

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

MAPOVÁNÍ PROSTORU ZA VYUŽITÍ ROBOTICKÉ PLATFORMY

Bc. Petr Vaníček

Diplomová práce

2018

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Vaníček**
Osobní číslo: **I15191**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Mapování prostoru za využití robotické platformy**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je mapování prostoru za využití robotické platformy. Robotická platforma bude schopna detekovat překážky v neznámém prostoru a tyto překážky zakreslit do 2D mapy. Navigace robotické platformy bude realizována za využití bezdrátových technologií. Teoretická část se bude zabývat rozborem použitelných senzorů a metod vytvoření 2D mapy. Praktická část se bude zabývat implementací vybraných senzorů do robotické platformy a jejich otestování. Výsledkem práce bude 2D mapa neznámého prostoru.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

J. BLEJKA, NÁVRH A REALIZACE METODY MAPOVÁNÍ OKOLÍ PRO MOBILNÍ ROBOT - diplomová práce. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství ústav automatizace a informatiky, 2007, 68 s.

P. Chmelar and M. Dobrovolny, "The fusion of ultrasonic and optical measurement devices for autonomous mapping," Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2013 23rd International Conference, Pardubice, 2013, pp. 292-296.

doi: 10.1109/RadioElek.2013.6530934

L. Beran, P. Chmelar and M. Dobrovolny, "Navigation of robotic platform using inertial measurement unit and Direct Cosine Matrix," Proceedings ELMAR-2014, Zadar, 2014, pp. 1-4. doi: 10.1109/ELMAR.2014.6923322

Scanning Laser Range Finder URG-04LX-UG01 (Simple-URG) [online]. In: , Hokuyo Automatics. 2009, s. 1-4 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z:

https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/pdf/URG-04LX_UG01_spec.en.pdf

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Pidanič, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2017



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17. 5. 2018

Bc. Petr Vaníček

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Ladislavu Beranovi za poskytnuté konzultace ohledně diplomové práce, všestrannou pomoc při řešení různých problémů, a cenné odborné rady. Dále děkuji též mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D. za zastřešení realizace této práce. V neposlední řadě děkuji celé mé rodině za podporu během studií.

V Pardubicích dne 17. 5. 2018

Bc. Petr Vaniček

ANOTACE

Cílem diplomové práce je mapování prostoru za využití robotické platformy. Robotická platforma bude schopna detekovat překážky v neznámém prostoru a tyto překážky zakreslit do 2D mapy. Navigace robotické platformy bude realizována za využití bezdrátových technologií. Teoretická část se bude zabývat rozбором použitelných senzorů a metod vytvoření 2D mapy. Praktická část se bude zabývat implementací vybraných senzorů do robotické platformy a jejich otestování. Výsledkem práce bude 2D mapa neznámého prostoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mobilní robotická platforma, bezdrátové řízení robotické platformy, tvorba 2D mapy, SLAM, Raspberry PI

TITLE

THE SPACE MAPPING USING ROBOTICS PLATFORM

ANNOTATION

This thesis is focused on the space exploration using robotics platform. The robotics platform will be able to detect objects in space and convert these objects into 2D map. The wireless communication technology will be used for navigation of this platform. The theoretical part of thesis will be focused on the sensors analysis and methods of space map composition. Practical part will be focused on implementation of selected sensors and their tests. The result of thesis will be 2D map of unknown space.

KEYWORDS

The mobile robotic platform, wireless control of the robotic platform, creation 2D map, SLAM, Raspberry PI

OBSAH

	Seznam zkratk a značek	10
	Seznam ilustrací	11
	Seznam tabulek	13
	ÚVOD	14
1	MAPOVÁNÍ PROSTORU	16
1.1	Historie mapování území	16
2	VÝPOČETNÍ METODY PRO LOKALIZACÍ MOBILNÍHO ROBOTA.....	19
2.1	Maticе směrových kosinů	19
2.2	Eulerovy úhly	20
2.3	Kalmanův filtr	21
3	ROZBOR SENZORŮ A METOD NAVIGACE MOBILNÍHO ROBOTA.....	24
3.1	Lidar	24
3.1.1	Historie Lidaru	25
3.1.2	Princip funkce Lidaru.....	25
3.2	Inerciální navigační systém.....	26
3.2.1	Princip činnosti	27
3.2.2	INS stabilizované vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě	28
3.2.3	INS typu Strapdown.....	29
3.2.4	Součásti IMU	29
3.2.5	Vlastnosti INS	32
3.3	Odometrie.....	32
3.3.1	Rotační enkodéry	32
3.3.2	Vlastnosti odometrie	34
3.3.3	Visuální odometrie	35
3.4	Satelitní navigace	35
3.4.1	Navstar - GPS.....	36
3.4.2	Glonass.....	39
3.4.3	Galileo.....	39
3.4.4	BeiDou/Compass	41
3.4.5	IRNSS	41
3.5	Navigace pomocí rádiových vysílacích modulů RFID	42
3.6	Orientace v prostoru za využití wifi.....	43

4	SLAM.....	44
4.1	Popis funkce SLAM.....	44
4.1.1	Extrakce orientačních bodů z okolí.....	46
4.1.2	Asociace snímaných dat.....	48
4.1.3	Aktualizace stavu pomocí EKF.....	49
4.2	Zařízení pro skenování okolí.....	51
4.3	Další využití SLAM.....	52
5	ROS.....	53
5.1	Historie ROSu.....	54
5.2	Popis ROSu.....	55
5.2.1	Souborová úroveň.....	56
5.2.2	Výpočetní úroveň.....	57
5.2.3	Komunitní úroveň.....	58
5.3	Grafické nástroje systému ROS.....	58
5.4	Hector SLAM.....	59
5.4.1	Princip a použití balíčků Hector.....	60
6	KONSTRUKCE MOBILNÍHO ROBOTY.....	61
6.1	Výchozí stav robotické platformy.....	61
6.2	Nová podoba robotické platformy.....	64
6.2.1	Hokuyo URG-04LX.....	67
6.3	Úpravy stávajících komponent robotické platformy.....	68
6.4.1	Firmware pro mcu robota.....	70
6.4.2	Systém obsluhy lidarů.....	71
6.4.3	Instalace systému ROS a jeho příprava.....	72
6.4.4	Spuštění celého systému.....	74
6.4.5	Postprocessing v PC.....	76
7	TESTY MOBILNÍHO ROBOTY.....	77
7.1	Testy měření přesnosti trajektorie.....	77
7.1.1	Měření trajektorie v chodbě.....	77
7.1.2	Měření trajektorie v místnosti.....	78
7.1.3	Měření trajektorie podél hladké zdi.....	80
7.1.4	Měření trajektorie na volném prostranství.....	81
7.1.5	Zhodnocení měření trajektorie.....	82

7.2	Kvalita výsledné mapy pořízené laserovým skenováním	82
7.2.1	Chodba	83
7.2.2	Chodba a pokoje (patro).....	84
7.2.3	Dům (dvě patra)	88
7.2.4	Zahrada.....	89
7.2.5	Zhodnocení tvorby map	90
	ZÁVĚR	92
	LITERATURA.....	93
	PŘÍLOHY	97

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

BSD	Berkeley Software Distribution
DIAL	Differential Absorption Lidar
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EKF	Extended Kalman filter
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
LIDAR	Light Detection And Ranging
MCU	Microprocessor unit
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MSE	Mean Square Error
RANSAC	Random Sampling Consensus
RDS	Radio Data System
RFID	Radio Frequency Identification
ROS	Robotic Operation System
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SMD	Surface Mount Technology
SURF	Speeded-Up Robust Feature
WAAS	Wide Area Augmentation System
WIFI	Wireless Fidelity

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 – Výřez z Crigingerovy mapy Čech (1568) (Lebedová, 2008).....	16
Obrázek 1.2 – Letecké skenování povrchu pomocí lidarů (3DEO, 2010).....	17
Obrázek 2.1 – Robot vybavený lidarem (Wikipedie, 2010).....	19
Obrázek 2.2 – Rotace úhlů při řízení letadla (http://howthingsfly.si.edu , 2018).....	20
Obrázek 2.3 – Grafické znázornění Eulerových úhlů (Wikipedie)	21
Obrázek 2.4 – Vyhodnocení dat Kalmanovým filtrem (Scherr, cit. 2017).....	22
Obrázek 3.1 – Různé typy lidarů (https://acroname.com , 2018).....	24
Obrázek 3.2 – Princip funkce lidarů (Anandan, 2015).....	25
Obrázek 3.3 – IMU jednotka (http://www.clker.com , 2018).....	27
Obrázek 3.4 – Gimbal (Wikipedia, 2018).....	28
Obrázek 3.5 – MEMS struktura (https://www.mems-exchange.org , 2018)	30
Obrázek 3.6 – Znázornění Coriolisovy síly (Vojáček, 2009).....	31
Obrázek 3.7 – Znázornění Grayova kódu (Skalka, 2011)	34
Obrázek 3.8 – Mapa pokrytí podpůrných systémů satelitní navigace (Jueves, 2011).....	38
Obrázek 3.9 – Mapa RFID značek (Peng, 2012).....	42
Obrázek 4.1 – Obraz 2D mapy získaný pomocí metody SLAM (Noury, 2013)	45
Obrázek 4.2 – Blokové schéma procesu SLAM.....	46
Obrázek 4.3 – 3D SLAM krajiny (http://woolpert.com , 2018)	50
Obrázek 4.4 – Automobil s instalovaným lidarem pro snímání okolí (Howell, 2013).....	51
Obrázek 4.5 – Lidar jako bezpečnostní prvek automobilu (Warburton, 2017)	52
Obrázek 4.6 – Modelování budov pomocí lidarů (Nuechter, 2016).....	53
Obrázek 5.1 – Distribuce systému ROS (http://wiki.ros.org/Distributions , 2018).....	55
Obrázek 5.2 – Prostředí Rviz.....	59
Obrázek 6.1 – Původní podoba mobilního robota	63
Obrázek 6.2 – Rozmístění čidel.....	65
Obrázek 6.3 – Lidar Hokuyo URG-04LX	66
Obrázek 6.4 – Konečná podoba mobilního robota	67
Obrázek 6.5 – Software pro lidar.....	68
Obrázek 6.6 – Schéma filtru motorů.....	69
Obrázek 6.7 – Panel s přepínači.....	69
Obrázek 6.8 – Blokové schéma firmwaru mikrokontroléru	71

Obrázek 7.1 – Měření trajektorie v místnosti	79
Obrázek 7.2 – Měření trajektorie podél hladké zdi	80
Obrázek 7.3 – Měření trajektorie na volném prostranství	82
Obrázek 7.4 - Průjezd chodbou.....	84
Obrázek 7.5 - Mapování přilehlých místností 1	85
Obrázek 7.6 - Mapování přilehlých místností 2	86
Obrázek 7.7 – Porovnání generované mapy se stavebním plánem domu	87
Obrázek 7.8 - Mapování po uzavřené trase	88
Obrázek 7.9 - Mapování dvou pater naráz.....	89
Obrázek 7.10 - Mapování venkovních prostor	90
Rqt graph.....	100
Tf view frames (https://magiccv.s.byu.edu , 2018)	101

SEZNAM TABULEK

Tabulka 6.1 – Parametry komponent robota.....	63
Tabulka 6.2 – Parametry lidarů.....	67
Tabulka 7.1 – Měření trajektorie 5 m a 3 m v chodbě.....	77
Tabulka 7.2 – Měření trajektorie 5 m v místnosti.....	79
Tabulka 7.3 – Měření trajektorie 5 m podél hladké zdi.....	81

ÚVOD

Tato diplomová práce navazuje na mou bakalářskou práci, která měla za úkol navrhnout mobilní robotický systém pro detekci nebezpečných plynů. Robot je řízen obsluhou pomocí přenosného počítače a navrženého programu. Vytvořený program umožňuje bezdrátově ovládat robota a zobrazovat údaje z čidel, řízení je realizováno za pomoci přenosu videa z kamery umístěné na robotu. Při výskytu plynu, zvýšení teploty nebo přítomnosti překážky v blízkosti robota je na tuto událost obsluha upozorněna pomocí kontrolky a zvukových signálů. Údaje je možno získávat ze senzoru plynů, čidla teploty a dvojice distančních čidel. Přenos obrazu je obstarán pomocí Raspberry PI spolu s kamerou. Snímaný obraz je vysílán v reálném čase do řídicí jednotky.

Cílem této práce je robotický systém dále vylepšit a rozšířit jej o možnost mapování neznámého prostoru pomocí laserového skeneru. V úvodu práce byl proveden rozbor senzorů, metod a systémů umožňující lokalizaci mobilního robota v neznámém prostředí, na základě kterého byla vybrána vhodná konfigurace robotického systému. Z důvodu povahy diferenciálního způsobu řízení zvoleného pásového podvozku bylo jako vhodné zvoleno použití pouze laserového skeneru bez využití doprovodných senzorů, jako jsou odometry či inerciální jednotky. Tento výběr je opodstatněn složitějším vyhodnocováním dat ze senzorů při provozu na pásovém podvozku, kde mohou být data zatížena šumem. Při vyhodnocování dat z odometrů je zase nutné brát v úvahu chyby způsobené protáčením či smykem pásů zvoleného podvozku. Dalším důvodem je vyzkoušení realizace tvorby mapy pouze s laserovým skenerem a zjištění možností a omezení této sestavy při reálném použití. Za účelem skenování okolí je robot vybaven laserovým skenerem neboli lidarem doplněným vhodným softwarem, který dokáže vystačit pouze s tímto sensorickým prvkem. Jako výpočetní jednotka obsluhující lidar je použit jednodeskový minipočítač Raspberry PI, na kterém je nainstalován operační systém Linux Ubuntu Mate ve verzi 16.04. Operační systém je dále vhodně dovybaven a nakonfigurován, aby vyhověl danému využití. Na systému Ubuntu je zprovozněn robotický operační systém ROS Kinetic. Jako nejvhodnější se nakonec ukázalo použití algoritmu HECTOR SLAM, který byl následně nakonfigurován pro konkrétní použití. Výsledkem výběru hardwaru doplněného o vhodný software je mobilní robotický systém umožňující mapování neznámého prostředí.

V poslední části práce jsou zdokumentovány testy celého systému prováděné za různých provozních podmínek. Při testování byl robot provozován v různém prostředí a s různým

principem řízení. Pokud byl v dosahu laserového snímače dostatečný počet bodů, byla výsledkem mapa odpovídající skutečnosti, v případě použití na volném prostranství bez blízkých okolních bodů algoritmus selhával a docházelo k pokřivení generované mapy. Během testů bylo dále zjištěno, že systém dokáže navázat na prostředí, ve kterém se již v minulosti pohyboval a správně napojit vytvářenou mapu. Při tvorbě mapy dvou podlaží, která se nacházejí nad sebou, byla kompozice rovněž správná a mapa se překrývala dle skutečnosti. Přesnost generování mapy byla porovnána se stavebním plánem budovy, ve které probíhalo měření. Porovnání tvořené mapy spolu se stavebním plánem dokázalo, že je mapa tvořena s dostatečnou přesností. Výsledky provedených měření celkově ukazují na provozní použitelnost spolu s dostatečnou přesností generované mapy při předpokládaném využití.

1 MAPOVÁNÍ PROSTORU

Metody pro zaznamenávání prostoru urazily od počátku ve vývoji značnou cestu. Dnes si málokdo dokáže představit problémy spojené s prvotním mapováním území a obecně se zaměřováním různých objektů. Klasické tištěné mapy jsou dnes díky cenově dostupným satelitním navigacím na ústupu. Satelitní navigační přístroje přináší značné ulehčení práce s plánováním tras, avšak pro svoji funkci potřebují rovněž mapové podklady. Tyto podklady jsou zde již v digitální formě s mnoha doplňujícími informacemi. Vedle mapování rozsáhlého území, tedy tvorbou zeměpisných map, můžeme vytvářet mapy i menších oblastí. Může se jednat například o mapování různých prostor, ať už bytových či nebytových.

1.1 Historie mapování území

Snaha zaznamenávat popis prostoru, tedy vytvářet mapu určitého území je spojována s lidskou činností od nepaměti. První zmínky o mapování území u nás sahají do počátku 16. století. V této době připomínají mapy spíše umělecké dílo, jak je vidět na obrázku 1.1 a přesnost zobrazení není jinak závratná.



Obrázek 1.1 – Výřez z Crigingerovy mapy Čech (1568) (Lebedová, 2008)

Kolem roku 1700 nastal významný milník v tvorbě map, nyní se základem kartografie stává zeměměřičství. Nejprve je pomocí astronomicko-geodetických prací zhotovena výchozí geodetická kostra, kde jsou zaměřeny určité významné body. Jejich propojením se poté vytvářejí geodetické sítě zejména měřeními triangulačními, nivelačními a astronomickými. Tyto data slouží jako podklad map pro následné určování zeměpisných souřadnic konkrétních míst. V 18. století jsou již stanoveny hlavní parametry zemského elipsoidu. Tehdejší rozvoj matematiky přispívá významnou měrou a s pomocí přesné měřicí techniky vznikají stále dokonalejší mapy. Díky těmto pokrokům může v roce 1956 vzniknout záměr na globální mapování celé Země, výsledkem je mapa světa o měřítku 1:2 500 (Lebedová, 2008).

Tvorba původní mapy je náročnou činností, která obsahuje několik kroků. Nejdříve je potřeba zaměřit přesnou polohu zvolených bodů astronomickým měřením. Síť bodů se poté zahušťuje pomocí geodetických prací v terénu. Pomocí trigonometrie se zaměřují polohy jednotlivých bodů, metoda nivelace slouží zase k zaměření nadmořské výšky. Z těchto bodů se následně vychází při zanášení obsahu mapy, tedy topografické činnosti. V dnešní době se zde využívá bezkontaktní pasivní technologie. Jedná se o satelitní snímkování nebo leteckou fotogrammetrii, tedy kolmé fotografování povrchu. Z těchto dat je poté při kartografické činnosti vytvořen autorský originál mapy, který je následně šířen buď v tištěné, nebo elektronické podobě.

V dnešní době je již hojně využíván letecké skenování za pomoci laserové technologie zobrazené na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 – Letecké skenování povrchu pomocí lidarů (3DEO, 2010)

Tato technologie je také bezkontaktní, ale již na aktivní bázi. Aktivní v tomto případě znamená, že systém vysílá určitou energii, kterou se po odrazu od překážky snaží opět zachytit na svém detektoru. Název lidar je odvozen od slova radar. Systém pracuje v podstatě na stejném principu jako radar, jen místo rádiových vln využívá laserových paprsků. Data produkovaná lidarovým měřicím přístrojem jsou digitální, a v této podobě se s nimi taktéž dále pracuje. Jako výhodu lze vyzdvihnout nezávislost na slunečním světle, a tudíž možnost nasazení po 24 hodin denně. Lidarový měřicí systém se skládá ze dvou základních částí, tedy laserové a skenovací jednotky a dále ze satelitního navigačního systému doplněného o inerciální jednotku pro určování polohy v prostoru.

2 VÝPOČETNÍ METODY PRO LOKALIZACÍ MOBILNÍHO ROBOTY

Pro mapování méně rozlehlých či vnitřních prostor je výhodné použití mobilních robotických zařízení, příkladem může být robot uvedený na obrázku 2.1. Systém řízení těchto robotů může být buď ruční, nebo zcela autonomní. Volba daného typu je doprovázena určitými nároky na použití a výbavu mobilního robota jak po softwarové, tak i hardwarové stránce. Provoz zcela autonomního zařízení se sice může jevit jako nejlepší, je ale nutné brát v potaz vlastnosti a povahu měřeného prostředí, které nemusí být vždy zcela příznivé. Nároky na výbavu robota a řídicí program budou podstatně vyšší, a i přes to není nikdy zaručen bezchybný provoz. Naopak při ručním řízení je ponecháno rozhodování o volbě vhodné trasy na člověku, který umí brát v úvahu i okolnosti neměřitelné senzory.



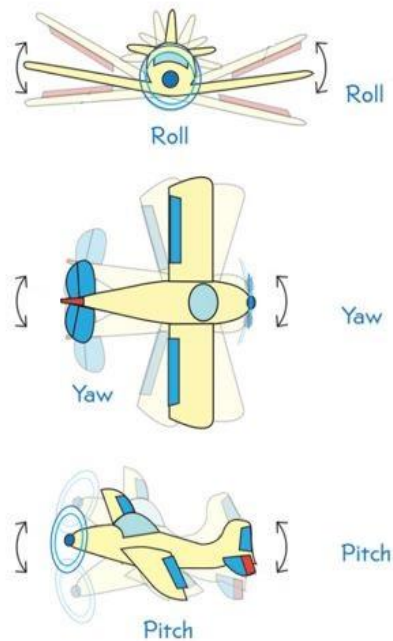
Obrázek 2.1 – Robot vybavený lidarem (Wikipedie, 2010)

V obou případech musí být mobilní robot vybaven mimo jiné soustavou senzorů, které musí umět vhodně využít. Získaná data jsou dále použita k určení změny polohy robota, vlastností okolního prostředí či vlastních provozních stavů.

2.1 Matice směrových kosinů

Matice směrových kosinů neboli DCM – Direct Cosine Matrix provádí transformaci vektorů v Euklidovském prostoru pomocí rotačních matic popsaných vzorcem 2.1. Matice DCM tedy pracuje s Eulerovými úhly. Rotace v 3D prostoru se provádí kolem středu zmíněného prostoru postupně podle každé ze tří nezávislých os dle potřeby. Úhlům, které se při rotacích

mění, se říká Yaw, Pitch a Roll, případně α , β a γ . Pro názornost lze tyto transformace přirovnat k modelu řízení letadla, zobrazeném na obrázku 2.2. Použitím DCM lze efektivně provádět korekci naměřených dat z akcelerometrů či gyroskopů. V mobilní robotice je přínos DCM značný hlavně v oblasti vykreslování ujeté vzdálenosti, kde lze díky aplikaci DCM zamezit kumulování výsledné chyby polohy robota. Použitím DCM v mobilní robotice se zabývá práce (Beran, 2014).



Obrázek 2.2 – Rotace úhlů při řízení letadla (<http://howthingsfly.si.edu>, 2018)

2.2 Eulerovy úhly

V případě provozu mobilního robota za účelem pořizování mapy daného prostoru je nezbytné sledovat změnu jeho polohy vůči orientaci okolí. Přesněji řečeno zde mluvíme o transformaci mezi rámcem globálním, mapou, a rámcem robota.

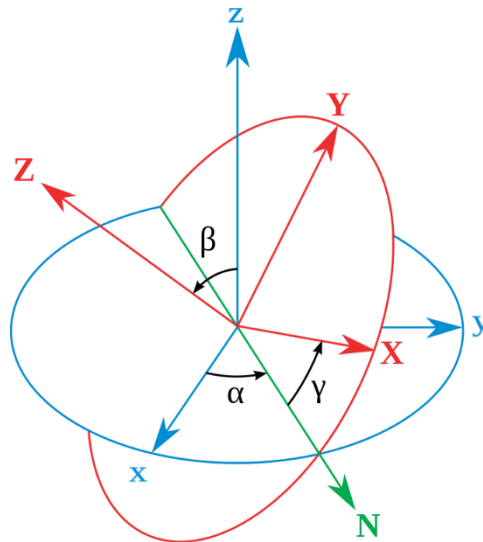
V třídímním prostoru lze rotaci objektu rozložit do tří dílčích směrů. Rotace probíhá kolem inerciálních kartézských souřadnic. Tento rozklad je znám od poloviny 18. století, kdy s ním přišel Leonard Euler (Reichl, 2010), odtud poté pojmenování Eulerovy úhly.

Jednotlivé úhly jsou poté nazývány:

- φ (α) úhel rotace kolem osy x – úhel vlastní rotace (Roll)

- ψ (β) úhel rotace kolem osy y – precesní úhel (Pitch)
- ϑ (γ) úhel rotace kolem osy z – nutační úhel (Yaw)

Postupným otáčením podle os x, y a z docílíme výsledné orientace. Výsledná rotace v 3D je výsledkem postupných tří rotací v 2D prostoru. Grafické znázornění rotace objektu je uvedeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 – Grafické znázornění Eulerových úhlů (Wikipedie)

Jednotlivé rotace jsou popsány pomocí tří rotačních matic uvedených níže vzorcem 2.1.

