

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Způsoby lokalizace osob bez signálu GPS

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin JANDA**
Osobní číslo: **E15B0118P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Způsoby lokalizace osob bez signálu GPS**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište systémy lokalizace osob bez signálu GPS.
2. Porovnejte vybrané systémy.
3. Navrhněte způsoby integrace vybraných systémů do textilií.
4. Ověřte funkci vybraných systémů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. IBRAHIM, Magdy a Osama MOSELHI. Inertial measurement unit based indoor localization for construction applications. *Automation in Construction* [online]. 2016, 71, 13-20. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.006. ISSN 09265805.
2. GUAN, Tong, Le FANG, Wen DONG, Dimitrios KOUTSONIKOLAS, Geoffrey CHALLEN a Chunming QIAO. Robust, cost-effective and scalable localization in large indoor areas. *Computer Networks* [online]. 2017, 120, 43-55. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.04.032. ISSN 13891286.
3. Elektronické informační zdroje

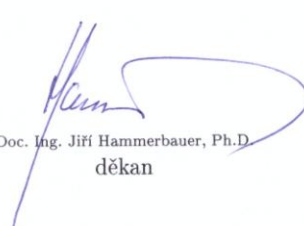
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Partingl

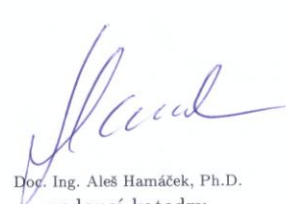
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku určování polohy bez signálu GPS. V první části jsou představeny teoretické metody určování polohy, které jsou doplněny o praktické příklady existujících systémů. V další části se práce zabývá návrhem integrace vybraných navigačních systémů do textilií. V poslední části je realizováno měření reálných systémů.

Klíčová slova

Navigace, lokalizace, určování polohy, inerciální navigace, signálová navigace, smart textilie.

Abstract

This bachelor thesis is focused on problems with localization without GPS signal. In the first part are introduced theoretical methods of localization, real systems are also described. In the next part thesis deals with concept of integration of selected navigation systems into textiles. In the last part measurement of real systems is executed.

Key words

Navigation, localization, position determination, inertial navigation, signal navigation, smart textile.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2018

Martin Janda

Poděkování

Poděkování patří Ing. Martinu Partinglovi za cenné rady při zpracování práce a zapůjčení navigačních modulů pro měření.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 NAVIGACE	11
1.1 POLOHA.....	11
1.2 ZEMĚPISNÉ SOUŘADNICE.....	11
2 NAVIGACE BEZ GPS	12
3 INERCIÁLNÍ NAVIGACE	13
3.1 DRUHY INERCIÁLNÍ NAVIGACE.....	13
3.1.1 <i>Systemy s pevnou základnou</i>	13
3.1.2 <i>Systemy Strapdown</i>	14
3.2 INERCIÁLNÍ MĚŘÍCÍ JEDNOTKA, NAVIGAČNÍ POČÍTAČ	15
3.3 SENZORY PRO INERCIÁLNÍ NAVIGACI	16
3.3.1 <i>Gyroskop</i>	16
3.3.2 <i>Akcelerometr</i>	20
3.3.3 <i>Magnetometr</i>	21
3.4 URČENÍ POLOHY	21
3.5 CHYBA	22
3.5.1 <i>Deterministické chyby</i>	23
3.5.2 <i>Stochastické chyby</i>	23
3.5.3 <i>Omezení šíření chyby</i>	23
4 SIGNÁLOVÉ URČENÍ POLOHY	24
4.1 VZDÁLENOSTNÍ METODY.....	24
4.1.1 <i>Výpočet polohy trilaterací</i>	25
4.1.2 <i>Určení vzdálenosti časovou metodou</i>	26
4.1.3 <i>Určení vzdálenosti metodou síly signálu</i>	27
4.2 ČASOVÉ ROZDÍLOVÁ METODA.....	27
4.2.1 <i>Více uzlové TDoA</i>	27
4.2.2 <i>Více signálové TDoA</i>	29
4.3 ÚHLOVÁ METODA.....	30
4.4 VZDÁLENOSTNĚ ÚHLOVÁ METODA.....	31
4.5 METODA OTISKU	32
4.6 BUŇKOVÁ METODA	33
4.7 METODA ZÚŽENÝCH BODŮ	34
4.8 MAGNETICKÁ NAVIGACE	34
4.9 OBRAZOVÁ METODA	34
4.10 PŘÍKLADY REÁLNÝCH SYSTÉMŮ.....	34
4.10.1 <i>Active Badge</i>	35
4.10.2 <i>Cricket</i>	36
4.10.3 <i>Navigace v sítích Wi-Fi</i>	37
4.10.4 <i>Navigace v sítích Bluetooth</i>	38
4.10.5 <i>Navigace v sítích UWB</i>	39
5 SHRnutí	40
6 NÁVRH INTEGRACE DO TEXTILÍ	45
6.1 INTEGRACE INERCIÁLNÍHO SYSTÉMU	45
6.2 INTEGRACE RFID SYSTÉMU	49

7	TESTOVÁNÍ INERCIÁLNÍCH SYSTÉMŮ	51
7.1	MODUL MOVEA	51
7.1.1	<i>Propojení s telefonem</i>	52
7.1.2	<i>Výstup z aplikace</i>	53
7.2	MODUL ARIANNA	54
7.2.1	<i>Propojení s telefonem</i>	54
7.2.2	<i>Výstup z aplikace</i>	56
7.3	MĚŘENÍ	57
7.3.1	<i>Výchozí určení souřadnic</i>	57
7.3.2	<i>Měření otočení</i>	60
7.3.3	<i>Měření klidové chyby</i>	61
7.3.4	<i>Měření souvislé trasy</i>	62
7.3.5	<i>Měření výšky</i>	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	69
	PŘÍLOHY	71

Úvod

Požadavky na navigační systémy v moderní společnosti stále rostou. Ať už se jedná o oblast osobní, veřejnou, nebo třeba záchranné sbory. Družicové systémy, mezi které se řadí i GPS, ač jsou přesné, nejsou vždy vyhovující a to zejména z důvodu nedostupnosti signálu. Proto musíme vyvíjet systémy, které dokážou pracovat i tam, kde GPS nelze použít, jedná se hlavně o interiéry.

V první, teoretické části práce, budou představeny metody navigace bez signálu GPS. Budou popsány systémy inerciálních navigací a systémy založené na měření rádiových, zvukových, či optických signálů. Zároveň budou zdůrazněny některé reálné systémy, které využívají principů popisovaných metod.

V druhé, praktické části, bude řešen návrh integrace navigačního systému do textílie a bude provedeno měření dvojice inerciálních systémů. Integrace byla navržena pro systém inerciální navigace a pro pasivní systém založený na RFID. V rámci měření byla provedena série testů, které odhalují slabá místa testovaných navigací.

Seznam symbolů a zkratek

a	Zrychlení [m/s^2]
AHRS	Attitude and heading reference system
AoA	Angle of Arrival
AP	Access Point
ATA	Arianna Tracking Algorithm
BLE	Bluetooth Low Energy
BSID	Basic Service Set Identifier
Cell ID	Cell Identity
c_o	Rychlost šíření [m/s]
COO	Cell of Origin
CSI	Channel Signal Information
F	Síla [N]
FOG	Fiber Optic Gyroscope
GPS	Global Positioning System
GSM	Groupe Spécial Mobile
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
m	Hmotnost [g]
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MLAT	Multilateration
MP	Referenční hladina intenzity ve vzdálenosti 1m
MS	Mobile Station
MUSIC	Multiple Signal Classification
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Radio Signal Strength Indicator
SAW	Surface Acoustic Wave
SSID	Service Set Identifier
t	Čas [s]
TA	Timing Advance
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
UWB	Ultra-Wideband
v	Rychlost [m/s]
x	Dráha [m]
ρ	Vzdálenost [m]
ω	Úhlová rychlost [rad/s]
φ	Natočení [$^\circ$]

1 Navigace

Termín navigace je odvozen z latinských slov *navis* (lod') a *agere* (vést, konat), v původním významu tento termín označoval určování polohy a řízení pohybu plavidla z bodu A do bodu B [1]. Dnes se výraz užívá přeneseně pro všechny aplikace, které navigaci využívají (navigace letadel, aut, osob, pohyb zboží...atd.). Abychom mohli navigovat, musíme určit polohu, od které určíme směr příštího pohybu, což můžeme provést pomocí známé polohy konkrétních objektů, čehož lze využít ve známém, zmapovaném prostředí, bohužel ne vždy je prostředí známé [1]. V minulosti lidé pro navigaci v prostředí bez známých lokalizačních bodů (např. otevřené moře) využívali určování směru dle hvězd [1]. Od těchto dob ušly metody navigace velkou cestu a místo hrubého určení směru jsme schopni s velmi vysokou přesností určit přesnou polohu a od ní odvodit další směr.

1.1 Poloha

Výraz poloha je označením pro umístění a orientaci konkrétního tělesa v prostoru, pro vyjádření polohy používáme jednotné značení, např. pomocí souřadnic, které jsou vztažené k mapovému podkladu. Nejrozšířenějšími souřadnicemi jsou zeměpisné souřadnice.

1.2 Zeměpisné souřadnice

Zeměpisné souřadnice jsou určeny rozdělením Země na soustavu rovnoběžek a poledníků, souřadnicový údaj pak obsahuje zeměpisnou délku, neboli úhlovou vzdálenost od poledníku 0° , zeměpisnou šířku, neboli úhlovou vzdálenost od rovníku a výšku nad mořem, jedná se tedy o sférické souřadnice. Abychom se vyhnuli záporným hodnotám, je pro délku poloha nalevo od 0° poledníku označována jako západní šířka a poloha napravo jako východní. Podobná situace je i pro zeměpisnou šířku, kdy poloha pod rovníkem je označena jako jižní délka a poloha nad rovníkem jako severní délka.

