referenčný bod		Nameraná pozícia		Absolútna chyba merania		Referenčný bod		Nameraná pozícia		Absolútna chyba merania	
x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
4,7	0	4,75	0,03	-0,05	-0,03	2	0	1,91	0,06	0,09	-0,06
4,7	1	4,73	1,04	-0,03	-0,04	2	1	1,95	1,10	0,05	-0,10
4,7	2	4,8	2,08	-0,1	-0,08	2	2	2,01	2,15	-0,01	-0,15
4,7	3	4,74	2,95	-0,04	0,05	2	3	2,02	3,12	-0,02	-0,12
4,7	4	4,83	4,25	-0,13	-0,25	2	4	1,98	4,09	0,02	-0,09
4,7	5	4,73	5,02	-0,03	-0,02	2	5	1,97	5,15	0,03	-0,15
4,7	6	4,78	5,87	-0,08	0,13	2	6	2,05	6,10	-0,05	-0,10
4,7	7	4,76	6,85	-0,06	0,15	2	7	2,03	6,95	-0,03	0,05
4,7	8	4,77	7,98	-0,07	0,02	2	8	2,05	8,15	-0,05	-0,15
4	0	3,75	0,05	0,25	-0,05	1	0	0,96	0,01	0,04	-0,01
4	1	3,80	0,98	0,20	0,02	1	1	1,01	1,03	-0,01	-0,03
4	2	3,85	2,05	0,15	-0,05	1	2	1,02	2,08	-0,02	-0,08
4	3	3,90	2,95	0,10	0,05	1	3	0,98	3,05	0,02	-0,05
4	4	4,05	4,00	-0,05	0,00	1	4	0,99	4,15	0,01	-0,15
4	5	4,08	5,05	-0,08	-0,05	1	5	1,05	5,07	-0,05	-0,07
4	6	3,98	6,03	0,02	-0,03	1	6	1,08	6,09	-0,08	-0,09
4	7	3,95	6,90	0,05	0,10	1	7	1,10	7,20	-0,10	-0,20
4	8	3,97	8,10	0,03	-0,10	1	8	1,05	8,10	-0,05	-0,10
3	0	2,74	-0,05	0,26	0,05	0	0	0,34	-0,05	-0,34	0,05
3	1	2,80	1,05	0,20	-0,05	0	1	0,21	1,05	-0,21	-0,05
3	2	2,82	2,10	0,18	-0,10	0	2	0,18	2,12	-0,18	-0,12
3	3	2,92	2,98	0,08	0,02	0	3	0,20	3,15	-0,20	-0,15
3	4	2,95	4,15	0,05	-0,15	0	4	0,15	4,16	-0,15	-0,16
3	5	2,96	5,05	0,04	-0,05	0	5	0,12	5,10	-0,12	-0,10
3	6	2,98	6,10	0,02	-0,10	0	6	0,16	6,09	-0,16	-0,09
3	7	3,05	6,90	-0,05	0,10	0	7	0,14	7,10	-0,14	-0,10

C Obsah priloženého CD

C.1 catkin_ws

V tejto zložke sa nachádzajú všetky potrebné knižnice pre build ROSu. Pre fungovanie je potrebné mať verziu Ubuntu 18.04 a nainštalovaný ROS Melodic.

C.1.1 src

Obsahom tejto zložky sú všetky potrebné knižnice k tejto práci. Obsahom zložky **pozyx_simulation** sú zdrojové súbory pre simuláciu vysielania UWB modulov (**uwb_simulation.py**). Súčasťou je taktiež súbor **dataFromESP.py**, ktorý slúži na spracovanie prijatých správ zo sériového portu, ktoré sú následne zdieľané do ROS topicu.

C.2 schemaGerberShieldu

Výrobné podklady pre výrobu dosky plošného spoja shieldu. Obsahom zložky je taktiež schéma zapojenia.

C.3 zdrojoveSuboryAnchorTag

Obsahom zložky sú zdrojové súbory pre tag a anchor. Potrebná verzia Arduino IDE je 1.8.13 a novšia. Taktiež je pre kompiláciu potrebné mať nainštalované príslušné vývojové dosky. Súčasťou zložky je taktiež modifikovaná knižnica **DW1000**, tak aby bola kompatibilná aj s mikroprocesorom ESP8266.

```

.....koreňový adresár priloženého archívu
├── catkin_ws ..... pracovná zložka pre ROS
│   ├── src
│   │   ├── hector_gazebo
│   │   ├── hector_localization
│   │   ├── hector_models
│   │   ├── hector_quadrotor
│   │   ├── pozyx_simulation
│   │   │   └── src
│   │   │       ├── dataFromESP.py
│   │   │       ├── infodata_subscriber.cpp
│   │   │       └── uwb_simulation.py
│   │   ├── teleop_twist_keyboard
│   │   ├── turtlebot3
│   │   ├── turtlebot3_msgs
│   │   └── turtlebot3_simulations
│   ├── pdf ..... pdf bakalárskej práce
│   │   └── bakalarskaPraca.pdf
│   ├── schemaGerberShieldu ..... schéma a výrobné podklady pre shield
│   │   ├── gerberFiles
│   │   ├── schema
│   │   │   └── SCH_ESP8266_DWM1000_shield
│   ├── zdrojoveSuboryAnchorTag
│   │   ├── anchor
│   │   │   └── anchor.ino
│   │   ├── tag
│   │   │   └── tag.ino
│   │   └── DW1000
│   └── zdrojoveSuboryLatexPrace ..... LaTeX repozitár bakalárskej práce

```