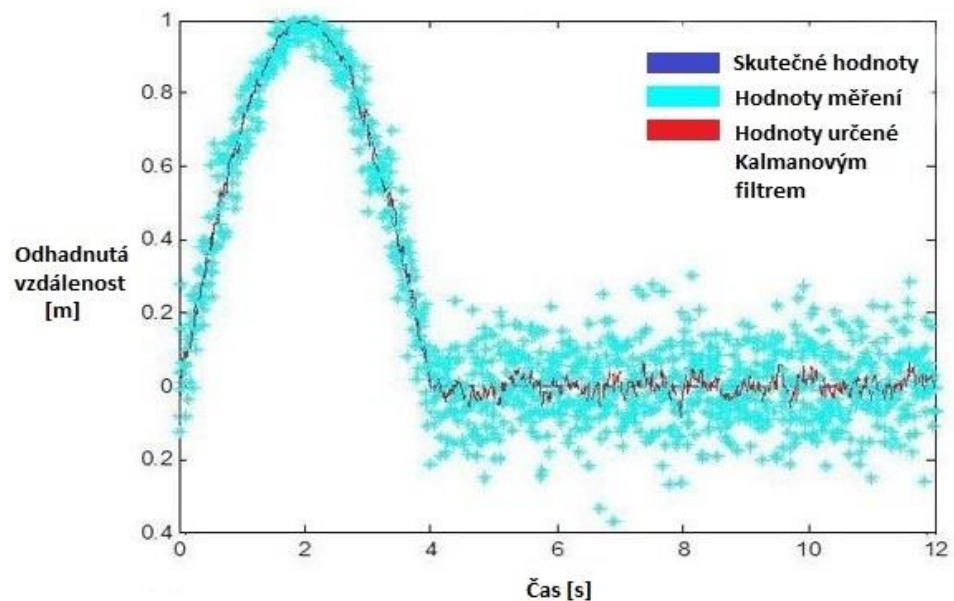
$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} R_y = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} R_z = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Aplikací a využitím DCM včetně porovnání s jinými metodami se zabývá článek (Beran, 2014).

2.3 Kalmanův filtr

Při navigaci mobilního robota za využití více čidel pro určování polohy, které jsou plně nebo částečně duplicitní, je potřeba určit prioritu pro data z konkrétního čidla. Znamená to vybrat data s největším přínosem, a naopak vynechat data obsahující šum. Fúze dat ze senzorů pro určení stavu systému musí být robustní, tedy nezávislá na přítomnosti chyb včetně těch významných. S rostoucí redundancí dat se zlepšuje i přesnost určení správné hodnoty. Pro řešení tohoto problému byl navržen algoritmus Kalmanova filtru, který je pro tuto aplikaci hojně využíván. Princip určení správné hodnoty z dat obsahujících šum je vidět na obrázku 2.4

níže. Modrá čára reprezentuje skutečné hodnoty, tyrkysová hodnoty měření a červená poté hodnoty určené pomocí Kalmanova filtru.



Obrázek 2.4 – Vyhodnocení dat Kalmanovým filtrem (Scherr, cit. 2017)

S Kalmanovým filtrem se poprvé setkáváme v roce 1960, kdy jej jeho vynálezce, R. E. Kalman poprvé představil. Jedná se o soubor matematických rovnic, pomocí kterých lze výhodně řešit odhad neznámého stavového vektoru ve stavovém modelu. Pro uchování kompletní informace nepotřebuje znát Kalmanův filtr celou historii dat, dá se tedy říci, že systém použití matematických rovnic je rekurzivní. Zjednodušeně řečeno lze Kalmanův filtr popsat jako lepší odhad plovoucího průměru (Welch, 2006). S rozvojem výpočetní techniky v následujících letech je Kalmanův filtr využíván i v jiných než technických oborech. Pro jeho jednoduchost a rychlost je aplikován také při řešení ekonomických úloh. Největší uplatnění ale nachází především při výpočtu navigačních dat či zpracování signálů. S prvním reálným využitím Kalmanova filtru přichází NASA při navádění svých sond (Franěk, 2010).

Kalmanův filtr vytváří odhad žádaných proměnných z kombinace všech dostupných dat měření, při čemž minimalizuje chyby. Pro správnou funkci Kalmanova filtru je nutné zajistit předpoklad charakteristiky pomocí střední hodnoty a rozptylu pro pravděpodobnostní hustotu, která reprezentuje neurčitost stavu. Aktualizace vnitřního stavu Kalmanova filtru probíhá jako vážený průměr původního stavu a stavu nově změřeného. Jako váhy pro tuto operaci jsou použity převrácené hodnoty rozptylů zmíněných hodnot. Výsledek po korekci se nachází mezi stavem původním a nově změřeným. Při nesplnění této podmínky nelze Kalmanův filtr použít.

Kalmanův filtr tedy uděluje různou míru důvěryhodnosti jak novému měření, tak i odhadu stavu, který je průběžně přepočítáván (Winkler, 2005).

Problém při využití Kalmanova filtru nastává, pokud není pohyb robota lineární, což je v praxi velmi často. Z tohoto důvodu je využíván především rozšířený Kalmanův filtr, pro který již není problém pohyb robota po složitějších křivkách. Rozšířený Kalmanův filtr pracuje na principu linearizace, k čemuž využívá Taylorův rozvoj prvního stupně (Franěk, 2010). Výsledek této metody nemusí být vždy zcela optimální, nicméně při praktickém využití funguje celkem obstojně. Použitím vyššího stupně Taylorova polynomu docílíme ještě vyšší přesnosti. Přínos z použití vyššího stupně Taylorova polynomu není zásadní a je na úkor vyšší náročnosti výpočtu. Taylorův rozvoj prvního stupně je v dnešní době nejpoužívanější algoritmus využívaný při řešení navigačních úloh.

3 ROZBOR SENZORŮ A METOD NAVIGACE MOBILNÍHO ROBOTA

ROBOTA

V následující kapitole jsou popsány nejdůležitější senzory potřebné pro lokalizaci mobilního robota. Vedle popisu senzorů se kapitola věnuje také popisu metod souvisejících s určováním polohy robotického systému.

3.1 Lidar

Princip lidarů je velmi jednoduchý, jedná se v podstatě o bezkontaktní měření vzdálenosti. Celá soustava zařízení se skládá ze zdroje laserového záření, optické soustavy, mechanického prvku a detektoru elektromagnetického záření. Ukázky komerčních lidarů jsou zobrazeny na obrázku 3.1 níže.



Obrázek 3.1 – Různé typy lidarů (<https://acroname.com>, 2018)

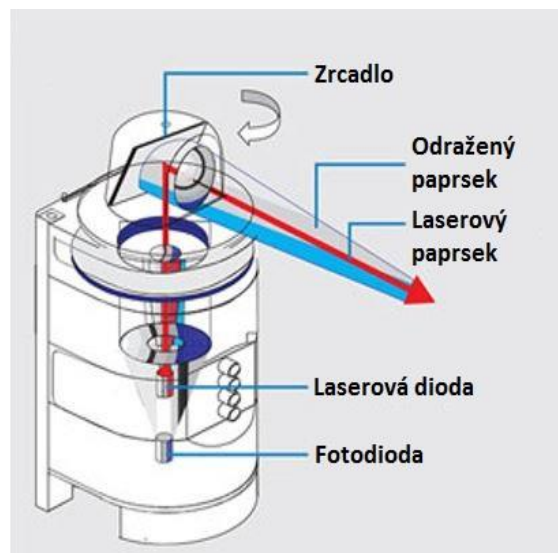
Jelikož je vzdálenost vypočítávána jako rozdíl času mezi vysláním paprsku a detekcí odrazu, obsahuje systém také velmi přesné hodiny. Existuje více druhů lidarů pro různé použití, například se může jednat o zařízení pro letecké skenování území, tedy pro geodetickou činnost. V meteorologii lze tento systém mimo jiné využít pro měření oblačnosti či ozónové vrstvy. Další typ lidarů slouží pro snímání tvaru vzorového objektu, různých přírodních útvarů nebo památek. Lidarová technologie dneska také nahrazuje klasické radary pro měření rychlosti s dosahem až 1500 metrů (Dolanský, 2004). Za velice příbuzné lidarům lze považovat armádní zařízení sloužící k vyřazení optoelektronických zaměřovacích systémů nepřítele. Tyto systémy jsou zatím nasazovány pouze zřídka, jelikož hrozí při zasažení člověka i nevratné poškození zraku.

3.1.1 Historie Lidaru

Název lidar je akronymem z anglických slov „Light Detection And Ranging“. Vývoj lidarové technologie započal před cca 30 lety. Celý systém je postupně zdokonalován a následně uváděn do komerčního provozu. Při mapování prostoru je samozřejmě nutné znát absolutní polohu snímacího zařízení. Z tohoto důvodu je součástí měřicího systému i satelitní navigace a inerciální jednotka. Inerciální jednotka zajišťuje informace o změně polohy či rychlosti a doplňuje tak systém satelitní. Obě jmenovaná zařízení jsou postupně zdokonalována a v současné době dosahují velké přesnosti. Stávají se tak nedílnou součástí zařízení pro skenování prostoru.

3.1.2 Princip funkce Lidaru

Jak již bylo řečeno, lidar se skládá z laseru, přijímacího detektoru a zrcadla, které vhodně usměřňuje světelný paprsek. Aby mohla být pokryta co největší výšeč, je nutné zmíněným zrcadlem otáčet a měnit tak směr vyzařování. Zároveň tato soustava zajišťuje koncentraci záření do velmi úzkého svazku a dále souosost zdroje záření s detektorem. Zpravidla se jedná o uskupení polopropustného hranolu a zrcadla. Princip fungování lidarů je vyobrazen na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 – Princip funkce lidarů (Anandan, 2015)

Jako zdroj laserového záření může být použito více typů laserů. V případě vyšších výkonů se jedná o pevnolátkové lasery, například rubínové. Pro nižší výkon plně dostačují lasery diodové, jejichž výhodou je jednoduchost a dobrá dostupnost na trhu se součástkami.

Rozlišujeme dva typy paprsků, a to diskrétní, kde měříme čas a spojitý, zde měříme fázový posun detekované světelné vlny. Další vlastností daného typu laseru je jeho vlnová délka, která rovněž určuje způsob využití zvoleného laseru. Pro laserové skenování se nejčastěji používá paprsek téměř infračervený nebo zelenomodrý. Infračervený je vhodný pro snímání krajiny a je pohlcován vodou. Zelený se využívá naopak k snímání vodního dna, jelikož zde k pohlcování vodou nedochází. V některých případech je možné vlnovou délku měnit a tím zvětšovat aplikační použití jednoho laseru (Dolanský, 2004). Pro příjem se využívají světlocitlivé diody, které jsou spektrálně synchronizované, mají tedy stejnou vlnovou délku jako vysílací laser. Tyto diody musí být velmi citlivé, jelikož energie světla klesá s druhou mocninou vzdálenosti.

V neposlední řadě obsahuje měřicí systém velmi přesné hodiny s odchylkou pouze 0,05 - 0,2 ns. Což odpovídá přesnosti 15 – 20 mm při vzdálenosti od měřeného objektu 500 m (Dolanský, 2004). Jak již bylo řečeno, vzdálenost je vypočítána jako rozdíl času mezi vysláním a přijetím paprsku, přesnost hodin je tedy velmi zásadní. Jelikož známe rychlost šíření světla v prostoru, není dále složité dopočítat vzdálenost od překážky. Pokud k této vzdálenosti přidáme ještě informaci o směru vyslaného svazku paprsků, dostaneme polohu detekovaného bodu. V případě použití kontinuálního režimu laseru je vzdálenost určována také za pomoci fázového posunu. Na všechny jednotlivé prvky lidarů jsou kladeny vysoké nároky, a proto je nutné před měřením zařízení kalibrovat.

Výstupní data z lidarů obsahují informace o měřené vzdálenosti a úhlu snímání, která se následně, spolu s dalšími, využívají při kompozici mapy snímaného prostředí. Způsob dalšího využití poskytovaných dat lidarem vždy závisí na povaze zamýšleného použití a obslužného softwaru.

3.2 Inerciální navigační systém

INS jednotka, jak z názvu Inertial Navigation System vyplývá, slouží k inerciální navigaci v prostoru. K určování polohy využívá senzorů poskytujících informace o zrychlení a orientaci v prostoru. Tyto senzory můžeme souhrnně označit zkratkou IMU (Inertial Measurement Unit), která zastupuje spojení více senzorů v jeden měřicí celek, jak je zobrazeno na obrázku 3.3. Konkrétně se jedná o gyroskop, akcelerometr a případně magnetometr, tedy elektronický kompas. Dle vyhotovení se inerciální systémy označují počtem stupňů volnosti neboli DOF (Degrees of Freedom). Celkový počet stupňů volnosti se určí jako součet všech os jednotlivých senzorů, v případě tříosého gyroskopu, tříosého akcelerometru a tříosého

magnetometru se bude jednat o systém s 9 ti stupni volnosti, neboli 9DOF. Inerciální navigace slouží k relativnímu určování polohy, výhodou inerciálních senzorů je provoz nezávislý na vnější referenci. Nevýhodou naopak je závislost velikosti akumulované chyby na čase, nikoliv pouze na ujeté vzdálenosti. V praxi se používají pro doplnění absolutního určování polohy, kde vykrývají jeho momentální výpadky, nebo v případě že globální určování nemůže být dostupné, například v budovách nebo na pólech Země.

Akcelerometr je zařízení sloužící k zaznamenání změny zrychlení z konstantní nebo nulové rychlosti. Gyroskop zase slouží k měření úhlové rychlosti, tedy náklonu či natočení zařízení.



Obrázek 3.3 – IMU jednotka (<http://www.clker.com>, 2018)

3.2.1 Princip činnosti

Princip činnosti inerciálních systémů vychází z vlastností klasické mechaniky a je popsán pomocí druhého Newtonova zákona, který zní:

Jestliže na těleso působí síla F , pak se těleso pohybuje se zrychlením a , které je přímo úměrné působící síle F a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa m .

Matematicky můžeme tento zákon vyjádřit dle vztahu 3.1.

$$F = m \times a. \tag{3.1}$$

Kde: F je vektor síly působící na těleso, N,

m je hmotnost tělesa, kg,

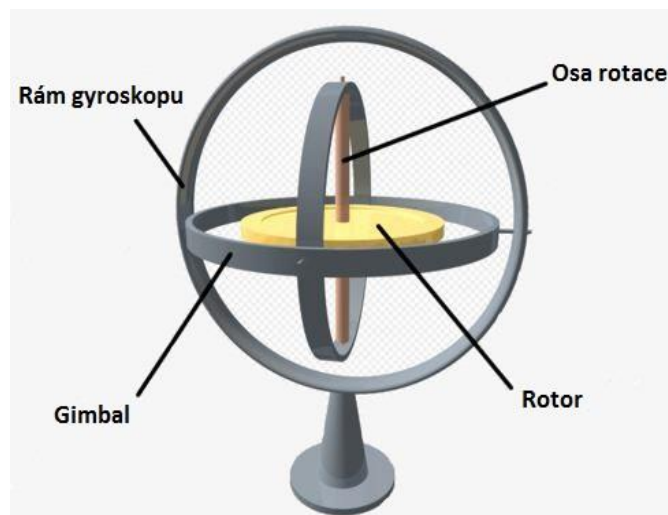
a je vektor zrychlení, $m \times s^{-2}$.

Tato rovnice vyjadřuje vektorové zrychlení ve směru působící síly. Zrychlení měříme pomocí akcelerometrů. Pokud známe zrychlení, můžeme následně pomocí první časové integrace vypočítat rychlost a poté pomocí druhé časové integrace vypočítat dráhu.

V podstatě rozlišujeme dva základní typy inerciálních navigačních systémů. Jedná se o systémy s pevnou orientací akcelerometrů v prostoru a o akcelerometry pevně spojenými se zařízením. V obou případech je pro správnou funkci inerciální navigace zapotřebí tři gyroskopy a tři akcelerometry.

3.2.2 INS stabilizované vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě

Tento typ inerciálních navigačních systémů má pevnou orientaci akcelerometrů v prostoru. Pro udržení orientace nezávisle na rotaci robota se používají mechanické setrvačníky spolu s kardanovým závěsem. Přesnost tohoto systému závisí na velikosti tření ložisek setrvačnicku a na závěsu. Pro správnou funkci je nutné stále udržovat vysoké otáčky setrvačnicku. Zjednodušeně řečeno, rotující hmota se snaží zachovávat minimální energii, díky čemuž působí proti vnějším změnám polohy této hmoty. Takovéto uspořádání bývá také označováno slovem gimbal lock, jež je vyobrazen níže na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 – Gimbal (Wikipedia, 2018)

Toto řešení patří mezi starší z obou možností a umožňuje z naměřených zrychlení jednodušší vyhodnocování změny polohy. Tento způsob měření vykazoval dlouhou dobu vyšší přesnost, jelikož se zde měří pouze zrychlení pevně orientovaných akcelerometrů. Kvůli

vysokým nárokům na přesnost a preciznost mechanické části gyroskopu jsou kvalitní gyroskopy tohoto typu dražší.

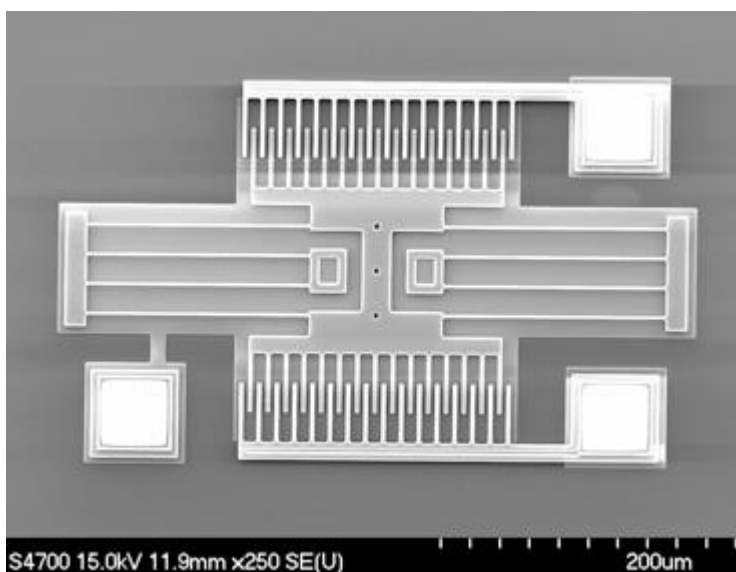
3.2.3 INS typu Strapdown

Akcelerometry pevně spojené se zařízením, označované také jako strapdown, využívají gyroskopů k měření relativního otáčení robota, nikoliv k udržení stálé orientace. Poskytují tedy informaci o rychlosti otáčení kolem jedné osy. Podle principu činnosti dělíme gyroskopy do dvou hlavních skupin, a to na optické a piezoelektrické.

- a) **Optické** můžeme dále ještě rozdělit na vláknové optické gyroskopy a kruhové laserové gyroskopy. U vláknových optických gyroskopů se rotace projevuje fázovým posunem, tento typ pro své měření využívá cívku optického vlákna. Kruhové laserové gyroskopy zase fungují na principu měření rozdílu frekvencí protisměrných paprsků, která je způsobena rotací trojúhelníkové nebo čtvercové optické dráhy tvořené několika zrcadly.
- b) **Piezoelektrické** gyroskopy využívají mikroskopické krystaly. Při působení vibrací se na těchto krystalech generuje napětí, které odpovídá danému zrychlení, tato vlastnost se nazývá piezoelektrický jev. Za pomoci tohoto jevu můžeme určit směr působení gravitace, a tedy i natočení celého systému. Tento princip měření je dnes hojně využíván zejména v oblasti přenosných elektronických zařízení, jako jsou například mobilní telefony, tablety či herní konzole. V této oblasti se dnes využívají zejména senzory vyráběné jako součástky v pouzdrech SMD, které jsou vyráběny pomocí MEMS technologie.

3.2.4 Součásti IMU

V dnešní době neustálého zmenšování součástek využíváme především senzory vyrobené pomocí technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), které jsou díky své malé velikosti vhodné při návrzích zařízení, u kterých klademe důraz na co nejmenší celkovou velikost. MEMS technologie byla vyvinuta před přibližně 20 lety a od této doby urazila ve vývoji značný kus, ať už se jedná o dosahování čím dál větší přesnosti nebo neustálé miniaturizaci součástek vyráběných právě touto technologií. Zobrazení struktury MEMS lze vidět na obrázku 3.5 níže.

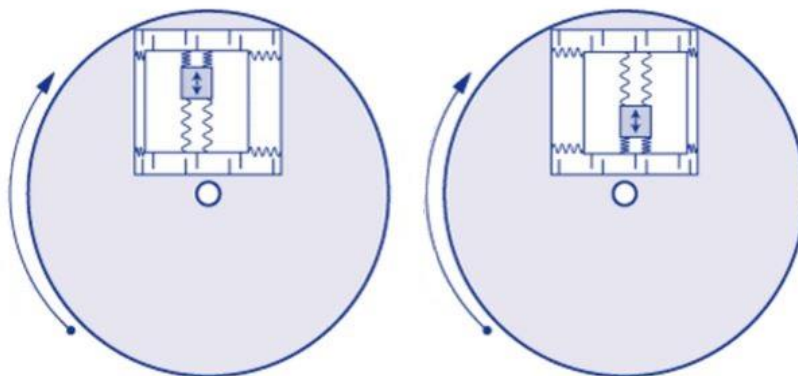


Obrázek 3.5 – MEMS struktura (<https://www.mems-exchange.org>, 2018)

Akcelerometry jsou funkčně založeny na použití tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Tento kondenzátor má jednu elektrodu uloženu volně, tak aby se mohla vlivem působícího zrychlení pohybovat. Při měnící se vzdálenosti elektrod má výsledná kapacita kondenzátoru nelineární závislost. Převádíme tedy zrychlení na kapacitu kondenzátoru, kterou můžeme snadno měřit a dále s touto hodnotou pracovat. Při vhodném konstrukčním uspořádání dokážeme měřit zrychlení ve všech třech osách, a to jak statické, tak i dynamické. V případě statického zrychlení se jedná o tíhové zrychlení, které je rovno 1 G v ose Z. Konkrétní změna pohybu je vlastní dynamickému zrychlení, které je způsobeno změnou rychlosti pohybu.

Gyroskopy využívají princip Coriolisovy síly. Coriolisova síla je zjednodušeně řečeno virtuální síla, která působí na libovolný hmotný bod, který se pohybuje určitou rychlostí v soustavě rotující kolem své osy. Díky tomuto pravidlu jsou na severní polokouli Země objekty stáčeny ve směru hodinových ručiček, kdežto na jižní naopak. Příkladem může být točení vírů při odtékání vody. Na rovníku je síla nulová, na pólech potom maximální. Stejného účinku využívá i mechanický gyroskop. Pokud se pohybující objekt zavěšený na pružinách uvnitř rámu pohybuje směrem ven, tedy k okraji rotujícího kotouče, působí na něj Coriolisova síla směrem doleva, při opačném směru pohybu objektu poté doprava. Jelikož je velikost a směr Coriolisovy síly úměrný rychlosti a směru otáčení, můžeme tento princip využít pro měření velikosti úhlové rychlosti. V případě senzorů typu MEMS jsou mechanické součásti spolu s elektrickými integrovány uvnitř čipu. Základem těchto senzorů je mechanicky rezonující prvek s konkrétní hmotností upevněný pružinami uvnitř rámu. Pokud je směr pohybu kolmý ke směru otáčení,

působí na pohybující se část snímače Coriolisova síla. Velikost této síly je úměrná úhlové rychlosti otáčení senzoru. Coriolisova síla způsobuje stlačení vnějších pružin rámu, tím dojde k vzájemnému posuvu elektrod vzduchových kondenzátorů. Princip funkce je patrný z obrázku 3.6. Změna kapacity kondenzátorů je poté úměrná velikosti úhlové rychlosti otáčení v $^{\circ}\text{s}^{-1}$.