2 Navigace bez GPS

Systémy GPS (a jiné družicové systémy) jsou hojně využívány a dosahují velmi přesných výsledků při určování polohy, mají za sebou dlouhodobý vývoj od aplikací v armádě až po každodenní využití v běžném životě. Zásadním nedostatkem družicových systémů je potřeba přímé viditelnosti, v okamžiku přechodu do interiéru tedy nastává problém. Proto musíme zkoumat možnosti navigace uvnitř budov (přesněji míst s nedostupností družicových sítí) nezávisle na družicových systémech.

Nejjednodušším způsobem, jak určit polohu uvnitř budov, jsou různé lokální systémy značení, ať už jde o prostou mapu s vyznačeným bodem "nacházíte se tady", nebo různé ukazatele, či navigační pruhy na stěnách, podlahách. Na podobném principu, jako mapa "nacházíte se tady", lze zprovoznit síť QR kódů, kód na určeném místě načteme např. mobilem a na elektronické mapě nám systém ukáže, kde ono "tady" je. Mnohem zajímavější a technicky náročnější jsou metody, které nám (například prostřednictvím mobilního telefonu, nebo dokonce prostředků virtuální reality) nejen okamžitě zobrazí současnou polohu, ale dokážou nás i navigovat do konkrétního bodu. Pro takové účely se nejčastěji používají systémy inerciální navigace a systémy založené na principu měření rádiových (a jiných) signálů z dostupných sítí.

3 Inerciální navigace

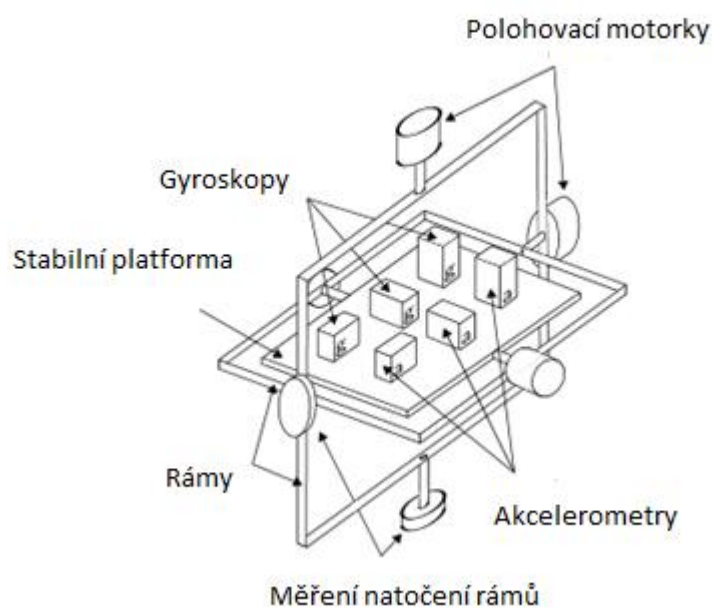
Slovo inerciální je odvozeno z latinského výrazu inertia, česky pasivní, nečinné [2]. Inerciální navigace je samostatný navigační systém založený na činnosti pohybových senzorů a sice gyroskopu a akcelerometru, případně doplňkových senzorů, jako třeba magnetometr [2, 3]. Principem je pomocí senzorů změřit natočení a zrychlení a z těchto údajů pak dopočítat dráhu a určit polohu [3]. Inerciální navigace najde využití v širokém pásmu aplikací, například navigace letadel, ponorek, lodí, ale třeba i raket [3]. Tato navigace pracuje na principu Dead Reckoning (relativní určování polohy), tedy známe pouze výchozí polohu a trajektorie se počítá od této polohy.

3.1 Druhy inerciální navigace

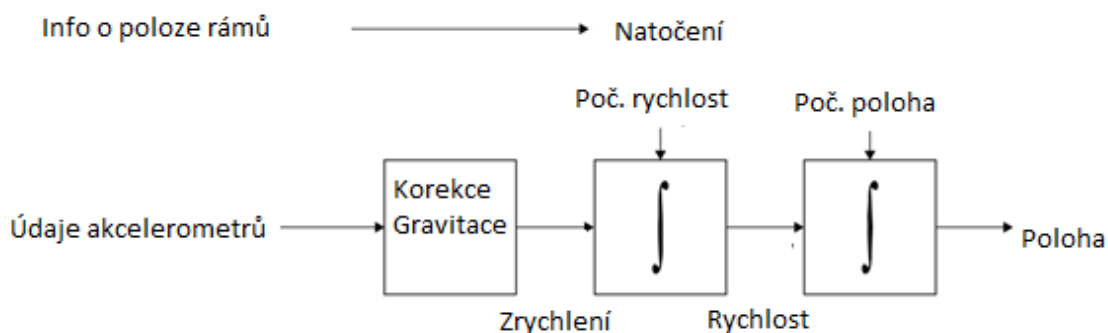
Inerciální navigační systémy můžeme rozdělit na systémy s pevnou základnou a na systémy "Strapdown" [3].

3.1.1 Systémy s pevnou základnou

V těchto systémech jsou inerciální senzory umístěny na desce, která je stabilizována v určité poloze a nepůsobí na ni externí vlivy rotace [3, 4]. Toho je dosaženo umístěním desky do rámu, ve kterých se může volně natáčet a udržovat se tak v rovnovážné poloze pomocí motorků, jak lze vidět na obr. 3.1 [3, 4]. Výhodou je, že osazené senzory měří ve stále stejných referenčních osách, není třeba provádět korekci, jedná se o velmi přesné systémy, výpočet polohy (viz obr. 3.2) je pak jednodušší [4]. Mechanicky se jedná o složité systémy, které jsou drahé na údržbu a právě jejich mechanická složitost může být problém, po sestavení je třeba dlouhých kalibračních procedur a případná nepřesnost natáčení znamená chybu měření [3, 5]. Systémy s pevnou základnou mají nižší chybovost, ze soustavy akcelerometrů je chybou gravitace zatížen pouze akcelerometr měřící vertikální osu, tedy ve směru osy gravitace [3, 5]. Systémy jsou vhodné pro navigaci lodí, raket, apod. [5].



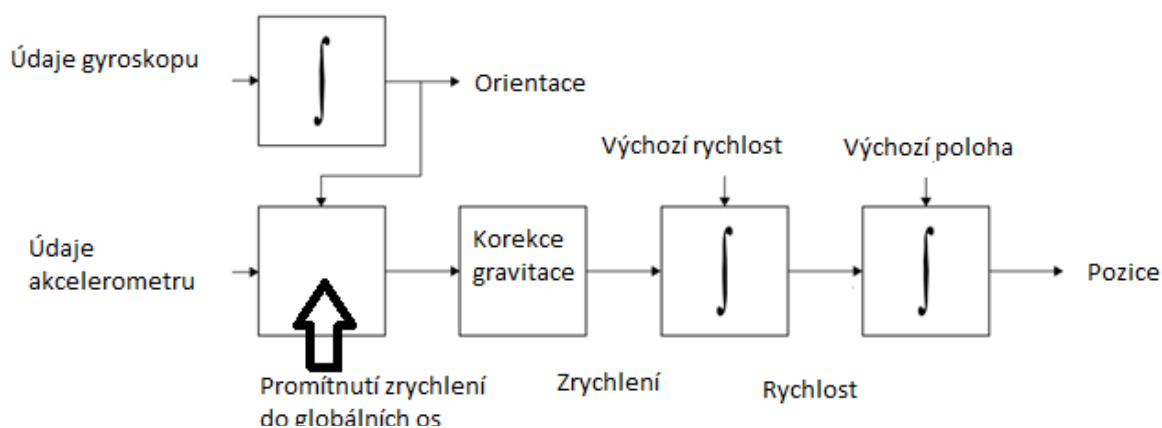
Obr. 3.1: Stabilizace platformy. Převzato z [3]



Obr. 3.2: Schéma výpočtu polohy pro systém s pevnou základnou. Převzato z [3]

3.1.2 Systémy Strapdown

Tyto systémy jsou konstrukčně jednodušší a dosahují menších rozměrů díky absenci rámu a korekčních motorků, inerciální senzory jsou umístěny rovnou na zařízení [3, 4]. Na rozdíl od systémů s pevnou základnou, je zde třeba provádět korekci měření do referenčních os, jelikož osy senzorů se s pohybem a natočením zařízení mění [3, 4]. Cenou za menší rozměry a mechanickou jednoduchost je tedy nutnost složitější algoritmizace, viz obr. 3.3 v porovnání s obr. 3.2 [3]. Tyto systémy jsou zatíženy větší chybovostí, kvůli rotaci celého zařízení je soustava akcelerometrů zatížena chybou gravitace [3, 5]. Vzhledem k jednoduchosti provedení, ceně a rozměrům, jsou Strapdown systémy vhodné k integraci, pro využití v navigaci osob, apod. [3, 5].



Obr. 3.3: Schéma výpočtu polohy pro systém "Strapdown". Převzato z [3]

3.2 Inerciální měřicí jednotka, navigační počítač

Inerciální měřicí jednotka, zkráceně IMU z anglického Inertial Measurement Unit, obsahuje inerciální senzory: gyroskop měřící úhlovou rychlost, akcelerometr měřící zrychlení [3, 6]. Měření pohybu v prostoru je třeba provádět gyroskopem a akcelerometrem ve třech ortogonálních osách, inerciální jednotka tedy obsahuje buď jedno tříosé zařízení od každého, nebo tři jednoosé od každého druhu. Základní měřicí jednotky (pro systémy Strapdown) poskytují informace o zrychlení a úhlové rychlosti bez přepočtu do referenční soustavy, lze je doplnit magnetometrem, který dává informaci o poloze natočení vůči severu, takto doplněná měřicí jednotka se nazývá AHRS z anglického Attitude and heading reference system [4]. Nejvyšším stupněm inerciálních jednotek je INS z anglického Inertial Navigation System, jejichž výstupem jsou kromě inerciálních dat také data o pozici, kurzu [4]. Pro systémy s pevnou základnou není potřeba provádět korekce do referenčních souřadnic.