Obrázek 3.6 – Znárodnění Coriolisovy síly (Vojáček, 2009)

Magnetometr neboli elektronický kompas je používán, pokud potřebujeme určit směr natočení konkrétní části zařízení, které se momentálně nepohybuje. Nejdůležitější součástí elektronického kompasu je magnetorezistivní senzor. Konkrétně se jedná o plíšek vyrobený z feromagnetického materiálu, jehož složení je 19 % železa a 81 % niklu (Kurc, 2009). Plíšek je zmagnetován a při nulovém vlivu vnějšího magnetického pole a daném proudu vykazuje určitý odpor. Přítomnost vnějšího magnetického pole je indikována poklesem právě tohoto odporu. Pro správné vyhodnocování vnějšího magnetického působení stačí měřit rozdíly v napětí. Jelikož je ale vnější působení magnetických sil velmi malé, jsou rozdíly v měřeném napětí v řádu tisíců voltů. Magnetometry jsou vyráběny jako tříosé a dělí se dále na skalární, schopné měřit pouze sílu magnetického pole, a vektorové, které dokáží měřit také jeho směr. Pro zlepšení vlastností je feromagnetický plíšek pokryt řadou hliníkových pásků, které zásadně mění R-H charakteristiku magnetorezistivního senzoru. Jako další nutnou úpravou pro dosažení spolehlivých výsledků je využívání můstkového zapojení. Konkrétně jsou použity dva můstky, které jsou vzájemně otočeny o 90° . Dále musí elektronický kompas kompenzovat měnící se teplotu, následkem které se mění i samotný odpor magnetorezistivního senzoru. Silné magnetické pole může změnit orientaci původního zmagnetování senzoru. S těmito všemi nástrahami je nutné při návrhu vlastního senzoru počítat, všechny zmíněné překážky berou výrobci v úvahu a v dnešní době jsou již s úspěchem kompenzovány.

3.2.5 Vlastnosti INS

Inerciální senzory dosahují v dnešní době dobré přesnosti, brát v úvahu ovšem musíme také s několika problémy, vycházejícími z podstaty funkce těchto senzorů.

Zprvce se jedná o zemskou přitažlivost, díky které akcelerometry ve svislém směru neměří jen vertikální zrychlení, ale přidávají k této hodnotě ještě gravitační složku. V následném zpracování musíme tuto složku odečíst. Při aplikaci v běžných robotických systémech můžeme počítat s konstantním gravitačním zrychlením, jinak tomu je ale například při použití v oblasti letectví.

Dalším problémem, se kterým je nutno se vypořádat, je rotace Země, která se otáčí rychlostí 15° za hodinu kolem vlastní osy a $0,041^\circ$ za hodinu kolem Slunce. Jelikož gyroskopy měří změnu orientace v prostoru, a ne vůči povrchu Země, je nutno s touto rotací počítat a při následném zpracování hodnot udělat patřičné korekce.

V úvahu také musí brát dané rozlišení a citlivost vybraných akcelerometrů. Pozvolné změny natočení či rychlosti tak mohou být pomocí inerciální navigace chybně vyhodnocovány, jelikož se užitečný signál začne ztrácet v šumu. Jistou měrou k této nepřesnosti může také přispívat nevhodně zvolený podvozek či nestabilní konstrukce robota nebo obecně pohyb po nerovném povrchu.

3.3 Odometrie

Odometrie patří mezi metody relativní lokalizace a je založena na principu měření ujeté vzdálenosti pomocí rotačních snímačů. Rotační snímače, neboli enkodéry, jsou připevněny ke kolům robota. Za pomoci naměřených údajů se poté snažíme odhadnout změnu pozice a orientace zařízení v prostoru.

3.3.1 Rotační enkodéry

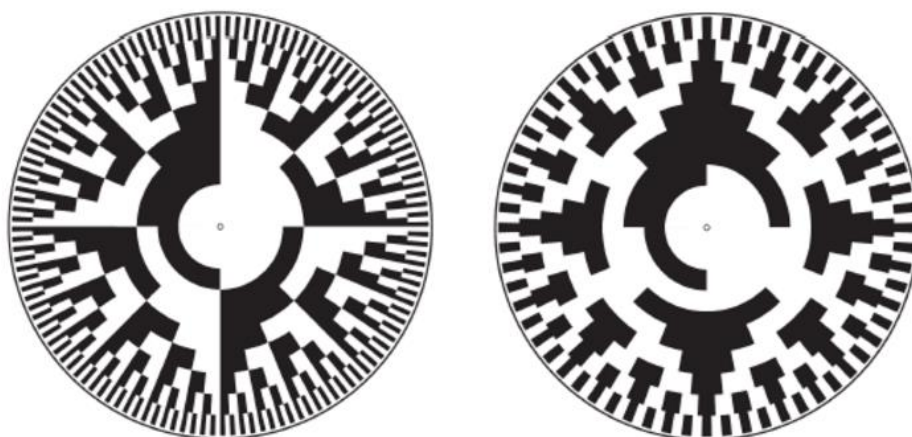
Rotační enkodéry převádějí rotační pohyb na elektrický signál, který můžeme dále zpracovávat a vyhodnocovat.

Rotační enkodéry dělíme na:

- 1) Optické
 - transmisivní, pracující na principu přerušování světelného paprsku clonkou.
 - reflexivní pracující na principu odrazu světla od reflexních plošek na kotoučku.
- 2) Magnetické – měření změny magnetického pole.
- 3) Induktivní – měření změny elektromagnetické indukce.
- 4) Odporové – princip odporových potenciometrů.
- 5) Kartáčové – princip komutátoru.

Podle funkcionality také na:

- 1) Jednakanálové.
 - 2) Inkrementální.
 - 3) Absolutní.
- **Jednakanálové** enkodéry udávají pouze informaci o probíhajícímu pohybu, nikoliv však o směru otáčení. Nevýhodou je náchylnost k šumu při nízké či nulové rychlosti, nebo náhodný stav při zastavení na rozhraní stavů 1 a 0. Z těchto důvodů se pro mobilní roboty nepoužívají.
 - **Inkrementální**, neboli kvadrurní, enkodéry poskytují informaci pomocí posunu fáze mezi dvěma kanály. Tyto enkodéry dokáží určit směr otáčení, rozlišení je zde dáno počtem bitů na otáčku a nejsou tolik náchylné na zašumění. Při zastavení mezi dvěma stavy nastává v horším případě pouze oscilace v rozmezí dvou hodnot, tedy 0 ± 1 . Vzorkovací frekvenci je nutné volit s ohledem na maximální otáčky měřeného kola, pokud je tato hodnota překročena, dochází k chybě a současné změně hodnot na obou kanálech. Inkrementální enkodéry mohou být doplněny ještě třetím kanálem, který indikuje otočení o 360° .
 - **Absolutní** enkodéry udávají absolutní úhel natočení, který je k dispozici na výstupu v jakýkoliv okamžik. Senzor může mít různé rozlišení, které závisí na počtu kanálů. Pro měření otáčení používají absolutní enkodéry většinou Grayův kód, který je zobrazen na obrázku 3.7. Při otáčení měřeného kola dochází na výstupu vždy ke změně jednoho bitu v celkovém kódu. Absolutní enkodéry mohou být kromě měření uražené vzdálenosti používány také pro měření úhlu natočení řídicích kol.



Obrázek 3.7 – Znárodnění Grayova kódu (Skalka, 2011)

Díky své přesnosti a nízké ceně jsou v mobilních robotech využívány především enkodéry optické, a to obou typů.

3.3.2 Vlastnosti odometrie

Měření pomocí odometrie je založeno na předpokladu závislosti počtu otočení kol na ujeté vzdálenosti. Při provozu jsou ovšem do měření vnášeny chyby, které dělíme na systematické a nesystematické.

Jako **systematické** chyby lze považovat drobné nepřesnosti, které se s uraženou vzdáleností lineárně akumulují. Tyto chyby lze dobře odhadnout a poté je při odhadu pozice robota brát v úvahu. Konkrétně se může jednat o rozdíly obvodů kol náprav, nedokonalostmi na povrchu kol, vzorkovací frekvenci a rozlišení enkodéru a další.

Výskyt **nesystematických** chyb je zcela náhodný a není předvídatelný. Jelikož je nemůžeme nijak odhadnout a zavést případnou kompenzaci mohou způsobit v krajním případě i selhání celkové lokalizace robota. Svou roli přitom hraje i umístění enkodérů. Výskyt nesystematických chyb bude větší ve více členitém terénu, konkrétně tedy ve venkovním prostředí. Může se jednat o ztrátu adheze a protočení kol, deformaci kola zapříčiněnou nerovnostmi povrchu či další nepřesnosti způsobené neideální povahou terénu – nerovný povrch, překážky a jiné. Vznik některých nepřesností je možné eliminovat osazením enkodéru na nehnaná kola či použit speciálně navržená kola pouze pro měření. Obecně se z tohoto důvodu využívá kombinace více systémů pro měření. Odometrie se proto kombinuje s vizuální odometrií či inerciálními jednotkami.

3.3.3 Visuální odometrie

Vizuální odometrii lze realizovat pomocí různých výpočetních metod. Jako vhodné pro použití v mobilní robotice se jeví metody SIFT (Scale Invariant Feature Transform) a SURF (Speeded-Up Robust Feature). Výhodou těchto metod je, že si vystačí pouze s kamerou s jedním objektivem.

SIFT

Metoda SIFT je založena na hledání a zaměřování konkrétních bodů v obraze pomocí vyhodnocování třídímní dat. Výhodou této metody je nezávislost na měřítku obrazu. Nositelem informací o třetí dimenzi je frekvenční spektrum obrazu, které se vypočítá pomocí obrazového Gaussovského filtru. Výsledkem této filtrace je určitý počet obrazů s rozdílným měřítkem, podle kterého se vzestupně setřídí, čímž vytvoří jednu oktávu. Z těchto oktáv je vytvořen prostor měřítek, ve kterém jsou detekovány významné body. Pomocí algoritmu se poté nachází podobnost mezi vektory extrémních hodnot, čímž se zjišťuje poloha objektu. Postupem času byla vynalezena metoda SURF, jejíž algoritmus je při zpracování dat rychlejší.

SURF

Metoda SURF je založena na extrakci zajímavých bodů z obrazu, které jsou definovány jako součet všech pixelů vstupního obrazu za pomoci Hessovy matice. Prostor měřítek je v tomto případě vytvářen jako konvoluce s aproximací z druhé derivace Gaussovy funkce. Díky této aproximaci je metoda SURF rychlejší než výše popsaná metoda SIFT a tím pádem vhodnější pro využití při navigaci mobilního robota. Metoda SURF dekoduje rozložení pixelů v okolí detekovaného prvku na odpovídající stupnici. Při extrakci významného bodu je v okolí vytvořeno čtvercové pole, které je dále rozděleno na 4 kvadranty. V těchto kvadrantech se určuje horizontální a vertikální vztah k významnému bodu, na základě kterého je vytvořen vektor, který odpovídá měřítku a orientaci významného bodu v jeho okolí. Příklad použití je možné najít např. v (Beran, 2015).

3.4 Satelitní navigace

Začátky satelitní navigace sahají do počátku 60. let, kdy se námořnictvo Spojených států rozhodlo vybudovat systém pro účely přesné navigace. První systém je nazýván Navy Navigation Satellite System nebo také TRANSIT a slouží k určení polohy amerických ponorek a navádění balistických střel. Systém TRANSIT je spuštěn roku 1964 pro armádní využití, roku

1967 je systém uvolněn pro civilní použití, kde je využíván zejména k navigaci jacht či letadel. Hlavní myšlenka se opírá o využití Dopplerova posunu frekvence, který je poprvé testován na příjmu signálu z družice Sputnik. Z předpokladu předvídatelné polohy vysílacího satelitu je možné určit polohu na Zemi pomocí přijímače, jedná se tedy o pasivní dálkoměrný systém. Vývojem a uvedením této technologie do provozu jsou položeny základní stavební kameny pro vznik celosvětového družicového satelitního systému. Ke konci roku 1996 je podpora ukončena, v tu dobu je již v plném provozu nový systém NAVSTAR GPS, který jej překonává. S určitým časovým odstupem je zahájen vývoj navigačních prostředků také v bývalém Sovětském svazu, použito je rovněž měření vzdálenosti za pomoci Dopplerova jevu. Konkrétně se jedná o projekty Cyklon, Parus a Cikada.

Všechny tyto systémy určují polohy pouze pomocí dvou souřadnic a díky tomu mají omezenou přesnost.

3.4.1 Navstar - GPS

Navstar GPS je historický první družicový navigační systém, sloužící k určování polohy kdekoliv na Zemi nebo nad Zemí s přesností na jednotky metrů a času s přesností na jednotky nanosekund. Provozován je Ministerstvem obrany Spojených států amerických, zpočátku se tedy jedná o armádní systém.

Systém GPS navazuje na předchozí projekt GNSS TRANSIT a zahájen je roku 1973, kdy jsou postupně v několika etapách vysílány družice. Nejprve se jedná o pokusné zařízení. Roku 1993 je dosaženo trojrozměrného zaměřování a dva roky poté je systém oficiálně uveden jako plně operačně způsobilý. Prvním testem je potom válka v Perském zálivu, kterou je systém GPS prověřen. 16 satelitů dokáže zaměřit polohu s přesností na 30 metrů. Na oběžnou dráhu jsou vysílány satelity v určitých sériích (blocích), až je jich roku 1994 kompletních 24.

V roce 1993 je systém uvolněn pro civilní využití, pro tuto oblast použití je však záměrně doplněn o takzvaný SA (Selective Availability) kód, jedná se o systematickou chybu, která má za následek zhoršení přesnosti na 100 m. Roku 2000 oznamuje americký prezident Bill Clinton vypnutí SA a GPS se tak stává použitelnou i pro civilní obyvatelstvo. Důvodem je možnost využívání při záchranných operacích a také technický pokrok umožňující v případě válečného konfliktu snížení přesnosti jen na určitém území. Roku 2005 je celkový počet družic rozšířen na 32, z nichž by mělo být v činnosti alespoň 24. Satelity obíhají Zemi na 6 ti orbitálních rovinách a oproti rovině rovníku jsou skloněny o 55°, vzdáleny jsou přibližně

20 000 km. Do budoucna je počítáno s vysláním nové generace družic a dojde tak k dalšímu zpřesnění určování polohy.

EGNOS

Systém EGNOS neboli European Geostationary Navigation Overlay Service slouží pro zvyšování přesnosti a spolehlivosti navigačního systému GPS a Galileo. Na území Evropy se nachází několik referenčních stanic, které měří chyby v určování polohy pomocí GNSS. Tyto chyby jsou následně přenášeny do centrálního výpočetního střediska, kde se vypočítávají diferenční korekce a zprávy o integritě. Výpočty jsou posléze přenášeny pomocí geostacionární družice do zařízení přijímajících signál GNSS, kde slouží jako rozšíření standardního signálu. Součástí přenášených dat jsou i údaje o dostupnosti a velmi přesný časový signál. EGNOS je využíván v letectví, kde pomáhá například navigovat letadla na přistání, navádění lodí v plavebních kanálech, k navigaci automobilů, geodetické činnosti či velmi přesnému zemědělství. Systém je oficiálně spuštěn roku 2009, pokrývá většinu území Evropy a spolu se systémem GPS je právoplatným předchůdcem evropského navigačního systému Galileo.

Systém EGNOS poskytuje tyto služby:

- 1) Základní služba** (Open Service - OS) je poskytována zdarma a je volně šiřitelná pro aplikace GNSS. Spuštěna byla roku 2009.
- 2) Služba kritická z hlediska bezpečnosti** (Safety of Life services – SoL) poskytuje informace o integritě, při snížení kvality signálu pod stanovenou mez tuto skutečnost během několika vteřin oznámí uživateli. Využívána je především v letecké dopravě a spuštěna byla roku 2011.
- 3) Komerční služba** (EGNOS Data Access Server – EDAS) šíří data EGNOS pomocí internetu v reálném čase, díky čemuž rozšiřuje infrastrukturu vlastního přenosu.

WAAS

Stejně jako v Evropě funguje systém EGNOS, má i Amerika svůj zpřesňující satelitní systém k GPS. Tento systém se nazývá WAAS - Wide Area Augmentation System a dokáže až pětkrát zpřesnit měření pomocí GPS, zlepšuje integritu systému, opravuje chyby GPS signálu způsobené ionosférickými poruchami a monitoruje provozní funkce a stav GPS satelitů. WAAS se skládá z několika pozemních referenčních stanic, které jsou rozmístěny po celém území USA, dvou hlavních stanic umístěných u obou pobřeží a satelitů na geostacionární oběžné

dráze. Hlavní stanice mají za úkol shromažďovat data z referenčních stanic a na jejich základě vypočítávat korekce k signálu GPS. Korekce obsahuje čas zpoždění přenosu signálu zapříčiněný vlivem ionosféry. Referenční stanice zná svoji přesnou polohu a čas, podle kterého určuje odchylku od přijímaného signálu ze satelitů GPS. Uživatelský přijímač je poté o této chybě informován. WAAS tedy dokáže zpřesnit určení polohy z původních 15 na méně než 3 metry. Jak lze vidět na obrázku 3.8, existuje více podpůrných systémů satelitní navigace (garmin.com, 2017).



Obrázek 3.8 – Mapa pokrytí podpůrných systémů satelitní navigace (Jueves, 2011)

DGPS

Systém DGPS neboli Diferenciální GPS ke své funkci potřebuje minimálně jeden přijímač GPS signálu, který se nachází na známých souřadnicích. Tato referenční stanice vyhodnocuje odchylky mezi svým skutečným umístěním a souřadnicemi získanými za pomoci výpočtů systému GPS. Na základě těchto údajů vypočítává referenční stanice korekce, které se následně pomocí internetové sítě či rádiového přenosu RDS dostávají k uživatelům. Pokud je k dispozici více propojených referenčních stanic v malé vzdálenosti od sebe, je možné další referenční stanici v blízkosti uživatele realizovat pomocí výpočtu. Referenční stanice mohou poskytovat zpřesňující informace více navigačním systémům zároveň. DGPS data jsou vysílána v datových rámcích tzv. frames, tyto rámce obsahují identifikaci stanice, typ zprávy a sekvenci korekčních dat. Vysílání probíhá na frekvenci 283,5 – 325 kHz. V České republice se nachází pouze jedna tato stanice, a to v obci Obříství na Labi (Janata, 2015).

Česká síť permanentních stanic CZEPOS obsahuje 28 stanic na území ČR a 27 příhraničních stanic okolních států. Při kódovém měření dosahuje systém přesnosti 25 cm a při fázovém měření dokonce 1,5 cm (<http://czepos.cuzk.cz>, 2018).

3.4.2 Glonass

Ruský navigační systém Glonass neboli rusky GLObalnaja NAvigacionnaja Sputnikovaja Sistěma se začíná vyvíjet v roce 1970, tedy o něco dříve než konkurenční americká GPS. Prvenství přesto zůstává již popsané GPS, jelikož je Glonass uveden do provozu až roku 1996, což je o čtyři roky později. V těchto letech systém Glonass z finančních důvodů spíše skomírá a jeho počátky jsou doprovázeny častými technickými problémy. U prvních generací družic se navíc počítá s krátkou dobou životnosti. Plné funkčnosti je dosaženo až roku 2010, kdy byly na oběžnou dráhu vypuštěny poslední z nové série družic.

Stejně tak jako GPS disponuje Glonass také 24 mi družicemi, kde je 21 provozních a 3 záložní. Stejný je i maximální možný počet viditelných satelitů v jednom okamžiku, tedy 12. Družice obíhají na střední oběžné dráze v nadmořské výšce 19 100 km a doba jednoho oběhu země činí 11 hodin a 15 minut. Rozmístěny jsou ve třech orbitálních rovinách a s rovníkem svírají úhel 64,8°. Díky tomuto je možné kdekoliv na Zemi v každém okamžiku vidět minimálně 5 satelitů (Krupka, 2014).

3.4.3 Galileo

Všechny dosud zmíněné systémy jsou budovány a provozovány jako systém vojenské, i přesto, že jsou uvolněny pro civilní použití, není možné stoprocentně zaručit jejich plnou funkčnost v případě vojenského konfliktu. Systém GPS již sice disponuje možností omezení provozu pouze nad určitým územím nicméně závislost civilních a záchranných systémů je dnes tak velká, že vyvstala otázka budování plně civilního, evropského navigačního systému. Tento systém navazuje na předchozí podpůrný doplněk systému GPS, kterým je systém EGNOS.

Evropský navigační systém Galileo je vyvíjen od roku 2002. V letech 2005 a 2008 jsou vypuštěny experimentální družice Giove-A a Giove-B, které poskytují poznatky, na jejichž základě je navržena navigační družice GalileoSat. Oficiálně začíná systém Galileo fungovat 15. prosince roku 2016, celý systém by měl být hotový do roku 2020. Po dokončení bude sestávat z celkem 30 ti družic, 27 mi provozními a 3 mi záložními. Satelity GalileoSat obíhají ve

vzdálenosti 23 222 km, na střední oběžné dráze Země po třech kruhových drahách. S rovníkem svírají úhel 56°.

Součástí systému je také rozsáhlá síť pozemních stanic sloužící ke kontrole funkčnosti systému a jeho korekcím. Hlavní střediska jsou poté v Německu a Itálii.

System Galileo je navržen s ohledem na kompatibilitu se systémem GPS, příjem z obou systémů naráz dokáže lokalizaci výrazně zpřesnit.

System Galileo poskytuje tyto služby:

1. **Otevřená služba** (Open Service - OS) je poskytována zdarma pro všechny uživatele pro určení polohy.
2. **Komerční služba** (Commercial Service - CS) na rozdíl od otevřené služby využívá ještě další dva kanály sloužící ke zpřesnění lokalizace, dodatečné informace jsou chráněny pomocí kódování.
3. **Veřejná regulovaná služba** (Public Regulated Service - PRS) je dostupná pouze pro záchranné složky, pro účely ochrany obyvatelstva, její provoz je šifrován.
4. **Pátrací a záchranná služba** (Search And Rescue service - SAR) slouží k určení polohy lodí či osob ztracených v horách, je součástí celosvětového systému nouzové lokalizace Cospas-Sarsat, kde umožňuje zkrátit dobu potřebnou pro nalezení ze současných 3 hodin na 10 minut.

Přednosti systému Galileo oproti ostatním jsou především vyšší přesnost určení polohy na Zemi. Tato výhoda je možná díky nové generaci atomových hodin na palubě navigačních družic. Oproti doposud používaným rubidiovým hodinám jsou nové vodíkové čtyřnásobně přesnější. Díky tomuto je možné určovat polohu s přesností 1 metru, pro platící zákazníky dokonce s přesností na 30 cm. Dále systém Galileo umožňuje i zpětnou komunikaci mezi zařízením na Zemi a navigačním satelitem, čehož může být využíváno při koordinaci záchranných prací (<http://www.czechspaceportal.cz>, 2018).

Dnešní přístroje pro příjem navigačních dat dokáží přijímat signál z více systémů naráz a umožňují tak zpřesnění lokalizace či překlenování nedostupnosti jednotlivých systémů.

3.4.4 BeiDou/Compass

Prvotní pojmenování navigačního systému Čínské lidové republiky zní BeiDou podle souhvězdí známého u nás jako Velká medvědice. Po rozhodnutí o změně konceptu z regionálního na globální navigační systém dochází také ke změně názvu na Compass. V roce 2015 je systému navráceno jeho původní pojmenování BeiDou.

V roce 2000 jsou vyslány experimentální družice Beidou 1A a Beidou 1B, následně poté v roce 2003 ještě Beidou 2A která má být jako záložní. V tomto okamžiku se jedná o regionální navigační systém sestávající ze tří a jedné záložní geostacionární družice označován jako BeiDou-1. Schopnost lokalizace na zemském povrchu je omezena pouze na území Číny. Systém pracuje na principu aktivní lokalizace, kde musí uživatel požádat o vypočítání své polohy družici, ta požadavek doplněný o přesný čas přijetí následně posílá do pozemní stanice, kde probíhá výpočet v 2D prostoru, ke kterému je přidána nadmořská výška z digitálního modelu terénu. Výsledná pozice je opět pomocí satelitu předána uživateli. Jak je již zřejmé, tak počet uživatelů je omezen. V roce 2012 se stává systém plně pasivním, kde výpočet probíhá v přijímacím zařízení uživatele na Zemi, jejichž počet od tohoto okamžiku není nijak omezen.

Do budoucna je počítáno s rozšířením systému na globální, s celkovou skladbou 35 družic. 27 satelitů bude obíhat na střední oběžné dráze, stejně jako u ostatních navigačních systémů, 5 družic bude poté na geostacionární dráze a zbylé 3 na dráze geosynchronní. Tento globální navigační systém je označován jako BeiDou-2 a má poskytovat služby ve dvou úrovních s různou mírou přesnosti. Pro veřejnost bude možné určit polohu na území Číny s přesností do 10 metrů, druhá, autorizovaná úroveň bude sloužit pro vojenské účely a dosahovat vyšší přesnosti.

Vysílání systému je částečně kompatibilní se systémy GPS, Glonass i Galileo kde Čína s jejími provozovateli spolupracuje (<http://www.czechspaceportal.cz>, 2018).