Navigační počítač má za úkol analyzovat výstupní data z inerciálních senzorů a vytvořit informace o úhlové poloze, rychlosti a poloze sledovaného objektu, pokud známe výchozí počáteční podmínku [7]. Součástí analýzy jsou např. korekce do referenčních souřadnic, různé filtrace, převod polohy do zeměpisných souřadnic, apod. [7].

3.3 Senzory pro inerciální navigaci

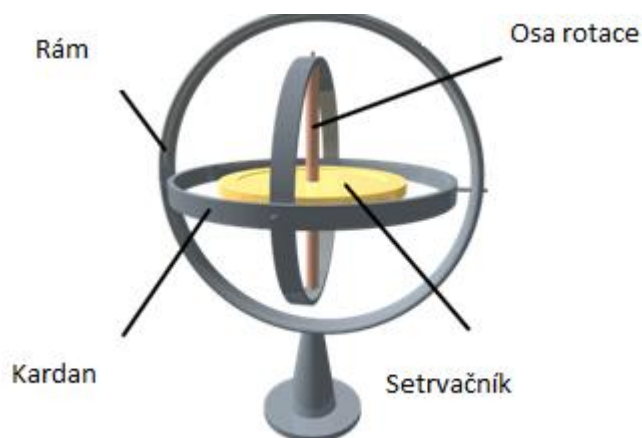
Pro inerciální navigaci využíváme zejména gyroskopy a akcelerometry, často doplňujeme magnetometr. Pro navigaci osob je důležitá mobilita zařízení, dnes se výhradně využívá senzorů v integrované podobě MEMS.

3.3.1 Gyroskop

Gyroskop je rotační setrvačnick. Obecně je gyroskop jakékoliv těleso, které zachovává svou osu rotace díky momentu setrvačnosti, což nazýváme gyroskopický efekt. Gyroskopy používáme pro měření změny polohy, nebo natočení.

3.3.1.1 Mechanický gyroskop

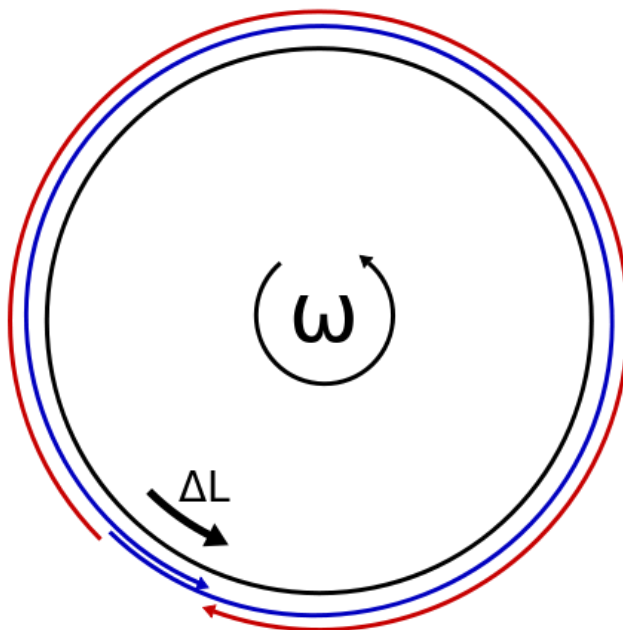
Běžný mechanický gyroskop (obr. 3.4) obsahuje otáčející se setrvačnick zavěšený v kardanově závěsu, což umožňuje otáčení ve třech osách, díky zachování momentu setrvačnosti odolává otáčející se setrvačnick změnám orientace [3, 6]. Proto když celým gyroskopem otočíme, zůstane setrvačnick ve stejné poloze a úhel mezi sousedními kardanými se změní [3]. Pro změření orientace zařízení je třeba změřit vzájemnou polohu kardanových závěsů [3]. Mechanický gyroskop měří orientaci, natočení, oproti tomu téměř všechny moderní gyroskopy měří úhlovou rychlost [3]. Hlavní nevýhodou mechanických gyroskopů je tření v pohyblivých prvcích, které způsobuje ztráty a nepřesnost [3].



Obr. 3.4.: Mechanický gyroskop. Převzato z [8]

3.3.1.2 Optický gyroskop

Gyroskop s optickými vlákny (FOG) je gyroskop založený na principu světelné interference, díky které můžeme určit úhlové natočení [3, 6]. FOG se skládá z velké cívky optického vlákna, do které jsou v opačných směrech vyslány dva světelné pulsy [3]. Pokud snímač rotuje, pak paprsek, který se pohybuje ve směru rotace, bude mít delší cestu k druhému konci vlákna, než paprsek, který cestuje proti směru rotace [3]. Tento jev se nazývá Sagnacův efekt (obr. 3.5). Gyroskopy založené na tomto principu již nemají žádné mechanické ztráty, jsou však technicky náročné na provedení a vzhledem k požadované dlouhé délce vlákna (aby byl rozdíl paprsků měřitelný) jsou relativně velké [3].



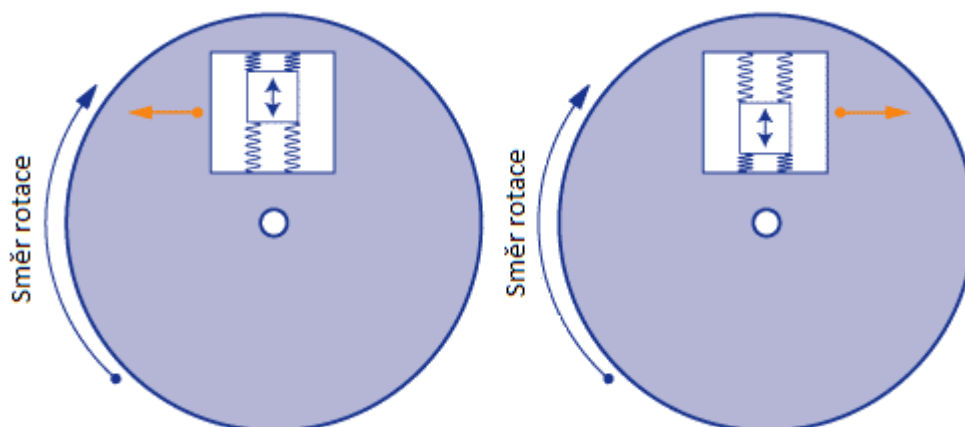
Obr. 3.5: Sagnacův efekt. Převzato z [9]

3.3.1.3 MEMS gyroskop

Ačkoliv se mechanické i optické gyroskopy používají dlouhou dobu, jejich využití je pořád drahé, mají velký počet dílů, jsou rozměrné...atp. a tak je pro levné aplikace nahrazují gyroskopy MEMS [3]. MEMS senzory jsou vyráběny pomocí mikroobráběcích technik křemíku a jejich produkce je velmi levná, navíc jsou jednoduché, sestávají z málo částí. [3]. MEMS gyroskopy využívají Coriolisova efektu, na předmět s hmotností m , který se pohybuje rychlostí v v soustavě, rotující kolem své osy rotace úhlovou rychlostí ω , působí síla F (viz rovnice (3.1)) [3, 10, 11].

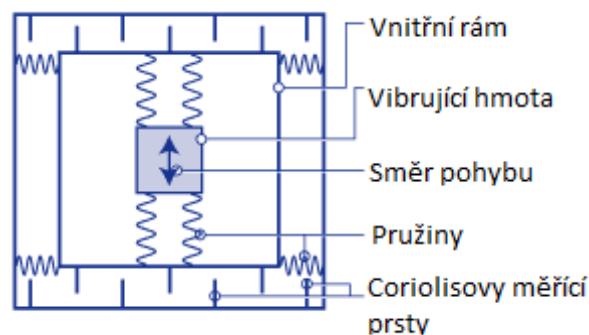
$$F = 2m(\omega \times v) \quad (3.1)$$

Na obr. 3.6 můžeme vidět názorné provedení MEMS gyroskopu a působící Coriolisovu sílu. Objekt (čip) je upevněn v rámu na pružinách, při jeho pohybu směrem ke kraji rotujícího kotouče na něj působí síla směrem doleva, při opačném pohybu pak směrem doprava. Velikost a směr této síly je úměrný směru a rychlosti otáčení, proto tento systém lze využít pro měření úhlové rychlosti [3, 10, 11].



Obr. 3.6: Coriolisova síla působící na objekt. Převzato z [11]

V integrované podobě MEMS gyroskopu (obr. 3.7) jsou součástí provedení jak mechanické mikrosoučástí, tak elektrické obvody. Základem konstrukce je periodicky vibrující struktura se známou hmotností, která je upevněna v rámu [3, 10, 11]. Směr vibrací musí být kolmý na směr otáčení, potom na pohyblivou část čipu působí Coriolisova síla, jejíž velikost je úměrná úhlové rychlosti [10, 11]. Tato síla způsobuje kontrakci pružin a vzájemný posun měřících plošek, které plní funkci kondenzátoru [10, 11]. Výstupem je pak změna kapacity, která je úměrná úhlové rychlosti.



Obr. 3.7: MEMS gyroskop. Převzato z [11]

3.3.2 Akcelerometr

Akcelerometr je senzor, který nám dává informaci o vlastním zrychlení tělesa.

3.3.2.1 Mechanický akcelerometr

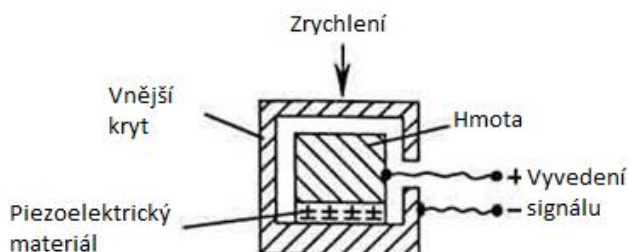
Mechanický akcelerometr si lze představit jako kuličku o známé hmotnosti, která je zavěšena na pružinách. Pokud bychom uvažovali jednoosý akcelerometr, byla by kulička zavěšena na dvou pružinách v dané ose. Při pohybu zařízení se jedna pružina prodlouží a druhá zkrátí, na obě působí síla a tato síla je úměrná zrychlení dle Newtonova druhého zákona (3.2).

$$F = ma \quad (3.2)$$

3.3.2.2 MEMS akcelerometr

V MEMS aplikacích lze akcelerometr realizovat více způsoby, jedná se hlavně o piezoelektrické akcelerometry, piezoresistivní akcelerometry a akcelerometry s proměnou kapacitou, tuto skupinu lze nazvat mechanické MEMS akcelerometry a měří zrychlení dle druhého Newtonova zákona [2, 3, 6, 12]. Další skupinou jsou tzv. SAW akcelerometry, které měří změnu frekvence vibrací elementů, která je způsobena působícím zrychlením [2, 3, 6].

Piezoelektrický akcelerometr (obr. 3.8) využívá piezoelektrického jevu, kdy vlivem zrychlení dochází k výchylce hmoty senzoru a tato hmota působí silou na piezokrystal, který následně generuje náboj, tento náboj je pak úměrný zrychlení [2, 12].



Obr. 3.8: Piezoelektrický akcelerometr. Převzato z [12]

Kapacitní akcelerometr si lze představit jako kapacitor, který má jednu elektrodu pevnou a druhou pohyblivou na pružném závěsu. V důsledku zrychleného pohybu ve směru měřicí osy se elektroda pohybuje a tak se mění kapacita, tato změna kapacity je pak úměrná zrychlení. Praktické řešení je jako víceelektrodový deskový kondenzátor, jehož dielektrikem je vzduch.

3.3.3 Magnetometr

Magnetometr je senzor, který měří sílu magnetického pole, v navigaci jej lze využít pro určování severu, tedy jako kompas. Magnetometry mohou pracovat na principu Hallova jevu, tyto se nazývají magneto-galvanické [2, 6]. Dále lze využít magnetorezistivní magnetometr, který obsahuje magnetický film, který mění odpor podle náboje magnetického pole [2, 6]. Třetí skupinou magnetometrů jsou indukční magnetometry, využívající Faradayova indukčního zákona [2, 6].

3.4 Určení polohy

Polohu získáme integrací výstupních veličin z inerciálních senzorů, akcelerometr nám dává údaj o zrychlení, gyroskop údaj o úhlové rychlosti. Základní princip určení polohy dle [13] pouhou integrací lze vidět na rovnicích (3.3) až (3.6) níže:

Počáteční podmínka, známá poloha:

$$x(t_0), v(t_0), \varphi(t_0) \quad (3.3)$$

Výpočet natočení z údajů gyroskopů

$$\varphi(t) = \int_{t_0}^t \varphi(t) dt + \varphi(t_0) \quad (3.4)$$

Výpočet polohy z údajů akcelerometrů

$$x(t) = \int_{t_0}^t v(t)dt + x(t_0) = \iint_{t_0}^t a(t)dt + v(t_0)t + x(t_0) \quad (3.5)$$

Výsledné údaje o poloze

$$x(t), \varphi(t) \quad (3.6)$$

Poloha je, jak již bylo zmíněno, určována principem Dead reckoning, tedy relativně a každá další poloha je vypočítána z polohy předchozí, z čehož logicky vyplývá, že chyba určení roste s časem.

3.5 Chyba

Chyba určování polohy je způsobena především nelinearitou inerciálních senzorů, výchytkou od skutečné hodnoty, označovanou jako bias (offset), teplotní závislostí senzorů a bílým šumem [3, 4, 14]. Určení polohy probíhá integrací výstupních dat senzorů (viz kapitola 3.4), tedy naintegruje se i chyba, čímž se vliv na přesnost výsledku ještě zvýší. Navíc z principu relativního určování polohy je chyba i závislá na čase (zvyšuje se), s běžícím časem inerciální navigace tedy klesá přesnost [3, 14]. Teoreticky se chyba může šířit až do nekonečna, čemuž lze zamezit např. načtením současné polohy z jiného systému, čímž se předchozí kumulovaná chyba vynuluje, časté je propojení systému inerciální navigace s GPS modulem, který lze v okamžiku dostupnosti použít právě pro korekci polohy [6, 14].

3.5.1 Deterministické chyby

Mezi deterministické chyby gyroskopu i akcelerometru patří bias (ofset), nelinearita součástí, vzájemné vyosení snímačů v tříosém systému, teplotní závislost, tyto chyby lze do jisté míry eliminovat pomocí kalibrace senzorů, kdy zjistíme měřením charakter chyb a při samotném určování polohy můžeme tyto chyby od naměřených hodnot odečítat [3, 15, 16].

3.5.2 Stochastické chyby

Korekce nahodilých chyb je o dost těžší vzhledem k náhodnému charakteru výskytu, korekce se provádí například průměrováním dat, nebo filtrací (často pomocí Kalmanova filtru) [16].

3.5.3 Omezení šíření chyby

Šíření chyby vlivem inerciálních senzorů nelze plně potlačit, ale lze jí snížit např. omezením časového intervalu, kdy se přijímaný signál integruje, pro navigaci chodců to lze řešit systémem detekce kroku, inerciální data budou sbírána pouze, pokud je detekován krok a osoba je tedy v pohybu, pokud krok detekován není, tak navigační počítač data z inerciálních senzorů zahazuje a probíhá pouze pseudo měření s nulovou výstupní hodnotou, metodu lze označit jako krokoměř [6, 13].

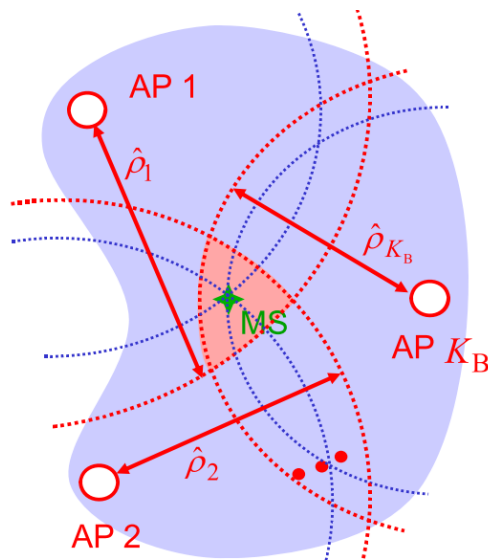
Častým způsobem filtrace je využití integrace pomocí rozšířeného Kalmanova filtru (Kalmanova filtrace pro nelineární soustavu), který odhaduje nejpravděpodobnější stav (polohu) systému kombinováním více vstupních dat (ideálně se tato metoda hodí pro kombinované systémy, např. spojení inerciální navigace s GPS modulem, či dalšími doplňujícími senzory) a tento odhad promítá do naměřených hodnot například zpřůměrováním, pracuje ve dvou fázích - predikce a korekce [3, 14, 17].

4 Signálové určení polohy

Skupina těchto metod zahrnuje určení polohy z rádiových, optických, či zvukových signálů. Pro potřeby navigace je nutné, aby oblast byla pokryta místní sítí daného systému, může se jednat o systémy, ve kterých je navigace jako druhotná služba (Wi-Fi, Bluetooth, telefonní síť), nebo systémy přímo vytvořené pro navigaci v daném prostoru (senzorové sítě, např. pomocí RFID tagů a čteček). Velký problém je šíření vln odrazy, což silně znesnadňuje lokalizaci ve vnitřních prostorech, zejména se složitou strukturou, případné lokacích plných překážek, lidí.

4.1 Vzdálenostní metody

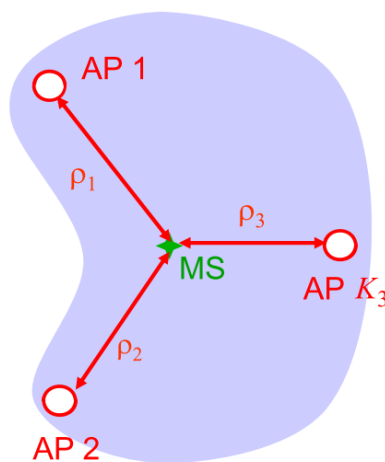
Jedná se o metody, jejichž principem je určit vzdálenost mezi mobilní stanicí (MS z anglického Mobile Station) a přístupovým bodem (AP z anglického Access Point) a z této vzdálenosti výpočtem určit polohu. Častým výpočetním postupem je určení polohy pomocí trilaterace kružnic. Principem trilaterace je dopočítat polohu neznámého bodu (MS) z polohy známých bodů (AP) a změřených vzdáleností mezi MS a jednotlivými AP [13, 18]. Změřená vzdálenost MS od AP definuje poloměr kružnice, kterou lze opsat okolo AP, pokud změříme vzdálenosti od více AP, lze předpokládat, že sledovaná MS bude ležet na průniku těchto kružnic [13, 18]. Pokud bychom použili pouze dvou AP a opsali jim kružnici, může nastat situace, že kružnice mají dva průsečíky a polohu tedy nelze přesně určit, proto pro přesnější lokalizaci v rovině potřebujeme signál z minimálně tří AP (viz obr. 4.1 modré kružnice), v prostoru pak pro konkrétní pozici potřebujeme signál minimálně ze čtyř AP [13]. V praxi musíme předpokládat, že změřené vzdálenosti od jednotlivých AP neodpovídají skutečnosti, pak je poloha určována jako střed oblasti, kterou kružnice vytyčují (viz obr. 4.1 červené kružnice), přesná poloha v oblasti se dopočítává např. pomocí clusterových metod [13, 18]. Přesnost metody se zvyšuje s počtem kružnic. Klíčovým problémem určení polohy je změření vzdáleností od AP, čehož můžeme dosáhnout více způsoby a sice pomocí měření časového rozdílu, pomocí měření intenzity signálu, pomocí úhlů paprsků (vede také na triangulaci) [13].