3.4.5 IRNSS

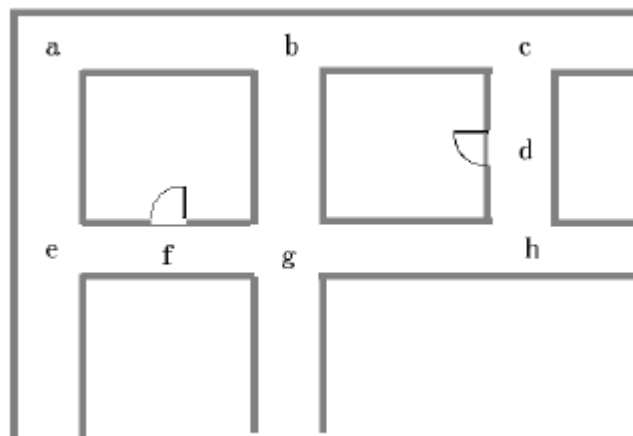
Indický navigační systém neboli Indian Navigation Satellite System (IRNSS) je vyvíjen jako regionální navigační systém pro Indii. Systém je budován od roku 2006 a skládá se ze 4 satelitů na geosynchronní oběžné dráze a 3 na dráze geostacionární ve vzdálenosti 36 000 km. Poslední satelit je vyneseno roku 2016 a celý systém se tak stává plně operačně schopným. Další dva satelity jsou připraveny na zemi jako záložní. IRNSS poskytuje dvě úrovně služby, jedna

je volně dostupná pro určování polohy a druhá je šifrovaná pro autorizované uživatele či armádu. Přesnost lokalizace je na indické pevnině lepší než 10 metrů (<http://www.czechspaceportal.cz>, 2018).

3.5 Navigace pomocí rádiových vysílacích modulů RFID

Pokud chceme provozovat robota v předem známém prostředí, je možno na podlahu připevnit systém bodů, pomocí kterých se bude robot orientovat. Na podvozek robota se poté připevní anténa s kruhovou polarizací, která bude jednotlivé prvky detekovat.

Vhodné pro toto je použití technologie RFID – Radio Frequency Identification - kdy na podlaze jsou umístěny cívky a na spodní části robota aktivní anténa. Tento způsob využití včetně zvoleného uspořádání s jednou cívkou na každém místě neumožňuje zjištění směru přejetí přes značku, lze tedy detekovat pouze průjezd nikoliv orientaci značky. Značky připevněné na podlaze jsou pasivní prvky, které získávají energii potřebnou pro vyslání odpovědi z integrované cívky. Energie vyslaná anténou na robota napájí tento pasivní RFID bod, který díky získané energii dokáže odeslat odpověď zpět k robotu. Přijímaná data obsahují ID číslo značky na podlaze, díky němuž robot ví, kde se právě nachází. Uložená mapa použitých ID čísel musí být součástí softwaru robotické platformy. Nákres této mapy je zobrazen na obrázku 3.9, umístění jednotlivých značek je označeno písmeny a-h.



Obrázek 3.9 – Mapa RFID značek (Peng, 2012)

Robot se při svém pohybu rozhoduje o změně směru právě při přejetí RFID značky, která slouží jako jakýsi milník. Dle ID jednotlivých značek robot vybírá z přípustných změn směru jízdy pro dalších pohyb. Využití této technologie popisuje práce (Peng, 2012). Pro

bezkolizní provoz je nutné robota dále vybavit senzory pro detekci překážek spolu s adekvátním vyhodnocením měřených dat.

3.6 Orientace v prostoru za využití wifi

V dnešní době patří pokrytí vnitřních prostor bezdrátovou technologií WIFI spíše ke standardu nežli k výjimce a lze mimo standardních služeb, jako je přístup k internetu nebo vnitřní síť využít i jiným způsobem. Jednat se může například k lokalizaci zařízení k této síti připojených, či orientaci autonomního robotického systému.

Pro lokalizaci lze využít měření výkonové úrovně signálů za předpokladu, že není řízena nějakým nadstavbovým systémem přístupového bodu. Pro úspěšnou lokalizaci je potřeba vhodného rozmístění přístupových bodů, ovšem i tak může chyba měření dosahovat i několika metrů. Pro vyhodnocení dat je nutné použití statistických metod. Určováním polohy pomocí sítě WIFI přístupových bodů se zabývá diplomová práce (Šafařík, 2010).

4 SLAM

Zkratkou SLAM neboli Simultaneous Localization And Mapping se rozumí mapování prostoru v reálném čase včetně určování lokalizace robota v tomto prostoru. Roku 1991 začíná tento obor prací Leonarda a Durrant-Whyta, kteří ve své práci popisují propojení pohybu robota spolu s mapováním okolí (Soren, 2018). Právě správná fúze dat polohy měřicí platformy a skenu okolí je nezbytná pro úspěšnou tvorbu mapy. Díky pokroku na poli robotiky v posledních letech zažívá i SLAM prudký vzestup. Použití této metody se vyloženě nabízí, pokud je potřeba tvořit prvotní mapu území, jež není pokryto systémem GNSS nebo při mapování vnitřních prostor, kde systémy satelitní navigace nezaručují přesnou lokalizaci. Metoda SLAM znamená mimo jiné pro robota jednu z možností vnímání svého okolí, ve kterém se pohybuje či s ním jinak interaguje.

4.1 Popis funkce SLAM

SLAM je tedy celkem rozsáhlý obor zahrnující oblasti elektroniky, robotiky, matematiky a statistiky. Cílem procesu SLAM je využití okolí pro určení lokalizace robota v prostoru s následnou aktualizací v dalším čase včetně tvorby mapy okolního prostoru. V praxi se můžeme setkat s tvorbou mapy ve dvou i třírozměrném prostoru. 2D mapa prostoru vytvořená pomocí SLAM je zobrazena na obrázku 4.1. Základním problémem tohoto oboru je správná interpretace dat ze sensorů, příslušné matematické výpočty a následně tvorba mapy neznámého okolního prostředí. SLAM není jediný algoritmus nebo přesný postup, Jedná se o celý obor skládající se z více částí, které mohou být různě upravovány či doplňovány. Nejrozšířenějším jádrem procesu výpočtu je EKF neboli rozšířený Kalmanův filtr, o kterém je napsáno více v kapitole 2.3. Tento výpočet je zodpovědný za aktualizaci odhadu polohy robota na základě orientačních bodů. Rozšířený Kalmanův filtr dále sleduje odhad nejistoty pozice robota a také nejistotu určení polohy orientačních bodů. Použití EKF snižuje výpočetní dobu opravné fáze a tím umožňuje fungování SLAM v reálném čase. Celý algoritmus SLAM je dimenzionálně dynamický a jeho složitost roste s počtem řešených funkcí, výpočetní čas celého vzorku je tedy proměnlivý.

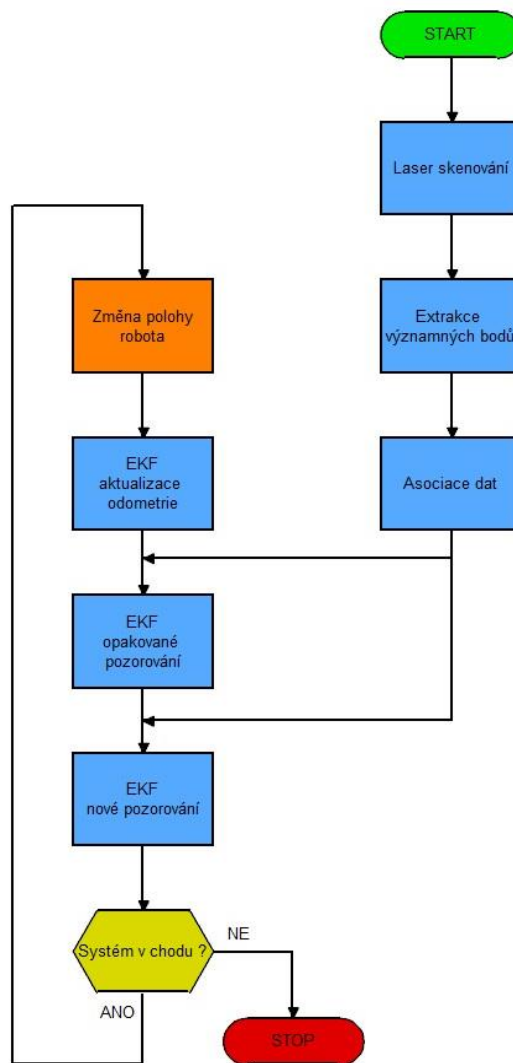


Obrázek 4.1 – Obrázek 2D mapy získaný pomocí metody SLAM (Noury, 2013)

Proces SLAM můžeme zevrubně rozdělit na tyto kroky:

1. Extrakce orientačních bodů z okolního prostředí.
2. Asociace dat.
3. Odhad stavu.
4. Aktualizace stavu orientačních bodů.

Celý tento proces se cyklicky opakuje a je znázorněn na blokovém schématu na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 – Blokové schéma procesu SLAM

Jednotlivé kroky celého procesu budou dále podrobněji popsány.

4.1.1 Extrakce orientačních bodů z okolí

Proces SLAM začíná získáním dálkoměrných dat z okolí a jejich zakreslením do mapy. Jelikož se robot při mapování pohybuje, je nutné tento pohyb zaznamenávat za pomoci odometrie či inerciální jednotky a dále jej analyzovat. Při postupné tvorbě mapy se musí brát v úvahu tato změna polohy robota, která má vliv na každé další umístění bodů do celkové mapy okolí. Určování polohy robota vůči okolí je dále zpřesňováno pomocí sledování určitých, dobře zaznamatelných bodů s výraznou geometrickou informací v právě tvořené mapě. Vybrané body musí být dobře pozorovatelné z více úhlů pro použití po změně polohy robota v dalších krocích procesu, kdy je zapotřebí stanovit, zdali nebyl daný bod již sledován dříve. Orientační body se dle anglického pojmenování nazývají Landmarks. V tomto určování polohy

podle orientačních bodů lze pozorovat jistou analogii k principu orientace u lidí, který je obdobný. Po výběru konkrétních orientačních bodů přichází na řadu jejich extrakce z měřených dat. Mezi nejčastěji používané algoritmy pro extrakci orientačních bodů s laserem skenovaných dat se řadí Spikes a RANSAC (Soren, 2018).

Algoritmus **Spikes** je navržen pro extrahování orientačních bodů z laserových nebo sonarových snímačů poskytujících měření ve více úhlech. Princip funkce této metody spočívá v nalezení podstatných rozdílů měřených vzdáleností mezi sousedními úhly měření. Značná rozdílnost sousedních vzdáleností naznačuje na geometrickou nespojitost, kterou lze využít jako orientační bod. V prostoru ohraničeném rovnými plochami algoritmus selhává. Tato metoda má rovněž problémy, pokud se v prostoru nacházejí lidé, kteří mohou být chybně voleny jako orientační body. Závěrem lze říci, že algoritmus Spikes je sice jednoduchý, zato málo robustní.

Oproti tomu metoda **RANSAC** (Random Sampling Consensus) využívá extrakci přímky jako orientačního bodu z měřených dat. Nejlepší řada bodů je vybírána za použití aproximace metodou nejmenších čtverců. Po dokončení výpočtu MSE zkontroluje algoritmus RANSAC, kolik bodů odečtených laserem tvoří zvolenou přímku, pokud je počet bodů nad určitou hranicí můžeme bezpečně předpokládat, že vidíme přímku. Této prahové hodnotě se říká konsenzus. Při použití metody RANSAC nečiní přítomní lidé problém, jelikož nejsou algoritmem vyhodnoceny jako přímka (Soren, 2018). Proces extrakce bodů lze popsat následujícím algoritmem.

Pokud

- Existují jednotlivé body poskytnuté laserovým měřením.
- Počet bodů je větší než konsenzus.
- Je provedeno méně než N pokusů o nalezení přímky.

Poté

1. Je zvoleno náhodné zobrazení vyčtených bodů z laseru.
2. Z dat se náhodně vybere S bodů ve výšce o D stupních.
3. S použitím těchto S bodů a počátečních dat se vypočte hodnota nejmenších čtverců, která nejlépe postihuje přímku.
4. Je zjištěno, kolik bodů leží v rozmezí X centimetrů od stanovené přímky.

Pokud je počet bodů, tvořících přímku, větší než konsenzus C , jsou provedeny následující kroky

- a) Ze všech původních bodů je pomocí MSE vypočtena nejlepší přímka, dále je ověřeno, že se tato přímka shoduje s přímkou nalezenou v předchozích krocích.
- b) Tato přímka je přidána mezi již dříve extrahované přímky.
- c) Z celkového počtu bodů jsou odstraněny body ležící na nalezené přímce.

Použité parametry:

N – Maximální počet pokusů pro nalezení přímky.

S – Počet bodů pro prvotní výpočet přímky.

D – Použitá výseč bodů ve stupních ze všech skenovaných dat.

X – Maximální vzdálenost bodu od přímky, v které má být obsažen.

C – Minimální počet bodů reprezentující přímku.

4.1.2 Asociace snímaných dat

Asi největší problém při skladbě snímaných dat nastává při opětovném pozorování stejného místa, se stejným, vybraným orientačním bodem. Tímto je myšlen konkrétně případ, kdy se vracíme do stejného prostoru, kde byl již v minulosti vybrán orientační bod, který je nyní nacházen znovu, a to častokrát pod jiným úhlem, a tedy i s jiným pozadím než prvně. Z tohoto vyplývá opodstatnění nutnosti jedinečnosti a možnosti opětovného nalezení orientačního bodu ve svém okolí. Algoritmus musí při opětovném určení správně rozeznat stejný bod a určit ho stejně jako při minulém průzkumu a umožnit tak správné napojení a konzistentnost generované mapy prostoru. Právě špatné spojení orientačního bodu s dříve viděným orientačním bodem může mít devastující následky při dalším procesu, protože si robot bude „myslet“, že je jinde, než se právě nachází. Z těchto důvodů jsou použita pravidla pro asociaci snímaných dat. Orientační body jsou ukládány do společné databáze, tato databáze je obvykle zpočátku prázdná. Aby mohl být orientační bod považován v procesu SLAM za správný, je třeba jej detekovat vícekrát, až poté je uložen do databáze orientačních bodů. Tímto pravidlem jsou eliminovány případy, kdy je detekován špatný orientační bod. Mezi validační pravidla patří následující body.

1. Po získání nových laserových dat jsou extrahovány všechny viditelné orientační body.
2. Každý extrahovaný bod je připojen k nejbližšímu orientačnímu bodu v databázi, který byl již vícekrát detekován.
3. Každá z těchto dvojic (extrahovaný orientační bod a orientační bod v databázi) je ověřena pomocí ověřovací brány.
 - a) Pokud dvojice projde validační bránou je zvýšeno číslo udávající počet detekcí orientačního bodu v databázi.
 - b) Pokud dvojice validační bránou neprojde, je orientační bod přidán jako nový do databáze a číslo udávající počet detekcí je nastaveno na 1.

Tato technika, kdy je orientační bod přidružován k nejbližšímu orientačnímu bodu v databázi, se nazývá přístup nejbližšího souseda. Nejjednodušší způsob, jak stanovit nejbližší orientační bod v databázi, je vypočet Euklidovské vzdálenosti mezi nalezeným orientačním bodem a orientačním bodem v databázi. Validací brána pracuje se skutečností, že implementace EKF je vázána na neurčitost pozorování orientačního bodu. Tímto lze určit, zdali pozorovaný orientační bod spadá do oblasti nejistoty orientačního bodu uloženého v databázi (Soren, 2018).

4.1.3 Aktualizace stavu pomocí EKF

Rozšířený Kalmanův filtr se pro účely SLAM využívá pro odhad pozice robota v prostoru na základě využití dat z odometrie a pozorování orientačních bodů v okolí. Pro využití v SLAM EKF využívá soustavu matic a matematických vzorců. Celý proces lze shrnout do následujících tří kroků.

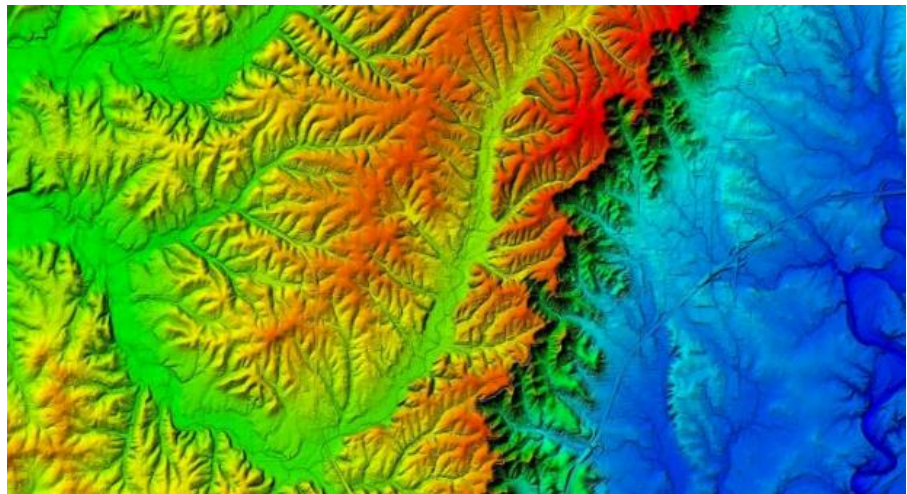
1. Aktualizace odhadu aktuální polohy pomocí dat z odometrie.
2. Aktualizace odhadu aktuální polohy na základě opětovného pozorování orientačních bodů.
3. Přidání nových orientačních bodů k aktuální poloze robota.

V prvním kroku je k původní poloze robota připočítán údaj o změně polohy či rotaci a následně je vypočítána pozice nová. V druhém kroku jsou zohledněny orientační body, které byly již vícekrát nalezeny a jsou tedy považovány za spolehlivé. Na základě těchto orientačních bodů je stanoven odhad polohy, který se obvykle od polohy, kterou algoritmus určí, na základě

právě viděných orientačních bodů liší. Tento rozdíl je nazýván změna. Následně je aktualizována také nejistota všech pozorovaných orientačních bodů. Ve třetím kroku jsou k aktuální pozici robota a okolního prostředí přidány nové orientační body. Přidání nových orientačních bodů se provádí na základě informací o aktuální poloze robota a vztahu mezi novými a již použitými orientačními body. Vlastní princip fungování EKF je blíže popsán v kapitole 2.3.

Výsledná mapa je poté tvořena jako mapa obsazení neboli Occupancy grid. Jednotlivé buňky této mapy mohou nabývat v průběhu mapování jednoho ze tří stavů. Konkrétně se jedná o stavy obsazeno, volno nebo neznámé.

Ukázka výsledku mapování území je ve formě 3D obrazu reliéfu krajiny zobrazen na obrázku 4.3. V tomto případě je krajina snímána pomocí lidaru připevněném na letadle, reliéf obrazce je poté znázorněn pomocí barevného vyjádření dálkoměrných dat.



Obrázek 4.3 – 3D SLAM krajiny (<http://woolpert.com>, 2018)

Data pro mapové podklady mohou být snímána mimo letadla také mobilním robotem na zemi, automobilem vybavenými potřebnou aparaturou či dalšími způsoby, mezi které může patřit i snímání na jiných planetách. SLAM je využit například při mapování povrchu Marsu. Automobil uzpůsobený pro snímání za pomoci lidaru je zobrazen na obrázku 4.4 níže.



Obrázek 4.4 – Automobil s instalovaným lidarem pro snímání okolí (Howell, 2013)

Získávání dat probíhá z více nespolehlivých zdrojů, je proto nutné zajistit jejich správné softwarové vyhodnocení. Více je o této problematice napsáno v kapitole 2.3. Výpočetní náročnost v podobě souběžného určování polohy platformy a tvorby mapy okolí určuje jisté nároky na výpočetní výkon zařízení. Vhodné je především užití vícejádrových procesorů a dostatečné operační paměti. Celý výpočetní cyklus je poté výhodné rozdělit do více vláken pro dosažení výpočtů v reálném čase, jež jsou pro tuto metodu žádoucí.

Dle způsobů tvorby mapy SLAM dělíme na online a offline. V případě online metody je mapa aktualizována na základě nových údajů za odhadu pravděpodobnosti a starší údaje jsou často zahazovány. Při offline metodě mapování je průběžně přepočítáván i odhad celé předchozí trasy, tedy i celou, dosud vytvořenou mapou. Druhá metoda je náročnější na výpočet, kvůli čemuž je v praxi využíváno přepočítávání po větších částech najednou, výsledek je ale také přesnější.

4.2 Zařízení pro skenování okolí

Za účelem získávání dat potřebných pro tvorbu mapy můžeme použít více senzorů či celých měřicích celků. Pro účely skenování okolí je zprvu hojně používán sonar. Výhodou sonaru je především nízká cena, která je ovšem vykoupena horšími výsledky měření.

Vhodnější alternativou je použití laserového dálkoměru. Přednosti laserových skenerů jsou především přesnost měření a snadno zpracovatelný výstup dat, nevýhodou poté vyšší cena. Mezi tato zařízení se řadí také lidary, které jsou popsány v kapitole 3.1 výše. Pro mapování více hladin rozdílné povahy současně se využívá systém DIAL (Differential Absorption Lidar).

Tento systém vysílá více paprsků naráz s různými vlnovými délkami pro detekci různých materiálů či prostředí.

Třetí možností, jak zaznamenávat okolní předměty, je využití kamery. Jednat se může o kameru s jedním či více objektivy případně doplněnými dalším pomocným zařízením. Měření vzdáleností poté probíhá buď za pomoci projekce pomocných bodů v infračerveném spektru, nebo zpracováním čistě obrazových dat. Druhá možnost je značně výpočetně náročnější, nicméně vystačí s obyčejnou kamerou. Článek A. J. Davisona z univerzity Oxford (Davison, 2002) popisuje právě využití běžné kamery s jedním objektivem pro účely SLAMu.

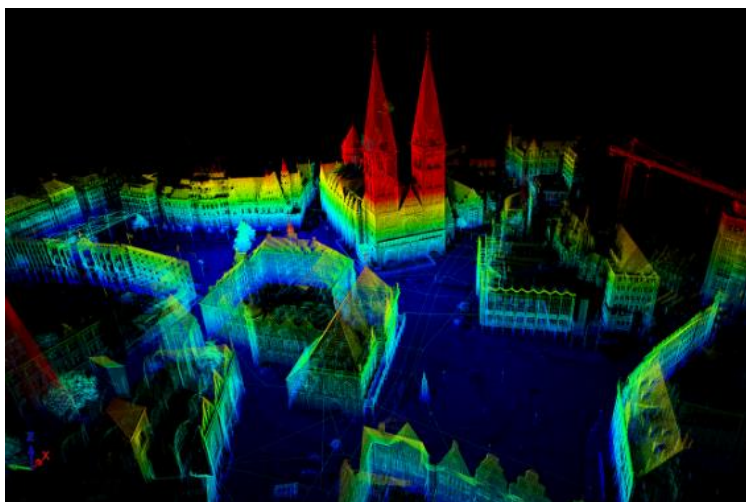
4.3 Další využití SLAM

Lidarová technologie spolu s detekcí předmětů je dnes součástí některých automobilů vyšší třídy, kde zajišťuje bezpečnost v provozu. Jedná se především o detekci jiných účastníků provozu, či předmětů nacházejících se v blízkosti vozovky nejen ve slepém úhlu zorného pole řidiče. Systém detekce překážek v dopravě je zobrazen na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5 – Lidar jako bezpečnostní prvek automobilu (Warburton, 2017)

Snímání lidarem není určeno pouze pro tvorbu map či návrh bezpečnostních systémů, ale lze se s ním setkat i v jiných oborech. Jako příklad lze uvést snímání a 3D modelování různých objektů, například historických budov či jiných památek. Výsledek práce je poté vidět na obrázku 4.6. níže.



Obrázek 4.6 – Modelování budov pomocí lidarů (Nuechter, 2016)

Pro měření a zaznamenávání skladby ovzduší, stejně tak jako pro mapování pobřežních ploch, se využívá již zmíněný systém DIAL. V případě mapování pobřežních oblastí jsou použita dvě záření současně, a to infračervené a modrozelené. Infračervené záření poskytuje data pro tvorbu modelu vodní hladiny a modrozelené pro tvorbu mořského dna, jelikož není tato část spektra pohlcována vodou.