Obr. 4.1: Určení polohy trilaterací za předpokladu nedokonalého určení poloměrů, modré kružnice - přesné určení polohy, červené kružnice - nepřesné určení polohy, MS se nachází v oblasti, kterou kruhy vytyčují. Převzato z: [13]

4.1.1 Výpočet polohy trilaterací

Za předpokladu dobře naměřených vzdáleností můžeme polohu MS přesně dopočítat soustavou rovnic. Necht' se neznámá stanice nachází na souřadnicích MS $[X_{MS}; Y_{MS}]$ (viz obr. 4.2), známe polohu tří přístupových bodů $AP_1[X_1; Y_1]$, $AP_2[X_2; Y_2]$, $AP_3[X_3; Y_3]$, známe vzdálenosti mezi AP a MS (obráz. 4.2), $|AP_1 MS| = \rho_1$, $|AP_2 MS| = \rho_2$, $|AP_3 MS| = \rho_3$, pak lze definovat rovnice (4.1) až (4.3) [13], jejich úpravou se dostaneme na (4.4) a (4.5):



Obr. 4.2: Výpočet polohy trilaterací. Převzato z: [13]

Výchozí soustava rovnic:

$$1) (X_{MS} - X_1)^2 + (Y_{MS} - Y_1)^2 = \rho_1^2 \quad (4.1)$$

$$2) (X_{MS} - X_2)^2 + (Y_{MS} - Y_2)^2 = \rho_2^2 \quad (4.2)$$

$$3) (X_{MS} - X_3)^2 + (Y_{MS} - Y_3)^2 = \rho_3^2 \quad (4.3)$$

Úprava rovnic:

$$1-2) 2X_{MS}(X_2 - X_1) + 2Y_{MS}(Y_2 - Y_1) = \rho_1^2 - \rho_2^2 - X_1^2 + X_2^2 - Y_1^2 + Y_2^2 \quad (4.4)$$

$$1-3) 2X_{MS}(X_3 - X_1) + 2Y_{MS}(Y_3 - Y_1) = \rho_1^2 - \rho_3^2 - X_1^2 + X_3^2 - Y_1^2 + Y_3^2 \quad (4.5)$$

4.1.2 Určení vzdálenosti časovou metodou

V literatuře označováno jako ToA (z anglického Time of Arrival). Principem této metody určení vzdálenosti MS od AP je sledování rozdílu mezi časem odeslání z MS t_{MS} a časem přijetí na AP t_{AP} , ze známé rychlosti šíření c_0 pak lze určit vzdálenost ρ dle rovnice (4.6) [13].

$$\rho_n = c_0(t_{APn} - t_{MS}) \quad (4.6)$$

Funkčnost je závislá na perfektní časové synchronizaci vysílače a přijímače, MS vysílá testovací signál s paketem, který obsahuje časovou informaci o času odeslání, AP tuto informaci dešifruje a přidává čas přijetí [13, 19]. Metodu lze vylepšit o obousměrnou komunikaci, kdy odpadá potřeba synchronizace, časový údaj je měřen pouze jedním zařízením [13]. Musíme předpokládat časovou chybu danou rychlostí zpracování signálů, tato chyba je měřitelná a lze ji ve výpočtu potlačit [13, 20, 21]. Při použití obousměrné komunikace lze určit vzdálenost ρ z rovnice (4.7), kde t je čas mezi odesláním a přijetím na stejném zařízení, Δt je časová chyba zpracování signálů a v je rychlost šíření signálu v prostředí [21].

$$\rho = \frac{(t - \Delta t) \cdot v}{2} \quad (4.7)$$

Časovou metodu lze dobře použít v prostředí, kde můžeme předpokládat přímé šíření signálu mezi AP a MS, v případě šíření pomocí odrazů je metoda pro geometrické určení polohy nevhodná [13].

4.1.3 Určení vzdálenosti metodou síly signálu

Metoda dává do souvislosti vzdálenost od AP a sílu signálu vysílaného AP, nejsilnější signál bude v těsné blízkosti AP, s rostoucí vzdáleností bude síla tohoto signálu klesat kvůli útlumu prostředí [13]. Pro určení síly signálu používáme nosič informace o jeho intenzitě RSSI (z anglického Radio Signal Strength Indicator), konkrétně se jedná o hladinu intenzity, každý výrobce implementuje lehce odlišný výpočet a je tak třeba znát dokumentaci [13, 18, 22]. Původní využití RSSI je pro rozlišení, zda je vysílač blízko, nebo daleko [18]. Metoda je závislá na přímém šíření, pokud předpokládáme šíření odrazy, informace o RSSI mohou být zkreslené [13, 18]. Základním vzorcem lze RSSI vyjádřit dle rovnice (4.8) a vzdálenost pak vypočítat dle (4.9), kde MP je referenční hodnota v dané vzdálenosti (často 1m), n je útlumová konstanta prostředí, ρ vzdálenost mezi MS a AP [23].

$$RSSI = -10n \log_{10} \rho + MP \quad (4.8)$$

$$\rho = 10^{\frac{MP - RSSI}{10n}} \quad (4.9)$$

4.2 Časově rozdílová metoda

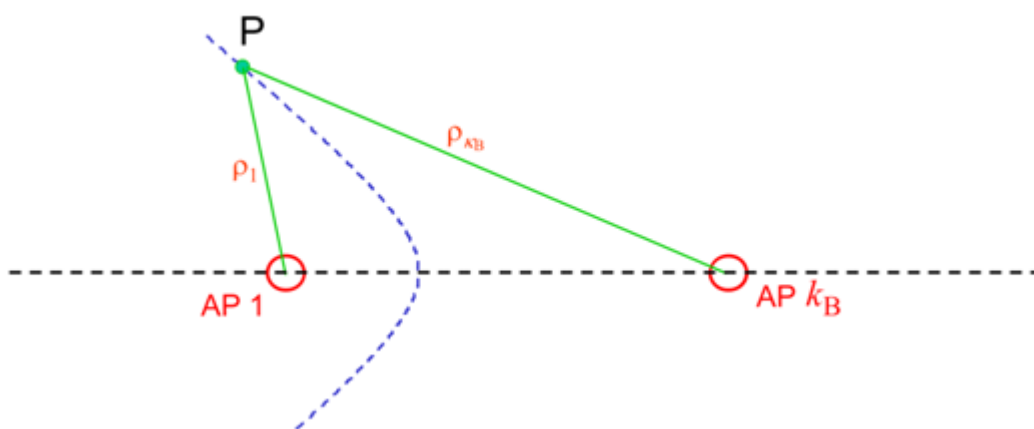
Metoda, označovaná jako TDoA (z anglického Time Difference of Arrival), je založena na principu měření časového rozdílu přijetí dvou signálů [20, 24]. Na rozdíl od ToA není tato metoda zatížena chybou doby zpracování signálu [20, 24]. Rozlišujeme dvě varianty časově rozdílové metody a sice více uzlové TDoA (Multi-node TDoA) a více signálové TDoA (Multi-signal TDoA) [24].

4.2.1 Více uzlové TDoA

Více uzlové TDoA je založeno na měření rozdílu časového přijetí více signálů (šířených stejnou rychlostí) na více AP [13, 24]. Na rozdíl od vzdálenostní metody ToA, nás zde nezajímá vzdálenost mezi AP a MS, ale rozdíl vzdáleností (4.10) mezi $|MS AP_n|$, kde n je reálné číslo. [13]. Ve stanovený čas vyšle MS testovací signál o známé rychlosti

šíření, který přijmou dvě AP o známé a neměnné poloze, tyto AP zaznamenají čas šíření a vyhodnocují časový rozdíl. AP_1 a AP_2 můžeme označit za ohniska hyperboly (obr. 4.3) (na které leží poloha MS), jejíž reálná osa je právě změřený časový rozdíl a časová souslednost určuje větev, které poloha MS náleží [13, 24, 25]. Přidáním AP_3 můžeme vytvořit další dvojici ohnisek AP_1 a AP_3 , čímž nám vznikne další hyperbola a polohu MS lze určit jako průnik těchto hyperbol, v prostoru pak potřebujeme ještě jednu hyperbolu navíc, vždy tvoříme soustavu hyperbol s jedním společným ohniskem [24, 25].

$$\Delta\rho_n = c_o(t_{AP_1} - t_{AP_n}) \quad (4.10)$$



Obr. 4.3: Hyperbolická množina bodů polohy MS v okolí dvou AP. Převzato z: [13]

Určení polohy probíhá pomocí řešení soustavy hyperbolických rovnic, metoda bývá označována jako multilaterace (MLAT), nebo hyperbolická navigace [13, 20, 24]. Pro přesné měření časů příchodu testovacího signálu na jednotlivé AP je třeba jejich přesná synchronizace, metoda je rovněž závislá na přímém šíření signálu, pokud se signál šíří odrazy, pak vzniká chyba [20, 24, 25].

4.2.2 Více signálové TDoA

Více signálové TDoA je založeno na šíření dvou signálů s rozdílnou rychlostí šíření, používá se například rádiových vln společně s ultrazvukovými (nebo jiné signály se značně rozdílnou rychlostí šíření) [24]. Jedno AP přijímá oba signály a vyhodnocuje časový rozdíl Δt jejich přijetí [19, 24]. Odpadá potřeba synchronizace mezi MS a AP, protože AP jako první přijme rádiový signál (šířící se vyšší rychlostí v_{rf}), což jej zároveň připraví na přijetí ultrazvukového signálu (s rychlostí v_{us}), na druhou stranu je potřeba sofistikovanější hardware, kvůli využití dvou druhů signálů [24]. Vzdálenost ρ je určena časovým rozdílem přijetí signálů a jejich rychlosti šíření v prostředí dle (4.11) a (4.12), vypočtená vzdálenost určuje poloměr kružnice, na které se MS nachází, při znalosti více kružnic probíhá výpočet pomocí soustavy kružnicových rovnic, tedy trilaterací, viz kapitola 4.1.1 [24].

Výchozí rovnice pro časový rozdíl [26]

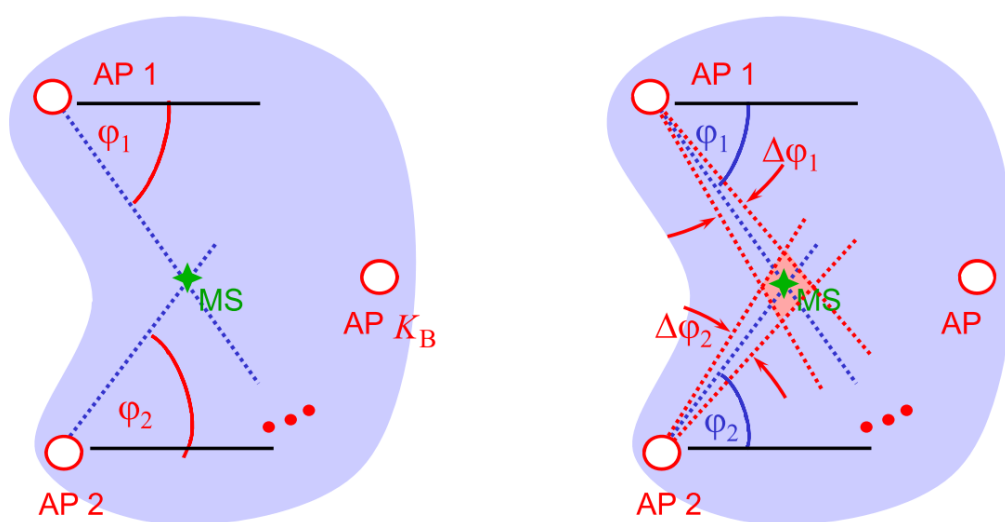
$$\Delta t = \frac{\rho}{v_{us}} - \frac{\rho}{v_{rf}} \quad (4.11)$$

vyjádříme vzdálenost ρ

$$\rho = \Delta t \frac{(v_{us} \cdot v_{rf})}{(v_{rf} - v_{us})} \quad (4.12)$$

4.3 Úhlová metoda

Úhlová metoda, AoA (z anglického Angle of Arrival), je založena na principu měření úhlu přijatých signálů a dopočtení polohy pomocí triangulace [13, 24]. Ze znalosti úhlu přijetí můžeme stanovit směr, odkud signál přichází, ze znalosti dvou takových úhlů lze nalézt společný průsečík, který odpovídá poloze hledané MS (obr. 4.4 vlevo) [13, 24]. Úhly lze měřit na straně AP (remote positioning), nebo na straně MS (self positioning), měření úhlů lze realizovat buď pomocí pohyblivé směrové antény, nebo statického pole antén [13, 24].



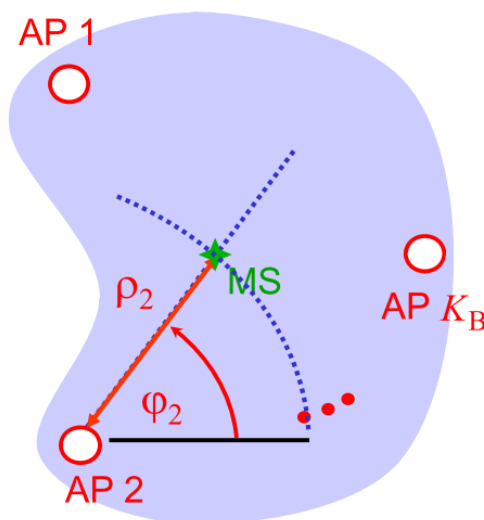
Obr. 4.4: Úhlová metoda určení polohy. Převzato z: [13]

Pokud je určení úhlů nepřesné, polopřímky směru přijetí signálu vytyčují prostor, ve kterém se hledaná MS nachází (obr. 4.4 vpravo), potom je třeba použít např. clusterových metod pro stanovení přesné polohy [13]. Metoda je opět silně závislá na přímém šíření signálu [13, 24].

4.4 Vzdálenostně úhlová metoda

Metoda je kombinací úhlové metody (AoA) a vzdálenostní metody. Principem je určit polohu MS (viz obr. 4.5) ze znalosti úhlu přijetí signálu a vzdálenosti mezi MS a AP [13]. Výhodou je potřeba pouze jednoho AP, nevýhoda opět předpoklad přímého šíření signálu [13]. Pro určení vzdálenosti lze použít některou ze vzdálenostních metod, pro určení úhlu se použije stejné techniky, jako při úhlové metodě [13]. Polohu MS $[X_{MS}, Y_{MS}]$ (viz obr.4.5) lze určit ze soustavy rovnic (4.13), známe polohu AP $[X_{AP}, Y_{AP}]$, vzdálenost mezi AP a MS ρ a úhel signálu od referenční roviny φ [13].

$$\begin{pmatrix} X_{MS} \\ Y_{MS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{AP} \\ Y_{AP} \end{pmatrix} + \rho \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (4.13)$$



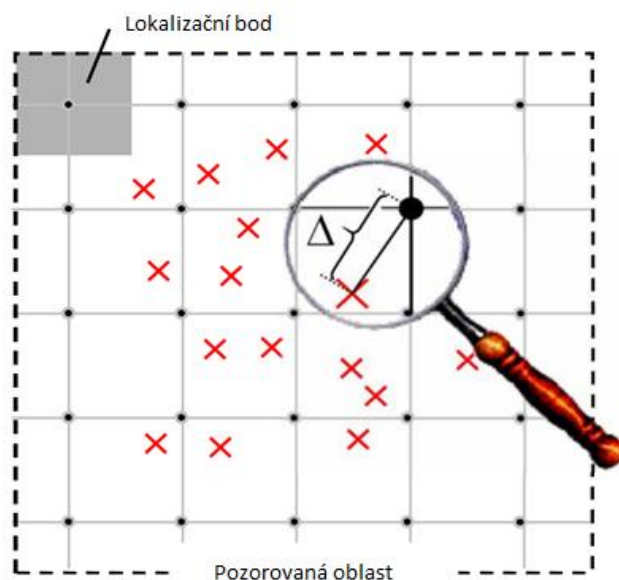
Obr. 4.5: Vzdálenostně úhlová metoda. Převzato z: [13]

4.5 Metoda otisku

Metoda otisku, označována jako fingerprint, je založena na principu měření veličiny (nejčastěji síla signálu) použité k lokalizaci a porovnání naměřených hodnot s virtuální mapou prostředí. Metoda pracuje ve dvou částech, offline fáze a online fáze [18, 22].

V offline fázi se vytváří virtuální mapa prostředí (obr. 4.6), uvažujme budovu pokrytou nějakou sítí vysílačů (Wi-Fi, Bluetooth), každý vysílač má v rámci místní sítě unikátní ID a každý vysílá [13, 18, 22]. Rozdělíme-li měřený prostor (uvažujme například jedno patro, tedy rovinu) mřížkou na soustavu čtverců, můžeme každému čtverci (o známé poloze) přiřadit vektor, který ponese informaci o ID vysílače a RSSI daného vysílače, předpokládejme hustější pokrytí, v každém čtverci lze tedy zachytit signál více vysílačů [13, 18]. Mapu otisků můžeme vytvořit buď fyzickým měřením, nebo použitím matematického modelu šíření [27].

V online fázi probíhá samotná lokalizace, MS, jejíž polohu chceme určit, změří intenzity vysílačů v dosahu a získaný otisk porovná s virtuální mapou vytvořenou v offline fázi, nejbližší shoda je pak přiřazena jako poloha MS, na obr. 4.6 můžeme vidět znázornění chyby určení polohy v rámci hledání nejbližší shody [13, 18, 22].



Obr. 4.6: Určení polohy metodou otisku, černé tečky známé polohy v mapě, červené křížky reálné polohy MS. Převzato z: [13]

Problematikou metody je jakákoliv změna ve sledovaném prostředí, umístění překážek změni charakteristiku šíření signálů a pozmění tedy virtuální mapu, v případě velkých změn v prostředí (stavba zdí, umístění velkých objektů) je třeba vytvářet mapu novou, v případě menších změn (pohyb lidí, otevření dveří) je třeba počítat se zatížením chybou [13, 18].

Z obr. 4.6 je patrné, že jemnější dělení vede k přesnějšímu určení polohy (pokud je dělení pořád dostatečně hrubé, aby byla změna intenzit měřitelná), což znamená velkou databázi otisků. Nejefektivnější řešení je umístění databáze na serveru sítě, který bude zároveň realizovat porovnání otisků [13, 18]. Metoda je vhodná pro prostředí, ve kterém se signály šíří odrazy, nevyžaduje přímou viditelnost [13].