Využití modelování pomocí SLAM má velký potenciál s ohledem na budoucnost. Dá se říci, že umožňuje interakci mezi reálnými a virtuálními objekty. Užitím digitalizace objektů provádíme jakýsi převod z reálné do digitální podoby, ve které s nimi můžeme dále pracovat. Propojení s právě vyvíjenou virtuální realitou se více než nabízí.

Laserovým skenováním prostředí a tvorbou 3D mapy se zabývají práce (Chmelař, 2015) a (Chmelař, 2016).

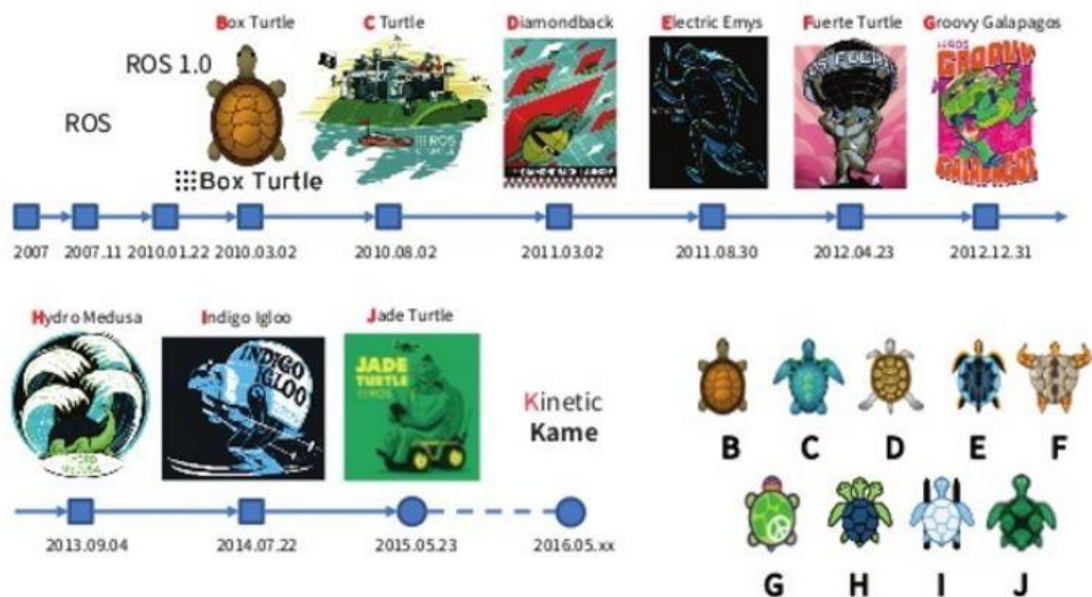
5 ROS

ROS neboli Robotic Operation System je modulární robotický operační systém. Jedná se o ekosystém skládající se z mnoha částí, které si může uživatel libovolně kombinovat či doplňovat částmi svými. ROS je rozsáhlý projekt s mnoha přispěvateli cítící potřebu otevřeného sdílení projektů vedoucí k rychlejšímu pokroku na této scéně. Výzkumnou komunitu tvoří desítky tisíc uživatelů napříč celým profesním spektrem po celém světě. Součástí jsou lidé, kteří mají robotiku jako svoje hobby, lidé, navrhující velké průmyslové systémy stejně tak jako lidé zabývající se vědeckou činností na univerzitách nebo v soukromých laboratořích.

5.1 Historie ROSu

Základní kameny ROSu jsou položeny na Stanfordské univerzitě roku 2000 programy STanford AI Robot (STAIR) a Personal Robot (PR), jež jsou prototypové flexibilní dynamické systémy určené pro robotiku. Roku 2007 přechází vývoj konceptů pod společnost Willow Garage, která je technologickým inkubátorem. Zde dostává systém své pojmenování ROS a původní projekt PR je od této chvíle vyvíjen pod názvem PR2. Projekt je dále podpořen mnoha výzkumníky, kteří přispívají svým časem i odbornými znalostmi k vytvoření základní podstaty systému ROS, včetně stěžejních softwarových balíčků za použití dobře ověřených implementací. Celý projekt je volně šířen pod open-source licenci BSD, která se stává základem pro další tvorbu v tomto odvětví. Od počátku je systém vyvíjen v mnoha institucích po celém světě, z nichž některé pro výzkumné účely obdrží od společnosti Willow Garage roboty PR2, jež se mají stát univerzální platformou pro vývoj v tomto odvětví. Pro šíření vytvářených částí je využíván takzvaný federovaný model, který je jednou z mnoha předností celého ROSu. Zdrojové kódy nejsou uloženy na jednom centrálním místě, nýbrž se o ně starají sami tvůrci pomocí vlastních repozitářů, které aktualizují a starají se o ně. Toto samozřejmě platí, pokud autoři své kódy zpřístupní pro veřejnost, která si je může z těchto repozitářů následně stahovat. Odměny pro autory kódu potom mohou být přínosné zpětné vazby umožňující další rozvíjení programů či uznání a cenné reference. V roce 2013 je vývoj jádra spolu s údržbou systému přesunut do společnosti Open Source Robotic Foundation (OSRF) (<http://www.ros.org/history/>, 2018).

S postupem času jsou uvolňovány jednotlivé distribuce systému, seznam všech dostupných je uveden níže. Jak lze vidět na obrázku 5.1, k jednotlivým distribucím se vždy váže ikona, jejímž základem je želva. Tato tradice je inspirována první verzí systému a v různých adaptacích pokračuje dále.



Obrázek 5.1 – Distribuce systému ROS (<http://wiki.ros.org/Distributions>, 2018)

Doporučovaným systémem je v době psaní této práce verze Kinetic Kame, pro kterou je také dostupná rozsáhlá podpora. Novinka Melodic Morenia je zatím v experimentálním provozu a je určená především pro Ubuntu 18.04 Bionic.

5.2 Popis ROSu

Hlavním cílem ROS v celé jeho podobě je usnadnění práci vývojářům robotických systémů. Tento fakt je podtržen licencí open-source pro poskytnuté kódy stejně tak jako mnoha vytvořenými knihovny usnadňujícími implementaci jak softwarových, tak hardwarových částí celého systému. I přes název robotický operační systém není ROS operačním systémem jako takovým, pro svůj běh potřebuje instalaci standardního operačního systému jako je například Linux Ubuntu. Správné označení systému Ros je framework. ROS framework tedy zprostředkovává všechny funkce, které chceme, aby robot vykonával včetně nízkoúrovňové

kontroly a abstrakce hardwaru, komunikace mezi jednotlivými procesy, řízení pohybu či navigace čímž výčet rozhodně nekončí. ROS dále umožňuje provozování distribuovaných modulů na více počítačích současně. Vlastní systém sestává z mnoha balíčků, které jsou základními stavebními kameny při tvorbě řídicího programu, a jejich volbou určujeme právě budoucí vlastnosti robota. Jednotlivé části systému se propojují až po spuštění a způsob jejich vlastní komunikace je velmi univerzální. ROS není Real-Time platformou, tou se stala až verze ROS 2, která mimo možnost výpočtů v reálném čase přináší vylepšení, mezi které patří dále například zvýšení zabezpečení nebo dynamická správa paměti. ROS 2 lze tedy použít pro potřeby vývoje autonomních systémů či průmyslového řízení s vyššími nároky na výpočty. Systém ROS je tříúrovňový systém skládající se ze souborové, výpočetní a komunitní úrovně.

5.2.1 Souborová úroveň

Tato úroveň se zabývá především soubory na disku, které dle jejich určení dělíme na následující:

- **Packages** jsou základním stavebním prvkem celého systému ROS, pod tímto názvem se můžou skrývat různé součásti systému. Balíčky tvořící jádro systému jsou šířeny pod již zmíněnou licenci BSD, typ licence ostatních balíčků je vždy na jejich autorovi. Balíčky mohou obsahovat knihovny, konfigurační soubory, vlastní kódy programu či jiné datové sady, a především uzly neboli nodes, které budou popsány dále. Jeden package může obsahovat víc spustitelných souborů, tedy z něho může vzniknout více nodů. Ucelený soubor více packagů, které tvoří dohromady nějakou funkci, se nazývá stack. Stack má také svůj manifest.
- **Metapackages** jsou jakési softwarové virtuální balíčky, které mají za úkol odkazovat na jiné balíčky a které spojují do jednoho celku. Obsahují pouze jakýsi package manifest.
- **Package manifest** je soubor ve formátu XML, který definuje vlastnosti jako je jméno, verze, licence, autoři, závislosti na jiných balíčcích či další informace balíčku.
- **Message types** slouží k definici zpráv, jež mezi sebou posílají jednotlivé procesy napříč systémem ROS. Tyto definice si může uživatel vytvořit sám.
- **Service types** popisují datové struktury požadavků a odpovědí. Jejich definice je obdobná jako u zpráv.
- **Repositories** jsou datová úložiště, nacházející se po celém světě, na kterých jsou přístupné ke stažení jednotlivé balíčky.

5.2.2 Výpočetní úroveň

Všechny procesy, které dohromady zpracovávají data, tvoří síť. Této síti se říká výpočetní graf. Výpočetní graf popisuje strukturu vlastní instance systému ROS, je typu P2P neboli klient-klient. Jednotlivé části systému fungují nezávisle na sobě a nemusí vědět, co se děje ve zbytku systému. Komunikace v systému ROS je tvořena anonymním publikováním, odebíráním zpráv pomocí témat, která jsou odesílána nebo přijímána z uzlů. Data jsou poté zasílána ve zprávách.

- **Nodes** slouží k výpočtům jednotlivých činností, jako je například odometrie, lokalizace nebo ovládání robota. Vlastní typ nodu je dán balíčkem, ze kterého pochází. Způsob používání těchto nodes je silnou stránkou celého systému, kterému tímto zaručuje značnou robustnost a univerzálnost. V případě poruchy jednoho nodu není postižen zbytek systému, který může nadále vykonávat svou činnost. Jednotlivé nodes spolu komunikují pomocí topics, services nebo parameter server.
- **Master** umožňuje vyhledávání a spojování nodes mezi sebou vedoucím k navázání komunikace. Dále pro všechny ostatní části výpočetního grafu pojmenovává a registruje služby. Spojení je navazováno zpočátku přes mastera, poté spolu již nodes komunikují přímo. V neposlední řadě patří mezi činnosti mastera také udržování přehledu o všech publishers a subscribers.
- **Parameter server** používají nodes k ukládání a čtení parametrů za chodu. Tento sdílený slovník je globálně dostupný pro potřeby jednotlivých nástrojů, které ho mohou měnit podle své potřeby.
- **Messages** jsou prostředky komunikace mezi jednotlivými nodes, které tyto zprávy publikují pomocí topic. Pro úspěšnou komunikaci mezi nodes je nutné dodržení shodnosti typu jednotlivých zpráv.
- **Topic** jsou místa, kde dochází k výměně zpráv mezi jednotlivými nodes. Při komunikaci nevědí nodes s kým komunikují, jelikož jsou publishers i subscribers používány anonymně. Pro přenos zpráv je využíván protokol TCP/IP nebo UDP. Podle toho, jak nodes na topic přistupují, se dělí na publishers – přispěvatele a subscribers – odběratele. Komunikace probíhá asynchronně, jednat se může například o stream dat z laserového scanneru.
- **Services** představují další způsob výměny informací mezi nodes a zprostředkovávají odpovědi na požadavky, což topic díky své anonymitě neumožňují. Synchronní komunikace je zde typu klient-server, kdy autor požadavku čeká na příchozí odpověď.

- **Bags** umožňují ukládat a následně přehrávat předem zvolené zprávy. Pro jednodušší práci s těmito soubory jsou k dispozici různé vizualizační nástroje, umožňující volbu zachytávaných zpráv a jejich následné přehrání pro účely analýzy. Pozdější přehrávání bagu umožňuje simulovat práci nodu, používá se například při pozdějším vytváření map z nasbíraných dat.

5.2.3 Komunitní úroveň

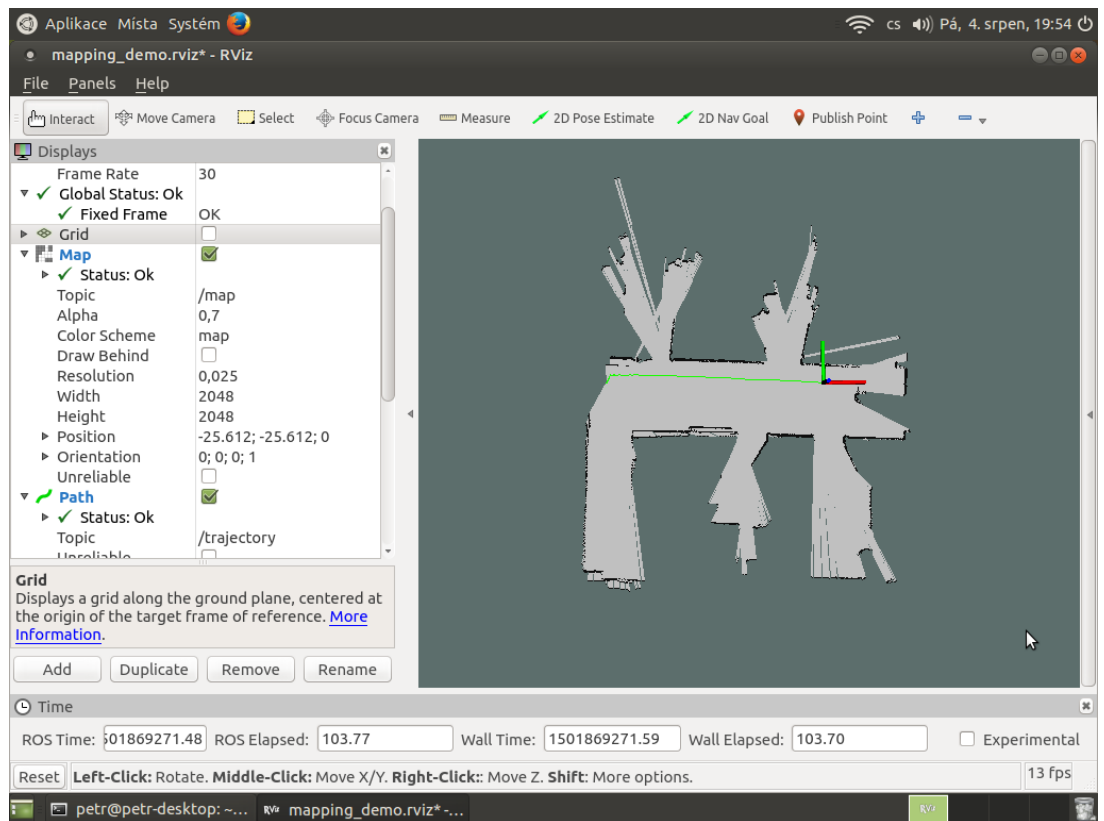
Rozsáhlá komunitní základna je jednou z dalších předností ROSu usnadňující získávání součástí systému stejně tak, jako řešení případných problémů. Základní zdroj informací představuje ROS Wiki, ROS Answers je poté místo umožňující položení dotazu, kterým se mohou poté zabývat zkušenější uživatelé. Pojmem komunitní úroveň se tedy rozumí otevřená spolupráce mnoha subjektů, které ROS používají a sdílí své výsledky pro ostatní uživatele.

5.3 Grafické nástroje systému ROS

ROS mimo jiné obsahuje i sadu grafických nástrojů, které dokáží citelně zpříjemnit práci s daty. Jednat se může například o zobrazování zpráv či jejich diagnostiku, správu uzlů a spoustu dalšího. Konkrétně se zde jedná o program Rqt který obsahuje mnoho balíčků pro vizualizaci dat.

Rviz

Nástroj Rviz – ROS Visualization byl vytvořen především pro 2D či 3D vizualizaci. Umožňuje graficky zobrazovat model robota, jeho pohyb či snímaná data. Vedle různých čidel či výpočtů obsahuje program také podporu například pro zobrazování obrazu z kamery. Rozložení a výběr zobrazovaných hodnot si může uživatel nakonfigurovat z předem připravené nabídky, prvky je možné vybírat také z aktuálně běžících součástí systému ROS. Nakonfigurované prostředí je ukázáno na obrázku 5.2 níže.



Obrázek 5.2 – Prostředí Rviz

Rqt graph

Dalším užitečným nástrojem je rqt graph, který umí zobrazit komunikační graf aktivních uzlů a využívaných témat systému ROS. Vygenerované schéma je zobrazeno v příloze B.

Tf view frames

Balíček tf pracuje se souřadnicovými rámy, pomocí kterých dokáže dopočítat polohu jednotlivých částí robota při zadaných korekčních údajích. Z uživatelem zadaných údajů dokáže tf view frames vytvořit a zobrazit transformační strom který zobrazuje vzájemné přepočty jednotlivých částí robota. Vizualizace tohoto stromu je zobrazena v příloze C.

5.4 Hector SLAM

Hlavní výhodou Hector SLAM je možnost mapování prostoru bez použití odometrie či jiných senzorů poskytujících informace o poloze. Mapa je při použití této metody tvořena pouze z dat poskytovanými laserovým scannerem. Pro tyto účely je nutné použít zařízení umožňující vysokorychlostní snímání okolí, tedy především lidary. Lidary dokáží snímat sledovaný prostor desetkrát za sekundu při rozlišení několika set bodů.

5.4.1 Princip a použití balíčků Hector

Team Hector se pravidelně účastní soutěží RoboCup, balíčky ROS, které pro tuto činnost vyvíjí, poté poskytuje ke stažení ze svého repozitáře. Konkrétně se v případě ROSu jedná o balíčky Hector SLAM, Hector Navigation a Hector Localization. Balíček Hector Localization využívá pro fúzi dat ze senzorů rozšířený Kalmanův filtr, který je popsán v kapitole 2.3. Při tvorbě mapy pomocí balíčku Hector SLAM je poloha robota vypočítávána na základě vytvářené mapy, kdy se porovnávají jednotlivé sledy scanů. Menší nároky na obsáhlost hardwaru v podobě různých čidel, ať už se jedná o odometrii či inerciální jednotku, na druhé straně vyvažují jisté provozní omezení. Pokud tvoříme mapu pouze na základě dat z lidarů, je nutné ovládat robota s ohledem na princip kompozice mapy. Robota je vhodné řídit takovým způsobem, abychom se vyhnuli ostrým úhlům, které by mohly vést k nespojitostem v tvořené mapě.

Použití balíčků Hector pro tvorbu mapy je výhodné, pokud provozujeme robota na podvozku, kde je měření odometrie obtížné. Jedná se především o pásové, diferenciálně řízené podvozky, kde je směr pohybu určován právě jako rozdíl pohybu obou hnacích kol pásů.

Algoritmus Hector odhaduje polohu v 2D prostoru za pomoci porovnávání koncových bodů paprsku se získanou mapou. Koncové body jsou promítány v již získané mapě, kde dochází k odhadu pravděpodobnosti obsazenosti v daném místě. Shoda skenování s aktuální mapou je řešena pomocí Gauss-Newtonovy rovnice, která zajišťuje, aby byly skenované paprsky co nejlépe transformovány do současné mapy.

Klíčové zdrojové nody pro funkci HECTOR SLAM jsou `hector_mapping`, `hector_geotiff` a `hector_trajectory_server`, pro obsluhu lidarů Hokuyo poté `urg_node`. Node `hector_trajectory_server` ukládá trajektorii pohybu robota, při čemž bere v úvahu transformace jednotlivých rámců platformy, cesta je interně uložena jako `nav_msgs/Path` a pro další využití v ROS k ní lze přistupovat formou služby nebo tématu. Dalším node je `hector_geotiff`, který se stará o ukládání mapy a trajektorie robota do souborů obrázků `geotiff`, jež znázorňují mřížku obsazenosti v komponované mapě, `hector_mapping` je hlavní nod procedury SLAM pro použití pouze s lidarovými daty.

6 KONSTRUKCE MOBILNÍHO ROBOTA

Zařízení potřebná pro mapování prostoru jsou namontována na mobilní pásový robot. Konstrukce tohoto robota byla realizována v mé bakalářské práci a nyní je doplněna o aparaturu potřebnou pro mapování prostoru. Při úpravě robotické platformy je rovněž provedeno vylepšení stávajících zařízení či jejich doplnění o nové prvky. Tyto změny jsou dále popsány.

6.1 Výchozí stav robotické platformy

Vzhledem k povaze předpokládaného terénu byl zvolen pásový podvozek, konkrétně známý TANK-02. Tento podvozek je pro dané použití nejvhodnější díky velké prostupnosti terénem a velkým nájezdovým úhlům. Inspirací pro výběr konkrétního podvozku může být i fakt, že se tento typ obecně používá u těžké techniky pohybující se v hůře přístupném a předem neznámém prostředí. Příkladem může být vojenská či stavební technika.

Pohon robota zajišťují dva stejnosměrné elektromotory se jmenovitým napětím 6 V. Přenos síly je zprostředkován pomocí dvojité převodovky Tamiya s fixním převodovým poměrem. Použitý typ převodovky umožňuje při konstrukci zvolení jednoho ze čtyř převodových poměrů. Díky tomu lze převodovku vhodně nastavit s ohledem na předpokládané použití pohonného systému. Vždy se jedná o vhodný poměr rychlosti vůči síle. Samotné pásy jsou poháněny pomocí ozubených kol na výstupu z převodovky.

Energii nutnou pro pohyb a fungování robota zajišťuje modelářská baterie Jamara s napětím 7,2 V a kapacitou 1100 mAh. Napětí z této baterie je pomocí stabilizátoru LM7805 převedeno a stabilizováno na 5 V vhodných k napájení logických obvodů a dalších periférií. Deska napájení robota je rovněž vybavena dvojicí konektorů pro připojení baterie či v době ladění napájecího kabelu. Aby při nabíjení nebylo nutné baterii z robota vyjmát, lze ji nabíjet přímo v robotu pomocí třetího konektoru. Všechny tyto konektory jsou chráněny proti přepólování použitím diody. K napájení řídicí desky, či jiných zařízení je k dispozici čtveřice konektorů s již stabilizovanými pěti volty. Tato napájecí deska spolu s budičem tvoří samostatný konstrukční prvek, díky čemuž lze bez problému v budoucnu nahradit výkonnější. Zmíněná výměna může nastat buď z potřeby dodání silnějšího napájení robota, nebo v důsledku potřeby nasazení silnějších motorů, tedy i budiče.

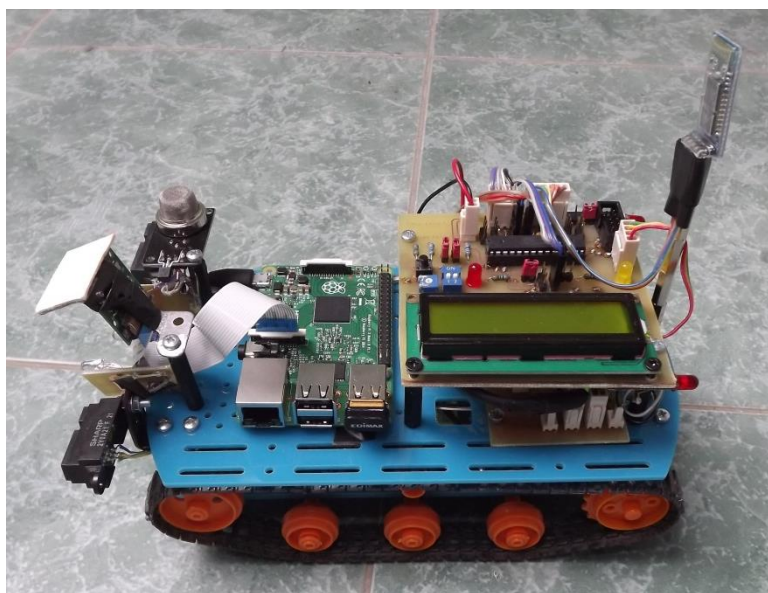
Motory jsou ovládané budičem L293B který dokáže trvale dodávat 1 A na každý kanál, špičkově dokonce 2 A. Ovládání budiče je realizováno pomocí 4 logických vstupů, na kterých

jsou přijímány logické úrovně odpovídající jednotlivým povelům pro spínání motorů. Pokud by bylo zapotřebí, lze motory ovládat pomocí PWM. Motory mohou být napájeny napětím rovnou z baterie, regulovanými 5 V či dalším zdrojem, výběr lze provést pomocí nastavení propojek na desce napájení. Budič motorů je připojen pomocí patice, lze tudíž bez problému v případě potřeby nahradit novým.