4.6 Buňková metoda

Někdy označováno jako COO (z anglického Cell of Origin), nebo Cell ID (z anglického Cell Identity), je nejjednodušší metoda používaná k lokalizaci v buňkových sítích, polohu určuje jednoduchým přiřazením známé polohy vysílače sledované MS [27–29]. Metoda je často spojována s buňkovou sítí GSM, oblast je rozdělena na buňky, každá buňka má svůj vysílač, poloha MS je určena jako poloha známého vysílače, se kterým MS komunikuje, chyba je na úrovni rozměrů buňky cca od desítek metrů až do desítek kilometrů [27–29].

V rámci GSM lze metodu rozšířit o časový předstih TA (z anglického Timing Advance), tato rozšířená buňková metoda (Cell ID + TA) pracuje právě s TA parametrem, pomocí kterého přibližně stanovuje vzdálenost MS od vysílače [27–29]. Primárně je TA určeno pro synchronizaci MS kvůli časovému multiplexu, MS musí vysílat s předstihem, aby vysílání dorazilo v určeném okamžiku a nekolidovalo s jinou MS [27–29]. TA rozděluje vzdálenost na 64 částí po 550m (maximální poloměr buňky je 35 km) [27–29]. Vysílač vysílá sektorově (pokrývá 360° pomocí soustavy sektorových antén), pokud víme, kterou anténu MS právě používá, známe přibližně směr, kterým se MS nachází [27–29]. Lze tedy určit přibližně směr a vzdálenost (s přesností 550m) [27–29].

4.7 Metoda zúžených bodů

Metoda vychází ze stejné logiky jako buňková, přiřazuje polohu známého vysílače jako polohu sledované MS [6]. Pokud sledovanou oblast (například kancelářskou budovu, školu) pokryjeme vysílači na místech, kterými musí osoby nutně projít (dveře, chodby) a pohybujícího se člověka vybavíme přijímačem, který s sebou bude nosit, můžeme sledovat jeho pohyb po dané oblasti. Výhodou je možnost realizace pasivního systému, kdy vysílačem je např. RFID čtečka a přijímačem pouze pasivní RFID známka, pokud osoba se známkou projde okolo čtečky, systém uloží do databáze polohu čtečky jako současnou polohu sledované osoby. Metoda je jednoduchá na implementaci a nevyžaduje složité algoritmy.

4.8 Magnetická navigace

Principem magnetické navigace je zachycení abnormalit magnetického pole Země (způsobené například masivními překážkami, železem, apod.) [18]. Samotné určení polohy probíhá podobně, jako v případě metody otisku (kapitola 4.4), nejdříve je třeba vypracovat virtuální mapu budovy, kde budou jednotlivým místům přiřazeny magnetické otisky, poté, ve fázi lokalizace, je naměřený otisk porovnáván s předem vytvořenou databází a poloha je určena dle nejbližší shody [18]. Otiskem je zde vektor magnetického pole, nejsou zde tedy žádné ID vysílačů, existuje větší šance, že otisk bude na více místech stejný, řešením je například přiřazení polohy dle vektoru blízkému předchozí poloze [18].

4.9 Obrazová metoda

Někdy také nazýváno počítačové vidění. Základem je mobilní stanice vybavená fotoaparátlem či kamerou (ideálně třeba mobilní telefon), kamera snímá okolí, ve kterém se osoba pohybuje a hledá význačné body (značka na zdi, či podlaze, stavební prvky, QR kódy a jiné), pomocí kterých lze přiřadit polohu MS [22]. Opět je tedy třeba vytvořit virtuální mapu, ve které budou uloženy známé polohy orientačních objektů, ve fázi navigace je pak obraz z MS porovnáván s touto mapou [22].

4.10 Příklady reálných systémů

Systémy se od sebe liší hlavně typem použitých signálů, používáme například systémy pracující s infračerveným zářením, u nich je požadována přímá viditelnost, signál není

schopný procházet překážkami, což znemožňuje jejich nasazení ve specifických lokacích, kde nelze přímou viditelnost zajistit, příkladem takových systémů je Active Badge [21]. Dále používáme systémy využívající ultrazvukových signálů, výhodou je nízká cena a jednoduchá implementace, také není třeba přímá viditelnost, ultrazvukové vlny se šíří odrazy, což snižuje přesnost systému [21]. Často se používá propojení ultrazvukového systému se systémem rádiových vln, což sice vede na vyšší přesnost, ale také na vyšší cenu, příkladem systému využívající ultrazvukové a rádiové vlny je Cricket [21]. Další variantou je využití pouze rádiových vln, taková lokalizace může být například druhotnou službou existující rádiové sítě (Wi-Fi, Bluetooth, mobilní síť, RFID), nebo přímo vytvořena pro účely navigace [21]. Rádiové signály dokáží procházet některými překážkami, trpí také na multipath efekt a tak jsou potřeba robustní algoritmy pro zpřesnění [21]. Rozlišujeme rádiové systémy v úzkém pásmu (Wi-Fi, Bluetooth, RFID) a širokém pásmu (UWB) [21]. Příkladem lokalizačních metod využívajících rádiové sítě může být například Microsoft RADAR pracující ve Wi-Fi sítích, nebo iBeacon implementovaný do Bluetooth sítí [21].

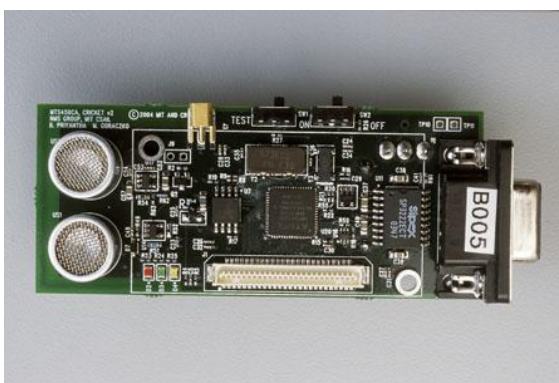
4.10.1 Active Badge

V českém překladu můžeme systém pojmenovat jako Aktivní odznak, jedná se o jeden z prvních navigačních systémů, který byl vyvinut speciálně pro navigaci uvnitř budov [24, 30]. Osoba, kterou chceme lokalizovat, s sebou musí nosit svůj unikátní odznak, který vysílá každých 15s infračervený kód, obsahující unikátní identifikátor [24, 30]. Signály jsou sbírány senzory, které jsou rozmístěny ve sledované budově (a známe jejich polohu), pokud senzor zachytí signál z odznaku, je poloha senzoru systémem přiřazena jako poloha osoby [24, 30]. Infračervený signál (IR) je modulován pomocí pulzně šířkové modulace (PWM), díky kompaktnosti vysílače a přijímače IR lze realizovat zařízení malých rozměrů (nositelný odznak má rozměry 55x55x7mm a váží 40g), navíc je IR technologie levná [30]. Vzhledem k tomu, že se jedná o aktivní systém, je napájen baterií, při vysílání signálu pouze každých 15s (což vede ke značné úspoře energie) a předpokládaných rozměrech napájení dle rozměrů pouzdra odznaku, lze předpokládat výdrž baterie až rok [30]. Součástí je také detektor světla, který v případě tmy zastaví periodické vysílání a tím spoří baterii [30]. Odznak je třeba nosit vně oblečení, například na opasku, na kapse a podobně [30].

Senzory se umísťují na strop, případně vysoko na zdi, ideální je využít existující počítačové sítě k připojení senzorů [30]. Topologie sítě je navržena tak, že jedna pracovní stanice (workstation) může obsluhovat až 128 senzorů (napájených ze sítě) připojených přes RS232 port, jednotlivé pracovní stanice mohou mezi sebou být propojeny například pomocí ethernetu [30]. Středobodem sítě je centrální počítač (server), který vyhodnocuje údaje z jednotlivých senzorů a určuje polohu osob, přístupem k datům na serveru lze vyhledávat hledané osoby [30].

4.10.2 Cricket

Navigační systém Cricket funguje na principu metody více signálového TDoA, konkrétně využívá rádiový signál a ultrazvukový signál [24, 26]. Systém Cricket byl vyvíjen s důrazem na soukromí osob, funguje decentralizovaně, polohu určuje samotné zařízení, které s sebou uživatel nosí, nikoliv centrální server [24, 26]. Po sledované budově jsou rozmístěny (ideálně na stropě) AP nazývané majáky (z anglického Beacon), které neustále vysílají rádiový signál, který je zároveň nositelem informací o daném majáku (ID, souřadnice) [26]. Současně s počátkem rádiového vysílání maják vygeneruje také krátký ultrazvukový impulz (který již není nositelem žádné informace), aby mohla MS (zde nazývaná jako posluchač, z anglického listener) vypočítat vzdálenost pomocí více signálového TDoA (viz kapitola 4.2.2) [24, 26]. Jednotka Cricket (obr. 4.7) je univerzální, může být v režimu majáku, nebo posluchače, Posluchač pouze pasivně přijímá signály a určuje svojí polohu, sám o sobě nic nevysílá, maják pouze vysílá [26, 31]. Za předpokladu přímé viditelnosti mezi majákem a posluchačem a přímého šíření signálu je systém schopný velmi vysoké přesnosti určení polohy s chybou 2cm pro prostor o rozměru 10m³ [31].



Obr. 4.7: Jednotka Cricket. Převzato z: [32]

4.10.3 Navigace v sítích Wi-Fi

Wi-Fi je technologie primárně určená pro šíření bezdrátového internetového připojení, pracuje ve volném pásmu 2,4 GHz, novější varianty počítají i s pásmem 5 GHz. Wi-Fi sítě jsou popsány standardy IEEE 802.11x, v dnešní době jsou často používány 802.11n a 802.11ac.

Vysílací bod je nazýván přístupový (AP), každá síť je charakterizována svým identifikátorem SSID¹ (Service Set Identifier), který je neustále pravidelně vysílán do okolí a umožňuje lokalizovat dostupnost sítě. Kromě SSID se používá ještě BSSID (Basic Service Set Identifier), který vyjadřuje fyzickou adresu AP složenou z identifikátoru výrobce a identifikátoru rádiového chipsetu [22].