Řídící povely jsou robotem přijímány pomocí Bluetooth modulu HC-05 který je následně pomocí sérové linky odesílá do mikrokontroléru. Komunikace probíhá ve specifikaci 9600/8N1. Dosah přenosu na volném prostranství činí 140 m, v zastavěné ploše poté 40 m (Vaniček, 2015). Pokud dojde k výpadkům komunikace, je robot automaticky okamžitě zastaven, čímž lze předejít následné havárii zařízení.

Robot je dále vybaven senzory pro detekci výbušných plynů, teploty a infračervenými dálkoměry v přední části. Tyto senzory sloužili především pro potřeby bakalářské práce a pro nový účel robota nejsou potřeba, dále tedy nebudou zmiňovány.

Tato mobilní robotická platforma dále obsahuje jednodeskový minipočítač Raspberry PI 2, jehož parametry jsou popsány v tabulce 6.1. Snímání obrazu obstarává kamera 5 MP Omnivision 5647 o maximálním rozlišení 2592×1944 , která dokáže pořizovat videozáznam s rozlišením 1080 p při 30-ti snímcích za sekundu. Tuto kameru lze připojit přímo k procesoru pomocí vysokorychlostní sériové sběrnice CSI. Snímaný obraz může být v reálném čase streamován ve formátu MJPEG po lokální síti technologií WIFI. Dosah přenosu technologií WIFI standartu IEEE 802.11g byl testován v rámci mé bakalářské práce a činí 140 m na volném prostranství a necelých 40 m v zastavěné ploše (Vaniček, 2015). Pro případ zhoršených světelných podmínek je robot dále vybaven dálkově ovládanými světly LED v přední části. Původní návrh mobilního robota je zobrazen na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 – Původní podoba mobilního robota

Řízení celého systému a další výpočty obstarává 8 bitový mikrokontrolér ATmega88. I přes svoji jednoduchost a malé rozměry dokáže v plné míře pokrýt potřeby řízení tohoto mobilního robota. Mikrokontrolér ATmega88, jehož parametry jsou popsány v tabulce 6.1, je srdcem ovládací desky. Tato deska tvoří univerzální řídicí prvek pro mobilního robota a je navržena s ohledem na budoucí změny či rozšíření celého systému.

Deska vedle samotného MCU obsahuje alfanumerický LCD displej 16×2 s řadičem HD44780. Při provozu robota pak displej zobrazuje provozní údaje či různé stavové zprávy. Ovládací deska dále obsahuje konektory pro připojení čidel či jiných součástí robotické platformy a je rovněž uzpůsobena pro nastavování Bluetooth modulu pomocí konfiguračních AT příkazů. Jednotlivé části robotické platformy včetně jejich parametrů jsou popsány v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1 - Parametry komponent robota

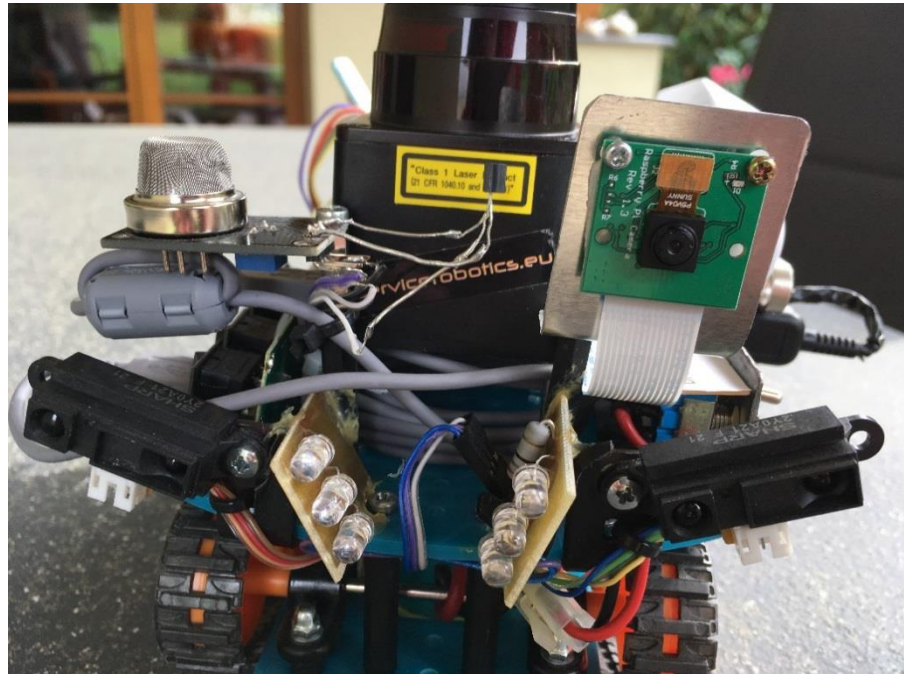
periferie	popis
podvozek	pásový, TANK-02
pohon	2× elektromotor 6 V + dvojitá převodovka
baterie	7,2 V, 1100 mAh
stabilizace napětí	LM7805

periferie	popis
napětí desky řízení, ovládání	5 V
buzení motorů	L293B
maximální stálý proud pro motor	1 A
maximální špičkový proud pro motor	2 A
výpočetní jednotka řízení a měření	ATmega88
architektura	8 bit
takt	16 MHz
flash	8 kB
EEPROM	512 bitů
SRAM	1 kB
výpočetní jednotka lidarů	Raspberry PI 2
cpu	ARM Cortex-A7 Broadcom BCM2836
takt	4×900 MHz
gpu	VideoCore IV
RAM	1 GB LPDDR2 SDRAM
kamera	
výrobce, typ	Omnivision 5647
rozlišení	5 MP, 1080 p při 30 snímcích/sec

6.2 Nová podoba robotické platformy

Jako výchozí platforma byl využit již výše popsáný mobilní robot. Tato robotická platforma je pro účely této práce upravena a dále vylepšena. Mimo montáž zcela nových prvků potřebných pro mapování prostoru jsou také upraveny stávající komponenty. Zařízení bylo rozšířeno o Lidar od firmy Hokuyo, napájený USB hub a druhou baterii v podobě powerbanky.

Celkové rozvržení umístění jednotlivých komponent bylo změněno s ohledem na nové části robotického systému. Rozmístění čidel zůstalo původní, v přední části robota byl upraven pouze držák kamery, který je nyní stabilnější. Celkové rozvržení čidel je patrné na obrázku 6.2 níže.



Obrázek 6.2 – Rozmístění čidel

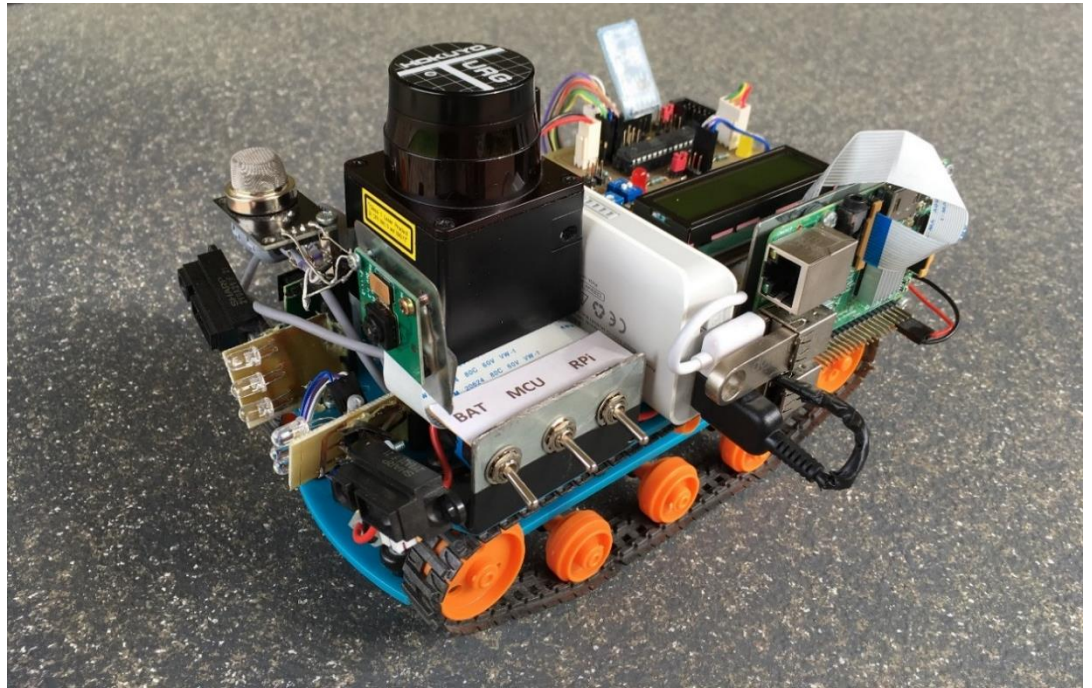
Srdcem celého systému je Raspberry PI, na kterém je spuštěn operační systém Ubuntu MATE 16.04. Tento mikropočítač se na robotu již nacházel, ovšem došlo ke změně účelu jeho využívání a přehrání operačního systému Raspbian za plnohodnotnou distribuci desktopové verze systému Linux. Operační systém Linux byl vybrán s ohledem na jednoduchost a univerzálnost využití, v neposlední řadě také proto, že se jedné o ideální volbu pro spojení s Robotickým operačním systémem – ROS. Zvolené výpočetní řešení poskytuje dostatečný výkon pro uvažované použití, vytížení procesoru při online vykreslování mapy v grafickém rozhraní činí přibližně 35 %.

Pro účely tvorby mapy byl zvolen lidar, tento výběr je opodstatněn vysokou přesností a rychlostí měření tohoto zařízení. Výhodou je rovněž rozsah měření a systém odebrání vzorků, které jsou snímány v dané kruhové výseči periodicky každou otáčku snímače. Použitý lidar je zobrazen na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 – Lidar Hokuyo URG-04LX

Pro potřeby vykreslování mapy z nasnímaných vzorků je nutné znát trajektorii pohybu robota, kterou je proto potřeba vhodným způsobem získat. Trajektorii pohybu lze snímat více způsoby, jednat se může o odometrii, inerciální systém či visuální odometrii. Použití odometrie není v tomto případě vhodné z důvodu povahy použitého pásového, diferenciálně řízeného podvozku. Pohyb pomocí pásového podvozku je doprovázen častými prokluzy mezi pásy a podkladem, které by způsobovaly chybné vyhodnocování ujeté vzdálenosti. Měření ujeté vzdálenosti pomocí enkodéru lze využívat u klasických kolových podvozků, ale v případě, kdy je otáčení zprostředkováváno smykem, není zcela optimální. Dále pro měření trajektorie pohybu lze využít inerciální jednotku obsahující gyroskop, akcelerometr a magnetometr. Vedle standartních nepřesností měření těchto senzorů je nutno připočítat ještě šum produkující dopadání jednotlivých článků pásu na zem. Ideální pro tento případ se proto jeví využití něčeho, co už je z důvodu tvorby mapy na robotu obsaženo. Jedná se o vlastní lidar, z jehož výstupních dat lze pomocí vhodných algoritmů získávat také trajektorii pohybu, která je nutná pro úspěšnou kompozici map. Pro řešení celého problému si lze vystačit pouze s lidarem, což vede k jednoduchosti celého systému. Kamera pro snímání obrazu zůstala součástí systému, pro přenos je opět využíván MJPEG stream obrazu. Finální podoba robotické platformy je zobrazena na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4 – Konečná podoba mobilního robota

6.2.1 Hokuyo URG-04LX

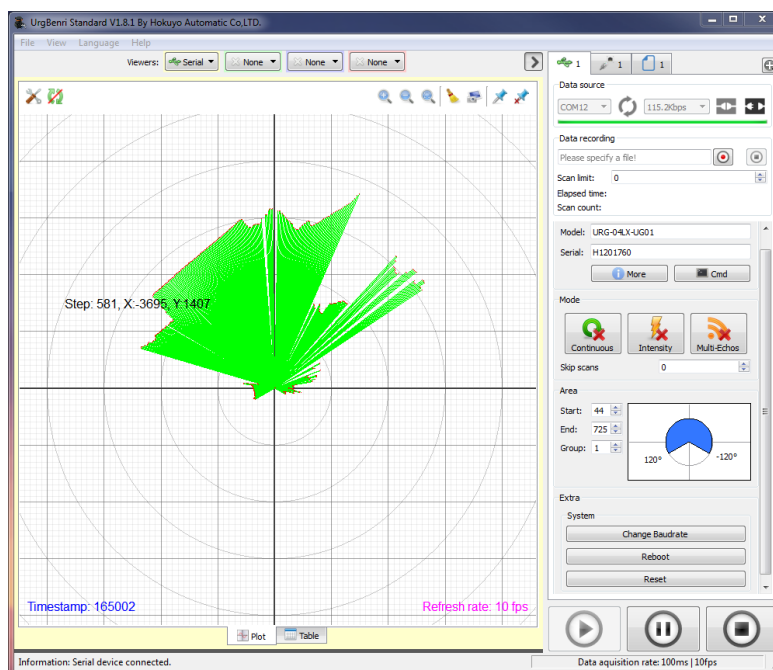
Pro moji práci byl vybrán lidar od firmy Hokuyo, konkrétně typ URG_04LX-UG01. Tento lidar měří v rozmezí 20 – 4000 mm a v rozsahu 240° s rozlišením 0,36°. Měření v celém rozsahu trvá 100 ms a během jedné otáčky je nasnímáno 683 vzorků. Lidar využívá polovodičovou laserovou diodu s vlnovou délkou 785 nm. Celé zařízení je napájeno 5 V z rozhraní USB, po kterém probíhá komunikace s nadřazeným systémem (www.hokuyo-aut.jp). Kvůli energetické náročnosti je lidar k Raspberry PI připojen přes napájený USB hub. Výhodou tohoto lidaru je mimo univerzálního připojení také robustní provedení, které je důležité pro montáž na mobilního robota a následný provoz. Jednotlivé parametry lidaru jsou uvedeny v tabulce 6.2 níže.

Tabulka 6.2 - Parametry lidaru

parametr	hodnota
oblast měření	20-4000 mm
rádus měření	240°
rozlišení měření	0,36°
doba jedné otáčky	100 ms

parametr	hodnota
počet vzorků za jednu otáčku	683
senzor měření	polovodičová dioda
vlnová délka diody	785 nm
napětí zařízení	5 V
připojení k výpočetní jednotce	USB
výrobce	HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD. Japonsko

K lidaru je možné ze stránek výrobce stáhnout program pro počítač, pomocí kterého se lze s lidarem v jeho obecné podobě seznámit. Mimo vizualizace měření lze nastavovat přenosové parametry zařízení nebo ukládat nasnímaná data. Měření lze zobrazovat graficky nebo jako tabulka hodnot. Software je zobrazen na obrázku 6.5.

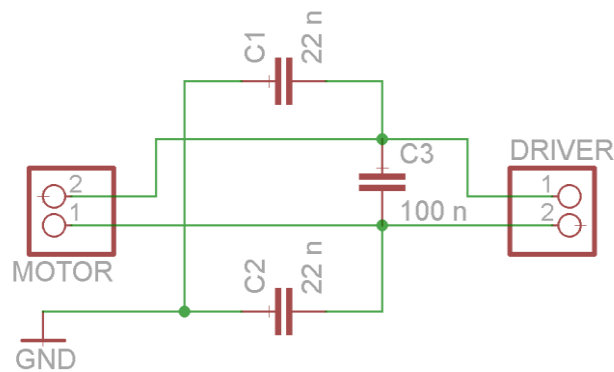


Obrázek 6.5 – Software pro lidar

6.3 Úpravy stávajících komponent robotické platformy

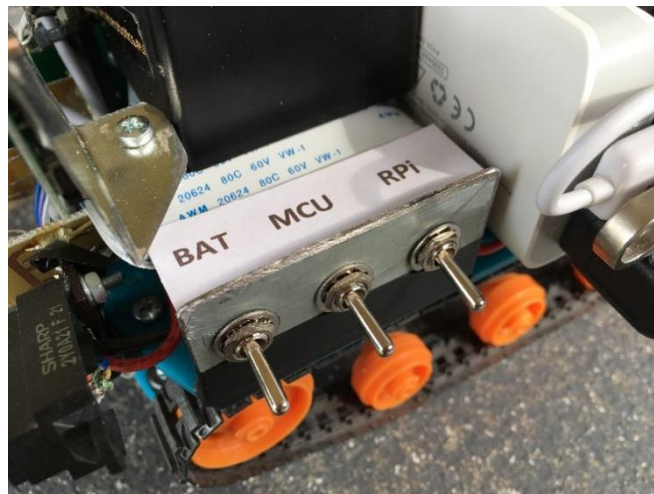
Tyto úpravy vychází z poznatků získaných během delší doby provozu celého zařízení a jejich realizací jsou zlepšeny provozní i aplikační vlastnosti celého robotického systému. Jmenovitě se jedná o zvětšení chladiče stabilizátoru napětí 7805, nacházejícího se na desce

napájení a řízení motorů, který byl v dosavadní podobě tepelně namáhán. Plocha nového chladiče je zhruba třikrát větší, čímž je dosaženo optimálního chlazení součástky. Motory byly dále doplněny o kondenzátorový filtr, který omezuje rušení, které motory produkují. Tento filtr byl sestaven z keramických kondenzátorů. Schéma filtru je zobrazeno na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6 – Schéma filtru motorů

Pro lepší ovládání jednotlivých komponent byl instalován panel s přepínači umožňující zapínání či restartování dílčích systémů. Zleva jsou řazeny přepínače pro desku napájení a ovládání motorů, dále pro mikroprocesorovou desku, a nakonec pro Raspberry PI. Panel s přepínači je zobrazen na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7 – Panel s přepínači

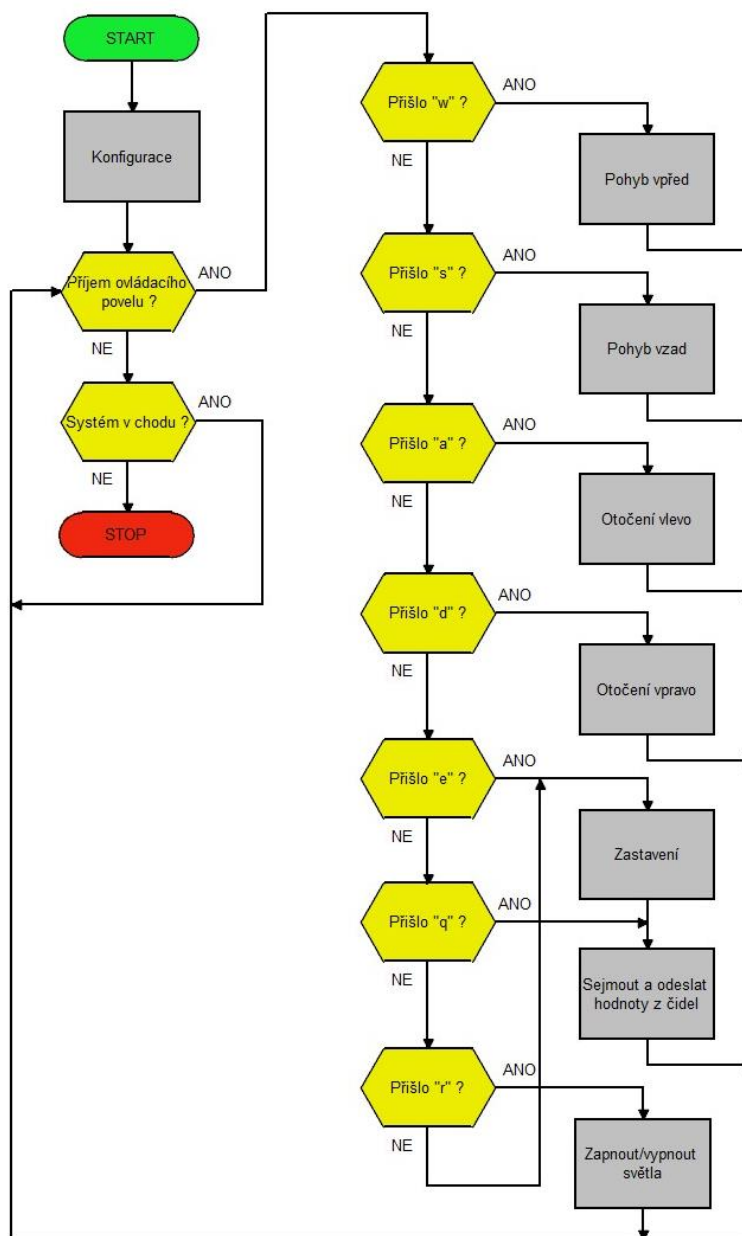
6.4 Programové vybavení

Z důvodu rozšíření funkčnosti robotického systému jsou provedeny úpravy a rozšíření softwarového vybavení. Ve firmwaru pro procesor obsluhující sběr dat a pohyb robota, jsou

provedeny pouze drobné úpravy. Operační systém minipočítače Raspberry PI je naproti tomu zcela jiný, Raspbian je nahrazen operačním systémem Linux Ubuntu Mate 16.04, který je vybrán jako vhodný pro provoz připojeného lidarů, spolu s robotickým systémem ROS.

6.4.1 Firmware pro mcu robota

Pohyb mobilního robota a sběr dat je řízen pomocí mikroprocesoru ATmega88, který přijímá řídicí povely z počítače pomocí technologie Bluetooth. Po zapnutí robota proběhne inicializace, která je potvrzena hláškou na displeji. V tento moment je robot připraven k přijímání ovládacích povelů a provozu. Nyní robot vyčkává na přijetí ovládacího znaku. Pokud přijde pokyn k zastavení, jsou následně také odeslány hodnoty z čidel, lze totiž předpokládat, že obsluha robota zastavila právě za účelem měření. Při obdržení jiného, než definovaného znaku je robot okamžitě zastaven, může se totiž jednat o počátek ztráty signálu a následného nedoručení kompletního paketu. Blokové schéma firmwaru robota je zobrazeno na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8 – Blokové schéma firmwaru

Robot je ovládán pomocí okenní aplikace pro MS Windows, která umožňuje taktéž zobrazovat měřená data ze senzorů a indikovat mezní stavy těchto hodnot.

6.4.2 Systém obsluhy lidarů

Laserový skener je obsluhován jednodeskovým počítačem Raspberry PI 2, na kterém je instalován operační systém Linux Ubuntu Mate 16.04 spolu s robotickým operačním systémem, zkráceně ROS. Univerzálnost kooperace těchto dvou systémů umožňuje rozsáhlé možnosti obsluhy lidarů stejně tak jako využití snímaných dat. Snímaná data je možno v reálném čase

vzdáleně vykreslovat vhodným programem na řídicím počítači obsluhy nebo lze také data průběžně ukládat do paměti počítače instalovaného na robotu. V případě druhé možnosti je poté možno balík měřených dat přehrát na jakémkoliv počítači a provést tak simulaci pohybu robota. Vhodným pomocníkem v této činnosti je například program Matlab se svou podporou pro ROS, či grafické prostředí Rviz, které dokáže s nasnímanými daty dále pracovat.

6.4.3 Instalace systému ROS a jeho příprava

Na počítač Raspberry PI je nejdříve instalován operační systém Linux Ubuntu Mate 16.04 a až poté lze instalovat Robotický operační systém, v tomto případě je vybrána toho času poslední dostupná distribuce ROS Kinetic. Před vlastní instalací systému ROS je doporučeno provést aktualizaci systému pomocí příkazů `sudo apt-get update` a `sudo apt-get upgrade`, dále je nutné nastavit zdroje a klíče pro samotnou instalaci. Následně je možné systém instalovat v jedné z možných verzí dle obsahu instalovaných knihoven. Byla zvolena možnost desktop-full, která obsahuje knihovny potřebné pro funkci ROS včetně vizualizace, tato možnost je také obecně doporučována. Po úspěšné instalaci ROSu je dále instalován pracovní prostor catkin workspace, do kterého jsou následně stahovány balíčky, tedy jednotlivé části systému ROS dle potřeby. V tomto případě je potřeba systém dovybavit balíčkem pro sériovou komunikaci, nodem pro ovládání lidarů a vlastním balíčkem Hector SLAM. Všechny tyto balíčky jsou dostupné na githubu a lze je pomocí gitclone stahovat do umístění `/root/catkin_ws/src`. Druhá možnost je instalování součástí pomocí příkazu `apt-get install`. Následně se v adresáři o složku výše provede inicializace prostoru catkin pomocí `catkin_init_workspace` a poté sestavení vlastního buildu příkazem `catkin_make`. Při každém dalším stahování součástí do prostoru `catkin_ws` je nutné smazat `CMakeList.txt` který se následně po inicializaci opět vytvoří v již aktuální podobě. Některé balíčky mohou vyžadovat další externí knihovny a nástroje, které musí poskytovat operační systém. Těmto balíčkům a nástrojům se souhrnně říká závislosti systému a v některých případech nejsou ve výchozím nastavení instalovány. Součástí systému ROS je nástroj `rosdep`, který umí potřebné závislosti stáhnout a nainstalovat. Konkrétní závislosti systému pro daný balíček jsou vypsány v manifestu balíčku. Dále je potřeba vytvořit swap operační paměti na SD kartu. K tomuto účelu je použit nástroj `gparted`, pomocí kterého lze potřebnou paměť z karty alokovat jako operační. Swap operační paměti je nutný pro účely kompilace projektu, jelikož samotné RPI nemá pro tento proces dostatek paměti. Pro následný provoz systému již rozšíření paměti na paměťovou kartu není potřeba, při dlouhodobém užívání paměťové karty jako operační paměti dojde jejímu k poškození. Dalším krokem je instalování

grafického prostředí Rviz pro práci s operačním systémem ROS. Nyní je potřeba nastavit parametry síťového spojení s klientem, pokud se chceme k robotu připojovat vzdáleně pomocí jiného počítače se systémem ROS. Jako poslední krok je nastavení parametrů procesu Hector SLAM. Jedná se především o nastavení transformací mezi jednotlivými rámci, tedy samotným lidarem, robotem a mapou. Nastavení transformace je nutné zejména v případě, kdy může docházet k změně polohy lidarů s robotem, například umístěním lidarů na polohovací zařízení. Níže je uveden stručný seznam příkazů potřebných ke spuštění Hector SLAM na systému ROS Kinetic, jedná se pouze o hrubý seznam, který se může lišit dle specifikace systému a druhu použití.

Postup zadávání příkazů:

```
$ sudo apt-get update
```

```
$ sudo apt-get upgrade
```

```
$ sudo reboot
```

```
$ sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu trusty main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
```

```
$ sudo apt-key adv --keyserver hkp://ha.pool.sks-keyservers.net:80 --recv-key 0xB01FA116
```

```
$ sudo apt-get install ros-kinetic-desktop-full
```

```
$ mkdir -p ~/catkin_ws/src
```

```
$ cd catkin_ws/src
```

```
$ rm -f CMakeList.txt
```

```
$ git clone https://github.com/wjwwood/serial.git
```

```
$ catkin_init_workspace
```

```
$ cd ..
```

```
$ catkin_make
```

```
$ sudo apt-get install ros-kinetic-urg-node
```

```
$ sudo apt-get install ros-kinetic-hector-slam
```

```
$ sudo rosdep init
```

```
$ sudo rosdep update
```

6.4.4 Spuštění celého systému

Start celého systému sestává z několika postupných kroků, kdy jsou spouštěny nebo nastavovány jednotlivé části systému. Jako první je nutné spustit jádro robotického systému ROS, který se nazývá roscore. Po každém spuštění systému je nutné spustit komunikaci s Lidarem a přidělit mu práva pro čtení a zápis, toto je provedeno pomocí následujících příkazů v případě, že se lidar hlásí na ttyACM0.

```
$ ls -l /dev/ttyACM0
```

```
$ sudo chmod a+rw /dev/ttyACM0
```

Jako další v řadě je zapotřebí spustit pracovní prostor `catkin_ws` a samotný HECTOR SLAM. Nakonec zbývá spuštění `urg-node`, který se stará o dostupnost dat z lidaru pro potřeby ROS. Aby se příkazy nemusely zadávat pokaždé ručně, byl vytvořen skript s celou procedurou potřebnou pro spuštění Hector SLAM. Tento skript postupně spustí roscore, nastaví práva pro lidar, spustí pracovní prostor `catkin_ws`, spustí Hector SLAM, `urg node` a grafické prostředí rviz kde je následně vše zobrazeno. Spuštění klíčových částí je potvrzeno hláškou v terminálu, celý skript je uveden níže.

```
#!/bin/bash
```

```
# spusteni roscore
```

```
function_roscore ()
```

```
{
```

```

roscore

}

function_rosscore &

echo "rosscore spusten"

# nastaveni prav lidarů na ttyACM0

cd /dev

sudo chmod 777 ttyACM0

ls -l /dev/ttyACM0

echo "Lidar pripraven"

# spusteni pracovniho prostoru Catkin_ws

cd /home/petr/catkin_ws/devel

chmod +x setup.bash

./setup.bash

echo "Catkin_ws spusten"

function_hectorSLAM ()

{

rosrun hector_slam_launch tutorial.launch

}

function_hectorSLAM &

rosrun urg_node urg_node

```

Po vykonání tohoto skriptu je robot připraven k provozu, je započata kompozice mapy z laserem snímaných dat. Pohyb robota je vykonáván vzdáleně pomocí příkazů z ovládacího

programu v notebooku. Tvorba ovládacího programu byla předmětem mé bakalářské práce, a tudíž tu není více popisována.

6.4.5 Postprocessing v PC

Pro potřeby pozdějšího zpracování nasnímaných dat i jiným programem, než je rviz, je možné data ukládat do rosbagu. Nahrávání dat z laserového skeneru je spuštěno následujícími příkazy.

```
$ rosbag record LaserScanner /scan
```

```
$ rosrun rviz rviz
```

Program rviz je spuštěn pro kontrolu funkce a není pro ukládání dat nutný. Pokud by bylo zapotřebí nahrávání všech dostupných témat, je možné místo *LaserScanner /scan* použít příznak *-a*. Pro následné přehrání uložených lze použít následující příkaz.

```
$ roslaunch hector_slam_launch tutorial.launch
```

```
$ rosbag play název_rosbag_logu.bag --clock
```

Data z rosbagu je možné kromě rvizu využít například i v programu Matlab s příslušným toolboxem podporující ROS nebo také v programu Simulink.

7 TESTY MOBILNÍHO ROBOTA

Následující testy zhodnocují adekvátnost použité platformy se zvoleným programovým vybavením a diskutují měřené výsledky. Nejprve jsou provedeny testy přesnosti měření trajektorie, která je významná pro správnou tvorbu mapy. V každé další části je zhodnocena možnost využití daného principu měření v reálných podmínkách.

7.1 Testy měření přesnosti trajektorie

Za účelem zjištění přesnosti poskytované trajektorie algoritmem spolu s využitím pásového podvozku je realizováno několik měření. S robotem je postupně desetkrát opakováno projetí přesně vytyčené trasy o délce 5 a 3 metry v místech s různou povahou okolního prostředí. Trajektorie je při tomto pokusu průběžně ukládána do rosbagu trajektorie pomocí příkazu `$ rosbag record hector_mapping /trajectory` a postprocessingem vyhodnocována v programu Matlab na počítači. Jelikož jsou data do balíčku ukládána paralelně ve stejných hodnotách a dle jednotlivých pořadí skenů dále zanořena, je nutné pro získání jednotlivých bodů pro vykreslení přistupovat do jednotlivých buněk záznamu. V programu Matlab je vytvořen skript, který dokáže uložená data ze struktury rosbagu vyčíst a následně vykreslit. Pomocí dalších příkazů jsou poté data zpětně uloženy do matice a ve vykresleném grafu označeny symboly. Nyní lze jednotlivé body označit a odečíst jejich polohu, ze které lze spočítat odhad uražené vzdálenosti.

7.1.1 Měření trajektorie v chodbě

Jako první je provedeno měření trajektorie v chodbě domu. V tabulce 7.1 jsou uvedeny hodnoty z deseti pokusů pro pětimetrovou a třímetrovou dráhu pohybu robota.

Tabulka 7.1 – Měření trajektorie 5 m a 3 m v chodbě

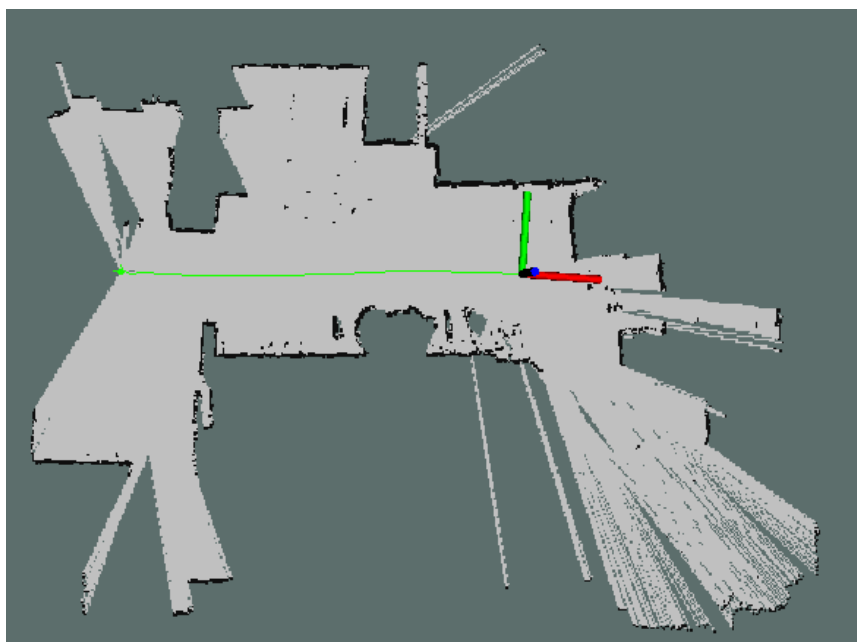
pokus, statistické hodnoty	vzdálenost trajektorie, přesnost měření pro 5 m	vzdálenost trajektorie, přesnost měření pro 3 m
1.	5,055 m	3,015 m
2.	5,040 m	3,033 m
3.	5,062 m	3,028 m
4.	5,024 m	3,037 m

pokus, statistické hodnoty	vzdálenost trajektorie, přesnost měření pro 5 m	vzdálenost trajektorie, přesnost měření pro 3 m
5.	5,041 m	3,029 m
6.	5,054 m	3,011 m
7.	5,048 m	3,033 m
8.	5,065 m	3,038 m
9.	5,061 m	3,026 m
10.	5,032 m	3,014 m
průměr	5,048 m	3,026 m
průměrná odchylka v cm	4,8 cm	2,6 cm
směrodatná odchylka σ	0,013	0,009

Prostory, kde je proveden experiment, obsahují větší počet hran, které jsou nutné pro úspěšný výpočet trajektorie. Tyto hrany, v tomto případě především zárubně dveří, představují významné body, jejichž poloha vůči robotu je při pohybu porovnávána. Průměrná odchylka u pětimetrové i třímetrové dráhy činila necelé jedno procento. V tomto ohledu je přesnost vypočítávané trajektorie naprosto dostačující a tvoří přesný základ pro následnou tvorbu mapy okolí. V případě pohybu v chodbě s hladkými stěnami bez dostatečného počtu významných bodů algoritmus pro určování trajektorie, a tedy, i vlastní generování mapy selhává. Při provozu v tomto prostředí je nutné počítat s dalšími prvky pro určování polohy robotické platformy, jako jsou inerciální jednotky, odometrie či v případě vhodného podkladu také vizuální odometrie. Výsledky provozu v prostředí bez blízkých významných bodů jsou patrné v kapitole 7.2.4, kde se robot pohybuje ve venkovním prostředí. Z výsledného obrázku 7.10 je patrné selhání výpočetního algoritmu pro generování mapy. Stejného výsledku by bylo dosaženo při pohybu v chodbě s naprosto hladkými stěnami.

7.1.2 Měření trajektorie v místnosti

Druhé měření přesnosti získávané trajektorie bylo realizováno taktéž v domě, nyní však v místnosti s různorodějším okolím jako je nábytek, a další běžné vybavení. Získaná mapa této dráhy je na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1 – Měření trajektorie v místnosti

V tabulce 7.2. jsou ukázány naměřené hodnoty experimentu v místnosti spolu s jejich vyhodnocením.

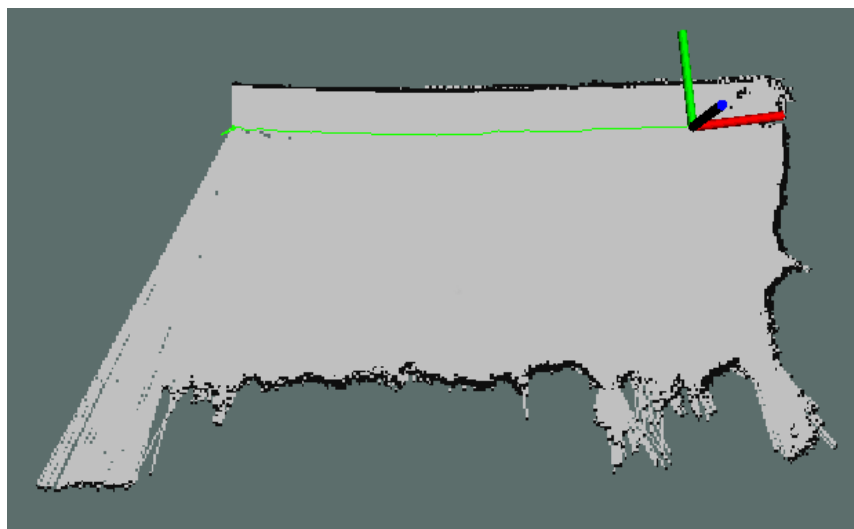
Tabulka 7.2 – Měření trajektorie 5 m v místnosti

pokus, statistické hodnoty	vzdálenost trajektorie, přesnost měření pro 5 m
1.	5,054 m
2.	5,062 m
3.	5,067 m
4.	5,055 m
5.	5,060 m
6.	5,052 m
7.	5,060 m
8.	5,035 m
9.	5,042 m
10.	5,053 m
průměr	5,054 m
průměrná odchylka v cm	5,4 cm
směrodatná odchylka σ	0,009

V porovnání s předchozím experimentem, který probíhal v chodbě, jsou data z měření realizovaném v místnosti s nábytkem velmi podobná.

7.1.3 Měření trajektorie podél hladké zdi

Třetí měření bylo provedeno ve venkovním prostředí, kde se z jedné strany trasy pohybu robota nacházela hladká stěna a naproti ní opodál rostly keře. Obrázek mapy tohoto prostoru je na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2 – Měření trajektorie podél hladké zdi

V tabulce 8.3. jsou zobrazeny naměřené hodnoty experimentu provedeného vedle hladké stěny ve venkovním prostředí spolu s jejich vyhodnocením.

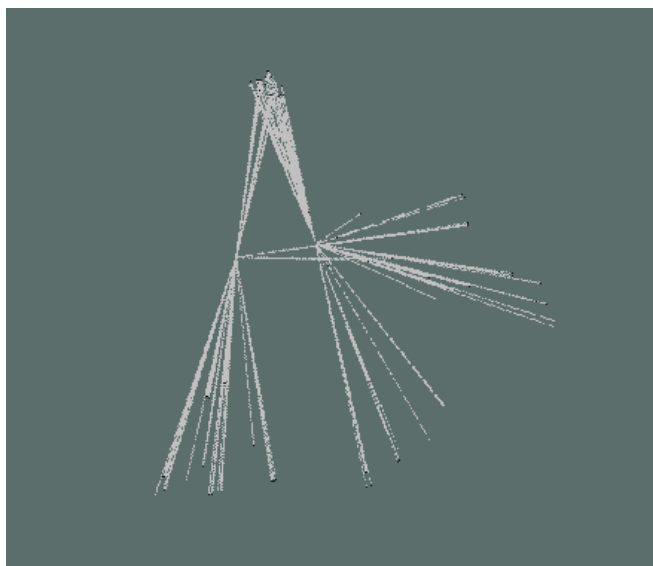
Měření prováděné vedle hladké zdi, naproti níž je vegetace, poskytuje horší výsledky v porovnání s předchozími experimenty ve vnitřních prostorech domu. Průměrná odchylka je nyní 1,9 %, což značí spolehlivé určení trajektorie, ale oproti předchozím testům je skoro dvojnásobná. Z výsledku je patrné, že v tomto případě stačí pro spolehlivý výpočet různorodé prostředí pouze z jedné strany.

Tabulka 7.3 – Měření trajektorie 5 m podél hladké zdi

pokus, statistické hodnoty	vzdálenost trajektorie, přesnost měření pro 5 m
1.	5,055 m
2.	5,090 m
3.	5,095 m
4.	5,128 m
5.	5,088 m
6.	5,073 m
7.	5,129 m
8.	5,102 m
9.	5,063 m
10.	5,125 m
průměr	5,095 m
průměrná odchylka v cm	9,5 cm
směrodatná odchylka σ	0,025

7.1.4 Měření trajektorie na volném prostranství

V posledním případě bylo zkoušeno určení trajektorie na volném prostranství. Výsledky tohoto testu byly předem předpokládáné, pokus o vygenerování mapy je na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3 – Měření trajektorie na volném prostranství

Jelikož systém výpočtu v tomto případě zcela selhal, nebylo možné s experimentem pokračovat a sbírat data trajektorie. Selhání algoritmu výpočtu je způsobeno velkou vzdáleností okolních objektů, které jsou mimo rozsah lidarů. Algoritmus pro výpočet nemá dostatečné množství dat pro výpočet významných bodů a v tomto prostředí je navigace za využití této metody absolutně nepoužitelná.

7.1.5 Zhodnocení měření trajektorie

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že přesnost vypočítané trajektorie ze snímaných dat je v předpokládaném prostředí plně postačující pro další použití při generování mapy. V prostorech s dostatečným počtem významných bodů dosahovala odchylka maximálně necelých 2 %. Tato měření potvrdila možnost využití zvolené platformy z hlediska možnosti přesného získávání dat instalovaným laserovým skenerem ve spojení s pohybem na pásovém podvozku.

7.2 Kvalita výsledné mapy pořízené laserovým skenováním

Při testech bylo zjištěno, že styl řízení mobilního robota má zásadní vliv na kvalitu výsledných map. Je rozdíl, pokud budeme mobilního robota řídit za využití otáčení na místě nebo s ním budeme opisovat určitou výseč kružnice. Z výsledků je patrné, že při odbočení z chodby do přilehlé místnosti je po jejím naskenování vhodnější otočení na místě popřípadě vycouvání. V případě otáčení po výseči kružnice může v některých případech dojít

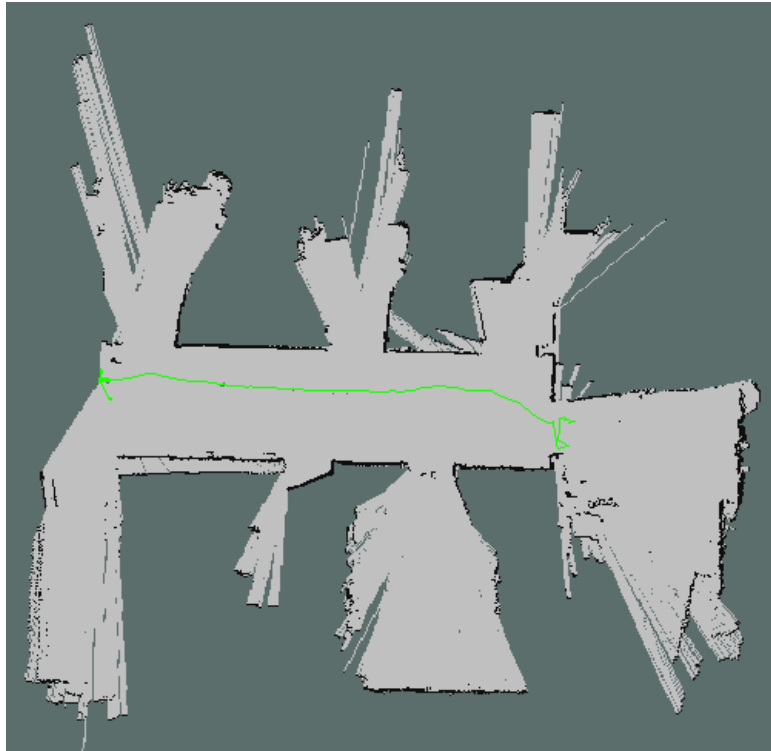
k nespojitosti a geometrickému zkreslení generované mapy zapříčiněném nedostatkem významných bodů. Všechny jednotlivé chyby se v celém procesu kompozice mapy sčítají a mají zásadní vliv na výsledek skenování prostoru. Geometrická nespojitost, vzniklá v průběhu generování mapy, může ovlivnit a deformovat následující části vytvářené mapy. Na výslednou mapu mají vliv rovněž nahodilé chyby, které nelze předvídat a ani je eliminovat správným způsobem řízení mobilního robota. S těmito chybami je nutné počítat a měření prostoru provádět vícekrát.

Nyní následuje popis jednotlivých modelových případů použití a jejich zhodnocení. Testy byly prováděny především ve vnitřních prostorách a následně pro porovnání kvality výsledků také ve venkovním prostředí. V mapách uvedených v následujících kapitolách jsou zakresleny také trajektorie pohybu robotické platformy.

7.2.1 Chodba

Před samotným mapováním je testován vliv rychlosti pohybu robota na kvalitu výsledné mapy. Experiment byl opakován vícekrát, pokaždé s jinou rychlostí pohybu. Rychlosti pohybu robota při jednotlivých pokusech jsou přibližně od 5 cm/s po 50 cm/s. Po skončení těchto měření jsou porovnávány výsledné mapy, ze kterých je patrné, že rychlost v těchto mezích nemá v našem případě vliv na podobu výsledné mapy prostoru.

Při vlastní tvorbě mapy je nejprve chodba projeta jedním směrem kontinuálně za průběžných korekcí směru jízdy mobilního robota. Výsledky tohoto skenování jsou na dobré úrovni a výsledná mapa prostoru odpovídá skutečnému půdorysu podlaží. Obrisy zdí nejsou v tomto případě znatelně pokřiveny. Výsledná mapa je zobrazena na obrázku 7.4, robot se pohyboval z levé části směrem doprava.



Obrázek 7.4 - Průjezd chodbou

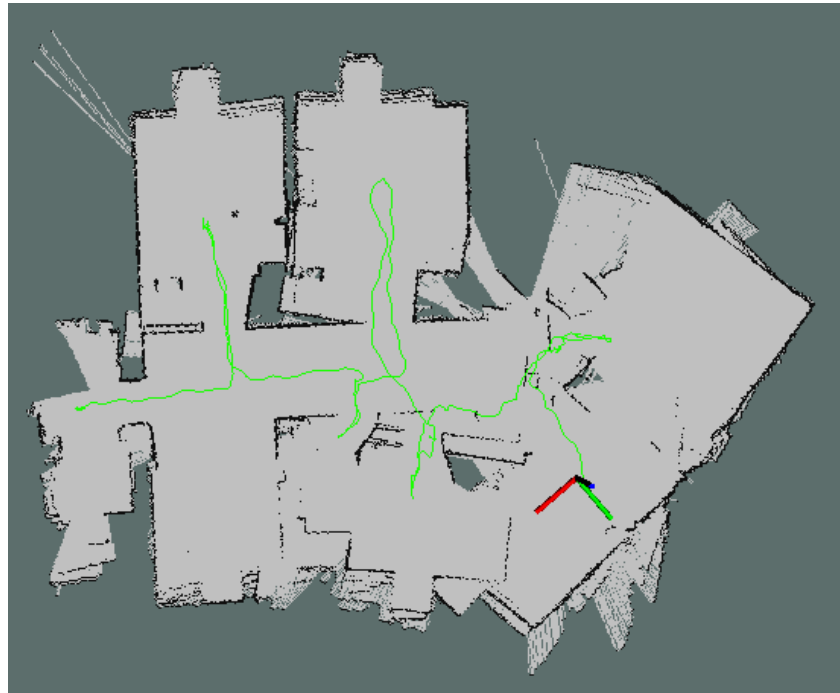
Při dopředném pohybu prostorem s přilehlými místnostmi probíhá detekce za pomoci mobilního robota úspěšně a v testovaném rozsahu nemá rychlost vliv na výslednou podobu mapy. Rychlost snímání okolí laserovým skenerem je plně postačující pro přípustné provozní rychlosti zvolené robotické platformy.

7.2.2 Chodba a pokoje (patro)

Dalším experimentem je porovnávání vliv způsobu řízení při otáčení mobilního robota. Nejprve je otočení prováděno jako opisování určité výseče kružnice, v dalším experimentu je robotem z přilehlé místnosti couváno.

Pokud je při průjezdu chodbou odbočováno za účelem detailnějšího mapování jednotlivých místností, má způsob otáčení mobilního robota dle následujících měření zásadní vliv na tvorby výsledné mapy.

V prvním případě je mobilním robotem v jednotlivých pokojích otáčeno za způsobu opisování výseče kružnice. Jak lze vidět na obrázku 7.5, při postupném průzkumu místností je generovaná mapa postupně křivena. Poslední pokoj je poté od osy chodby značně vychýlen.



Obrázek 7.5 - Mapování přilehlých místností 1

Z výsledků je zřejmé, že princip řízení mobilního robota s výše popsaným způsobem otáčení není vhodný pro účely mapování prostředí. Laserový skener umístěný na robotu při tomto manévru nasbírá malý počet významných bodů z okolí, díky čemuž dojde k nepřesným výpočtům a následně geometrickému zkreslení mapy.

Při druhém experimentu je robotem po průzkumu jednotlivých pokojů vycouváno zpět do chodby. Z obrázku 7.6 lze vidět, že tento způsob manévrování je podstatně vhodnější. V tomto případě totiž nedochází k výraznějšímu pokřivení generované mapy.



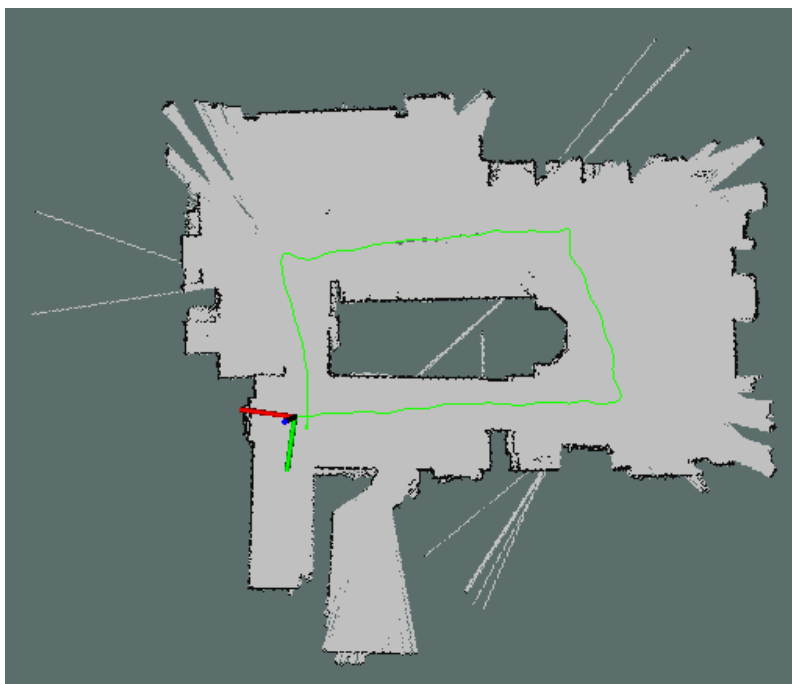
Obrázek 7.6 - Mapování přilehlých místností 2

Výše uvedený způsob provozu měřicí platformy lze doporučit jako vhodný, deformace obrázku v jeho pravé části může být způsobeno zrcadlem, jež je v této místnosti umístěno. Při měření vzdálenosti je laserový paprsek od zrcadla odražen a následná chyba může mít dále vliv na výsledek měření tohoto prostoru. Na obrázku 7.7 je porovnání vygenerované mapy se stavebním plánem půdorysu snímaného podlaží domu. V tomto případě se robot pohyboval zleva doprava. Místnosti, vyjma té se zrcadlem, korespondují se stavebním plánem dostatečně přesně a ukazují na spolehlivost celého procesu při zvolené konfiguraci a provozních podmínkách. Na obrázku 7.7 jsou dále vidět okna v místnostech zobrazené jako výklenky a pozice dveří, jež ohraničují slepá místa, kam lidar nemohl vidět.



Obrázek 7.7 – Porovnání generované mapy se stavebním plánem domu

Jako poslední experiment v této části byl mapován prostor s uzavřenou trasou pohybu. Při tomto měření bylo zkoumáno, jestli dojde ke korektnímu odhadu koncové polohy a následnému napojení generované mapy. Z obrázku 7.8 je viditelné, že ke spojení došlo bez znatelných chyb a obraz je celkově spojitý.

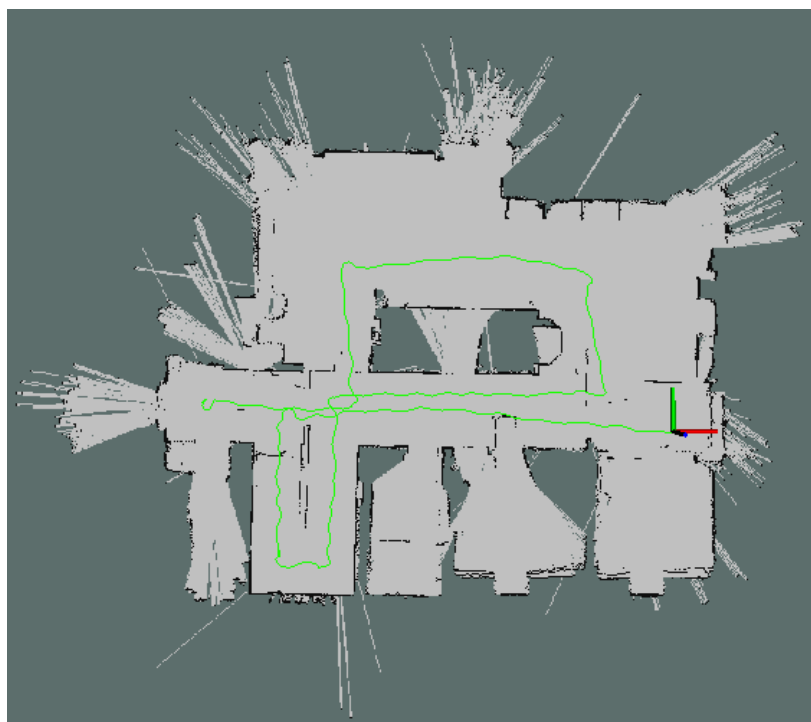


Obrázek 7.8 - Mapování po uzavřené trase

Z výše uvedeného obrázku je patrné, že výpočetní algoritmus nemá problém s navázáním počátečního a koncového bodu, a tedy i kompozicí mapy v této části.

7.2.3 Dům (dvě patra)

Po mapování prostoru nacházejícího se v jedné rovině, jsou provedeny pokusy mapování dvou pater naráz. Překryvy půdorysů jsou následně porovnávány. Měření začíná ve spodním patře, poté je měřicí platforma přenesena po přilehlém schodišti do patra horního, kde následně měření pokračuje, vše bez přerušení snímání okolí. Výsledná mapa je zobrazena na obrázku 7.9.

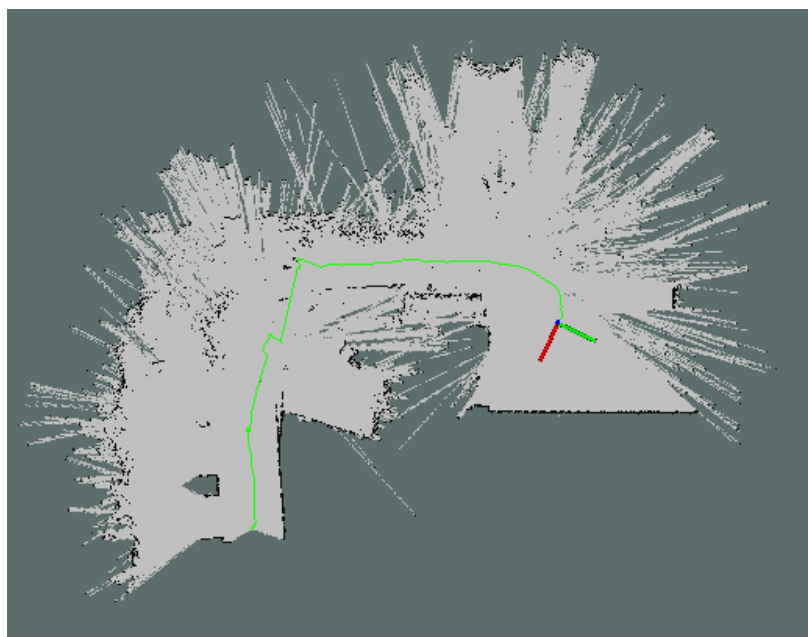


Obrázek 7.9 - Mapování dvou pater naráz

Z obrázku je patrné, že jsou obě patra v zákrytu, algoritmus si tedy dokáže poradit i s tímto problémem a mapy správně vykreslit přes sebe. Pro doplnění je nutno uvést, že měřicí platforma neobsahuje jakékoliv čidlo schopné měřit změnu v ose Z nebo stoupání obecně. Z uvedených výsledků je zřejmé že lze tuto metodu kompozice mapy použít i při vícevrstevném snímání více prostor nacházejících se v zákrytu.

7.2.4 Zahrada

Jako poslední byly testovány vlastnosti zvoleného systému kompozice mapy ve venkovním prostředí, předem je nutno uvést, že tento algoritmus nebyl pro použití ve venkovním prostředí navrhován. Jde tedy pouze o doplňující test k výše uvedenému.



Obrázek 7.10 - Mapování venkovních prostor

Z obrázku 7.10 je patrné, že zvolený algoritmus ve venkovním prostředí většinou selhává. Důvodem je větší vzdálenost mezi jednotlivými objekty, od kterých se paprsek může odrazet a jejich nesourodost. Výsledná mapa tedy nedosahuje užitečných vlastností map předešlých, tedy pořízených ve vnitřních prostorech.

7.2.5 Zhodnocení tvorby map

Po vyhodnocení výše uvedených experimentů lze považovat mobilní robotickou platformu s pásovým podvozkem za vhodný prostředek k mapování vnitřních prostor. Smysl otáčení pásového podvozku tedy netvoří zásadní problém při provozu dálkoměrné sestavy. Během testů bylo dále zjištěno, že sklo nemusí mít vždy na měření zásadní vliv, tedy v případě prosklených vitrín může být paprsek odražen od zadní části nábytku. Průchod paprsku přes skleněnou plochu a jeho následné vyhodnocení je ovšem závislé na mnoha dalších faktorech jakou jsou úhel dopadu, vlastnosti materiálu, vlastnosti prostředí, detekční práh senzoru a další. Pohyb v blízkosti skleněných ploch proto vyžaduje zvýšenou pozornost jak při provozu, tak i při pozdějším zpracování dat. Zrcadla mohou díky svým optickým vlastnostem způsobovat problémy a být tak zdrojem chyb. Lepších výsledků a větší kvality generované mapy je dosaženo, pokud se v prostoru nachází více významných bodů, typicky se může jednat o rohy obvodových zdí, nábytku či jiných předmětů. Výsledky experimentů dále ukazují, že mobilní robotickou platformu pro účel mapování okolí ve vnitřních prostorech lze za určitých předpokladů provozovat i bez dalších senzorů, jako jsou akcelerometry nebo inerciální

jednotky. Na druhé straně je ale nutné bez těchto zpřesňujících měřících členů uvažovat nad řízením robota a vyvarovat se manévřům, které by mohly znejistit výpočet generované mapy.

ZÁVĚR

Po zhotovení a celkové konfiguraci byl mobilní robotický systém testován při různém způsobu ovládání a v různém prostředí. V průběhu testů byl celek odladěn do podoby, kdy je plně provozně schopný a dokáže plnit činnost, pro kterou byl sestaven. Nejprve byla testována přesnost získávané trajektorie v různých prostorách na úseku dlouhém 3 a 5 metrů. Při těchto testech byl potvrzen vliv četnosti okolních předmětů na přesnost získané trajektorie pohybu. Z výsledků jednotlivých testů je patrné, že zvolená konfigurace pásového podvozku spolu s lidarem dokáže spolehlivě zabezpečit dálkoměrná data pro tvorbu mapy okolí. Následující testy byly věnovány už samotné kompozici mapy a vlivu řízení robota na přesnost procesu SLAM. Výsledky ukazují, že způsob, jakým je robot ovládán, může mít za určitých podmínek vliv na výslednou mapu. Mapy generované ve vnitřním prostředí byly dostatečně přesné, což potvrzuje test, kdy byla výsledná mapa porovnána se stavebním plánem budovy. Při tvorbě mapy kruhového prostoru docházelo k správnému napojení na počátek měření. Pokud byl robot provozován ve dvou podlažích nad sebou, byla výsledná mapa rovněž přesná, tedy obě patra lícovala dle skutečnosti. Poslední měření potvrdilo předpokládaný fakt, že kompozice mapy ve venkovním prostředí není možná z důvodu malého počtu významných bodů nacházející se v dosahu lidarů. Uskutečněné testy celkově dokazují, že zhotovený robotický systém je plně použitelný ve vnitřních prostorách, pro které byl navrhnout, a výsledné mapy jsou dostatečně přesné. Jelikož byl robot od počátku navrhován jako modulární s ohledem na možnost budoucího doplnění či dalšího vylepšení, nečinilo dovybavení o laserovou měřicí jednotku problém. Mobilní robot lze do budoucna dále vyvíjet a doplňovat o další měřicí systémy či další výbavu zabezpečující plnění různých úkolů.

Cíle práce byly splněny a kvalita práce ověřena vytvořením příspěvku do mezinárodního recenzovaného časopisu *Journal of Fundamental and Applied Sciences* ISSN 112-9867 který je indexován v databázi *Web of Science*. Diplomová práce byla spolufinancována z interního projektu Univerzity Pardubice č. SGS_2017_030.

Výsledky práce byly dále prezentovány na soutěži STOČ 2018, kde bylo dosaženo druhého místa v kategorii S5 – Mechatronika a robotické systémy.

LITERATURA

- ANANDAN, Tanya. Intelligent Robots: A Feast for the Senses [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Intelligent-Robots-A-Feast-for-the-Senses/content_id/5530
- BERAN, Ladislav, Pavel CHMELARŤ a Luboš REJFEK. Navigation of Robotics Platform using Monocular Visual Odometry [online]. Department of electrical engineering Faculty of electrical engineering and informatics Pardubice, Czech Republic, 2015, , 4 [cit. 2017-05-14].
- BERAN, Ladislav, Pavel CHMELARŤ a Martin DOBROVOLNÝ. Navigation of robotic platform with using inertial measurement unit and Direct Cosine Matrix [online]. University of Pardubice, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Department of Electrical Engineering, Studentská 95, Pardubice, Czech Republic, 2014 [cit. 2017-07-09].
- Čínský navigační systém Beidou / Compass [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/gnss-mimo-evropu/cinsky-beidou---compass/>
- DAVISON, Andrew. SLAM with a Single Camera [online]. University of Oxford, UK, 2002 [cit. 2017-05-14].
- Distributions [online]. In: . 2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://wiki.ros.org/Distributions>
- DOLANSKÝ, Tomáš. Lidary a letecké laserové skenování. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. Acta Universitatis Purkynianae. ISBN 80-7044-575-0.
- Fast Efficient 3D Imaging. 3DEO [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://3deo.biz/applications>
- FRANĚK, Dominik. Řízení mobilního robota [online]. , 54 [cit. 2017-05-14].
- GALILEO - Evropský globální navigační družicový systém [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/galileo/>

Greg Welch, Gary Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599-3175 [pdf document]. July 24, 2006.

Gyroscope. In: Wikipedia [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>

HOKUYO LASER RANGE FINDER COMPARISON. In: Acroname [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://acroname.com/articles/hokuyo-laser-range-finder-comparison>

HOWELL, Dean. Application of Mobile LiDAR on Pothole detection [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://geoawesomeness.com/application-of-mobile-lidar-on-pothole-detection/>

CHMELAŘ, Pavel, Ladislav BERAN, Luboš REJFEK a Nataliia KUDRIAVTSEVA. Effective Lens Distortion Correction for 3D Range Scanning Systems. Zadar [online]. 28.9.2015, 2015 [cit. 2018-05-17].

CHMELAŘ, Pavel, Ladislav BERAN a Luboš REJFEK. The Depth Map Construction from a 3D Point Cloud. MATEC [online]. 2016, 2016 [cit. 2018-05-17].

Indický IRNSS [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/gnss-mimo-evropu/indicky-irnss/>

JANATA, Jaroslav. DGPS - diferenciální GPS [online]. , 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://radio.ok1cjb.cz/index.php/provoz/117-01160>

JAYCON SYSTEMS IMU IMAGE. In: Clker [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.clker.com/clipart-367507.html>

JUEVES. La Comisión Europea pone en marcha EGNOS para mejorar la seguridad aérea. In: Tendencias21 [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://www.tendencias21.net/La-Comision-Europea-pone-en-marcha-EGNOS-para-mejorar-la-seguridad-aerea_a5884.html

Kartografie: historie map, dělení map, tvorba map [online]. , 1 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.gymbuc.cz/vyuka/zemepis/0803kartografie.pdf>

KOHLBRECHER, Stefan. In: Teamhector [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.teamhector.de/the-team?start=1>

- KURUC, Jiří. Jak funguje elektronický kompas? [online]. 2009 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://navigovat.mobilmania.cz/clanky/jak-funguje-elektronicky-kompas/sc-265-a-1314330>
- LEBEDOVÁ, Hana. Kartografie: Historický vývoj tvorby map [online]. , 24 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/62/kar1-le.pdf>
- Lidar. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- NOURY. RoboShop Project: First SLAM-based Robotic Map [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://car.mines-douai.fr/2013/02/roboshop-robotic-map/>
- NUECHTER, Andreas. Robotic 3D Scan Repository [online]. In: . 2016 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://kos.informatik.uni-osnabrueck.de/3Dscans/>
- PAVEL, Krupka. GPS má konkurenci: Satelitní navigační systémy se rozrůstají [online]. 2014 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.svetoutdooru.cz/16965-gps-ma-konkurenci-satelitni-navigacni-systemy-se-rozrustaji/>
- PENG, Shi a Wang DONG. Robot Navigation System with RFID and Sensors [online]. Shanghai Jiaotong University, 2012, 3 [cit. 2017-05-14].
- REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Eulerovy úhly. Encyklopedie Fyziky [online]. 2010 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- RIISGAARD, Soren a Morten RUFUS BLAS. SLAM for Dummies: A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-412j-cognitive-robotics-spring-2005/projects/1aslam_blas_repo.pdf
- Scanning Laser Range Finder URG-04LX-UG01 (Simple-URG): Specifications [online]. 4 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/pdf/URG-04LX_UG01_spec_en.pdf
- SCHERR, Chris, Gavin LOMMATCH, Sam HOOSON a Todd KAISER. Underwater Navigation System [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z:

http://www.ece.montana.edu/seniordesign/archive/SP14/UnderwaterNavigation/kalman_filter.html

SKALKA, Marek. Srovnání lokalizačních technik [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://marek.sk.sweb.cz/lokalizace/kapitola3.html>

ŠAFAŘÍK, Jan. Určování polohy Wi-Fi zařízení [online]. UNIVERZITA PARDUBICE Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2010, 106 [cit. 2017-05-14].

VANÍČEK, Petr. Mobilní systém pro detekci nebezpečných plynů. Pardubice, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Luboš Rejtek.

VOJÁČEK, Antonín. Integrované MEMS GYROSKOPY [online]. 2009 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>

WARBURTON, Simon. Continental develops environment model for automated driving [online]. 2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.road-to-zero.com/technology/continental-develops-environment-model-for-automated-driving/>

What is MEMS Technology? In: Mems-exchange [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>

What is WAAS? [online]. [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: <http://www8.garmin.com/aboutGPS/waas.html>

Woolpert's Industry-Leading Lidar Capabilities. In: Woolpert [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://woolpert.com/solutions/lidar/>

Zbyněk Winkler.Robotika.cz [online]. 2005-12-05 [cit.2007-03-02]. Dostupné z:< <http://robotika.cz/guide/odometry/en>>.

PŘÍLOHY

A - CD

B – Výpočetní graf

C – Tf view frames

Příloha k diplomové práci

Mapování prostoru za využití robotické platformy

Bc. Petr Vaníček

CD

Obsah

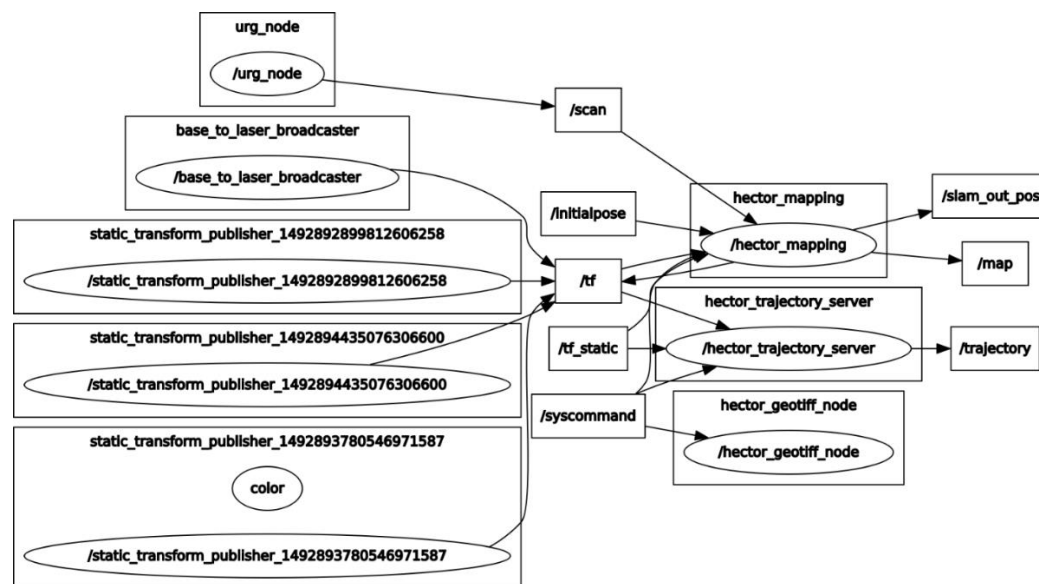
- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF

Příloha k diplomové práci

Mapování prostoru za využití robotické platformy

Petr Vaníček

Výpočetní graf



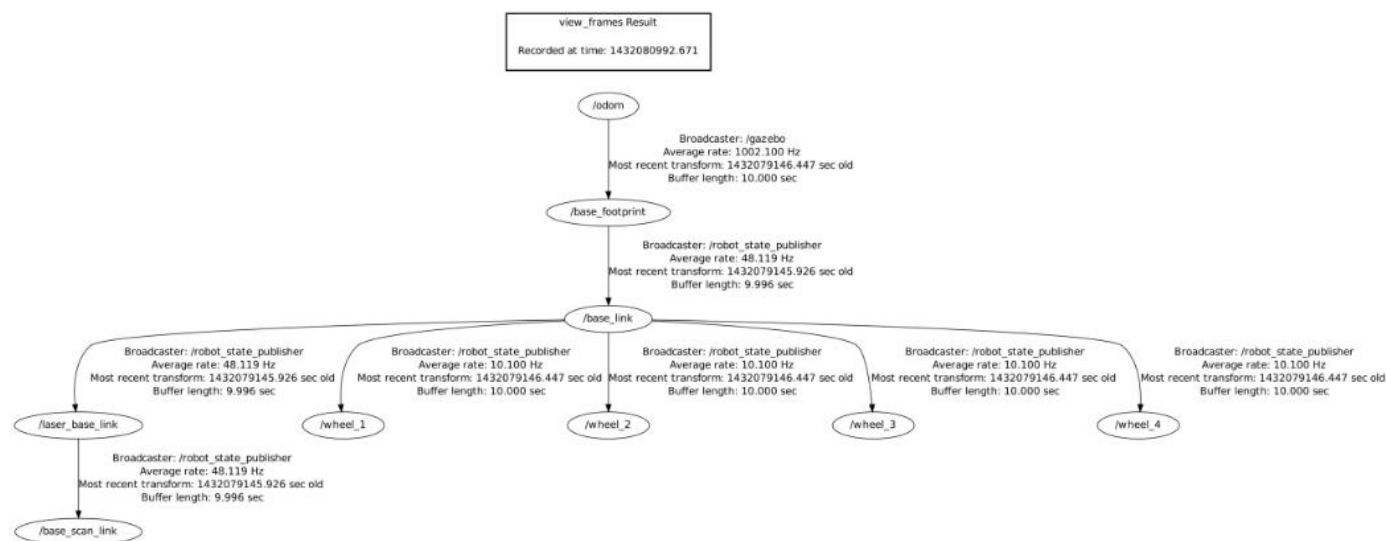
Rqt graph

Příloha k diplomové práci

Mapování prostoru za využití robotické platformy

Petr Vaníček

Tf view frames



Tf view frames (<https://magiccvcs.byu.edu>, 2018)