V rámci Wi-Fi sítí se v současnosti setkáme s určením polohy pomocí otisku, pomocí výpočtu trilaterací, nebo prostým přiřazením polohy dle nejsilnějšího AP. Vzhledem k tomu, že Wi-Fi sítě jsou konstruovány s ohledem na cenu a energetickou nenáročnost, jsou AP umísťovány běžně co nejdál od sebe, bez zbytečného překrývání. Z kapitoly 4.1 víme, že pro určení polohy pomocí trilaterace potřebujeme neustále signál z alespoň dvou, ideálně tří a více AP, zároveň matematický model předpokládá přímé šíření paprsků, které můžeme vzhledem ke konstrukci a určení Wi-Fi sítí vyloučit. Pro výpočet vzdáleností mezi AP a MS je nejjednodušší použít metodu síly signálu, jelikož RSSI je běžně přenášen. Přesnost trilaterace je na úrovni určení patra, maximálně místností. Jednoduché přiřazení dle nejsilnějšího signálu pak na úrovni vysílací vzdálenosti, mohou být desítky metrů. Sítě Wi-Fi nejsou navrhovány k lokalizaci osob, jedná se tedy pouze o druhotnou službu, přesto pro aplikace ve stylu "najdi nejbližší kavárnu" je tato metoda dostatečná a tak se vytváří celosvětové databáze s uloženými identifikátory přístupových bodů (BSSID, MAC) a jejich souřadnicemi, jejich využití je například součástí google maps. Pro přesnější určení polohy trilaterací je třeba aplikovat filtrační metody pro omezení multipath efektu.

¹ Název sítě, který si uživatel sám nastaví

4.10.3.1 Microsoft RADAR

Je systém využívající k lokalizaci metodu otisku. Síla signálu je měřena na straně AP a centrální počítač sítě určuje polohu pomocí přiřazení polohy z databáze otisků vytvořené v offline fázi, přiřazení polohy probíhá pomocí nejbližší shody [27]. Databáze je vytvořena buď zprůměrováním z více měření, nebo použitím empiristického modelu šíření. Při testovacím měření bylo dosaženo přesnosti určení polohy s odchylkou okolo 4m [27].

4.10.3.2 SpotFi

SpotFi je systém, který se snaží potlačit multipath efekt zahazením signálů, které byly takto šířeny, čímž vede na využití matematického modelu trilaterace. Systém pracuje celkem ve třech částech. V první části probíhá detekce úhlu dopadu přijatého paprsku na AP společně se zaznamenáním času šíření, informace jsou získávány z dostupných CSI (z anglického Channel Signal Information), jde tedy o kombinaci AoA a ToF, v druhé části se snaží algoritmus odhadnout, které ze dvojic AoA a ToF byly šířeny přímou cestou a které odrazem, ve třetí části probíhá samotná lokalizace pomocí AoA z přímé cesty šíření a dostupných údajů RSSI, údaj ToF se používá pouze pro stanovení složky šířené přímou cestou, pro stanovení vzdálenosti by byla potřeba velmi přesná synchronizace, která není ve Wi-Fi sítích dostupná [33]. Pro svoji funkčnost potřebuje SpotFi Wi-Fi síť, jejíž AP mají více antén, minimálně tři, tedy technologii MIMO (Multiple Input, Multiple Output) [33]. Pro separaci signálu z přímé viditelnosti od signálů šířených odrazy je použit algoritmus MUSIC, což je robustní matematický aparát, náročný na výpočetní sílu a složitost softwaru [33]. Pomocí SpotFi bylo dle autorů dosaženo přesnosti určení se střední odchylkou 40cm [33].

4.10.4 Navigace v sítích Bluetooth

Bluetooth je síť pro bezdrátovou komunikaci mobilních zařízení na kratší vzdálenosti v otevřeném pásmu 2,4 GHz, je popsán standardem IEEE 802.15.1. Vzhledem k topologii Master-Slave a dlouhému vyhledávání dostupných zařízení, nebylo Bluetooth vhodné pro použití v online lokalizačním systému, s příchodem Bluetooth Low Energy (BLE, Bluetooth 4.0 LE), které značně zjednodušuje a zrychluje komunikaci, již vhodné je [18]. V síti, postavené na BLE, máme v prostoru rozmístěny vysílače (zde nazývané

Beacons - majáky), vysílače rozesílají Broadcastem krátké zprávy, které přijme každé naslouchající zařízení v dosahu (například mobilní telefon), zprávy obsahují kromě jiného nám již známý RSSI, který můžeme použít pro stanovení vzdálenosti MS od majáku, se znalostí více vzdáleností vede výpočet na trilateraci, dle kapitoly 4.1.1. Kromě trilaterace můžeme využít opět prostého přiřazení nejbližšímu majáku, nebo otisk sítě. Vzhledem k tomu, že Bluetooth sítě jsou energeticky nenáročné (majáku stačí knoflíková baterie) a majáky mají malý dosah (cca do 10m), jsou vysílače rozmisťovány ve velké hustotě, na rozdíl od sítí Wi-Fi [18], díky čemuž lze v této síti dosáhnout vyšší přesnosti [18].

4.10.4.1 iBeacon

Je veřejně dostupný standard vytvořený společností Apple, pracující v sítích Bluetooth Low Energy, struktura periodicky vysílané Broadcastové zprávy je dána standardem, který lze využít pro všechny platformy [18, 23]. Určení vzdálenosti od iBeacon majáku probíhá pomocí metody síly signálu z RSSI s přesností v řádu metrů, určení je silně závislé na počtu majáků a na jejich vysílací vzdálenosti [23]. iBeacon je zajímavý pro využití například v rámci obchodních domů, rozsah jeho Broadcastové zprávy sice neumožňuje zasílání velkého počtu informací, ale dodatečná aplikace si může na základě identifikátoru majáku stáhnout různé doplňkové informace, představme si například, že přijdeme do obchodu a mobilní aplikace nám kromě polohy v obchodním domě zobrazí, co v daném obchodě lze koupit, jaké jsou akce... apod. [23].

4.10.5 Navigace v sítích UWB

Sítě UWB jsou popsány standardem IEEE 802.15.4 a odstraňují problémy, které vznikají při lokalizaci v sítích Bluetooth a Wi-Fi [34, 35]. Používají se krátké širokopásmové pulsy s ostrou náběžnou i doběžnou hranou, díky čemuž lze měřit přesně čas letu signálu [34, 35]. Díky charakteristice signálu jsou UWB pulsy odolné proti šumu, navíc potlačují multipath efekt a můžeme tak měřit čas šíření přímého paprsku [34, 35]. Další výhodou je nízká spotřeba energie, přesnost UWB systémů se pohybuje v hodnotách desítek centimetrů, zdroj [35] dokonce uvádí 5 až 10 cm, což je v porovnání s Wi-Fi a Bluetooth na úrovni místností velmi dobrý výsledek [34, 35]. V sítích UWB pracuje například lokalizace od společnosti Ubisense, využívající k určení polohy principu ToA, či TDoA [21].

5 Shrnutí

Určování polohy rozdělují do dvou hlavních kategorií a sice inerciální navigace na principu Dead Reckoning a signálové určování polohy.

Zásadní výhodou Dead Reckoning je samostatná funkčnost bez potřeby pokrytí prostoru nějakou sítí senzorů, vysílačů...atp. Pro svou činnost používá inerciální navigace inerciálních senzorů a sice gyroskopů a akcelerometrů, často doplněnými o magnetometr, barometr a jiné. Z principu Dead Reckoning je jasné, že s narůstajícím časem navigace roste také chyba, u těchto systémů tedy uvažujeme relativní chybu určení polohy, která je závislá na mnoha faktorech a může se pohybovat od pár centimetrů za hodinu do desítek metrů za hodinu v závislosti na kvalitě součástek, filtračního softwaru...aj.

Při signálovém určení polohy používáme signálů infračervených (Active Badge), ultrazvukových (Cricket), rádiových (Wi-Fi lokalizace), optických (počítačové vidění), či magnetických (magnetická navigace). Pro signálové určení polohy je třeba, aby oblast, kterou sledujeme, byla pokryta nějakou formou vysílačů, či senzorů dané sítě (nebo orientačních bodů pro počítačové vidění), nebo byla vytvořena virtuální mapa prostředí z vektorů měřené veličiny. Příkladem může být pokrytí budovy sítí Wi-Fi.

Matematické metody signálového určení polohy předpokládají, že známe polohu vysílačů a na základě měření parametrů ze šířených signálů mezi pohybující se mobilní stanicí a těmito pevnými vysílači určujeme polohu. Častou metodou určení polohy je výpočet pomocí trilaterace: pomocí soustavy kružnic, jejichž poloměry jsou dány vzdálenostmi mezi mobilní stanicí a pevnými vysílači, určujeme polohu jako průnik těchto kružnic. Pro použití trilaterace je tedy klíčové určit vzdálenost mezi mobilní stanicí a vysílačem, čehož můžeme dosáhnout více způsoby a sice výpočtem vzdálenosti z měření času šíření signálu (známe rychlost šíření), označujeme jako ToA, měřením ze síly přijatého signálu (známe přibližný model prostředí a útlumovou charakteristiku signálu v něm), označujeme jako RSS, dále měřením časového rozdílu různých signálů (známe jejich rychlost šíření a odpadá potřeba synchronizace), označujeme jako TDoA. V případě měření úhlu přijatého signálu (metoda označována AoA) se používá výpočtu polohy pomocí triangulace, poloha je určena jako průsečík polopřímek. Polopřímky začínají ve známém bodě a jdou směrem k MS, jsou tedy určeny bodem a úhlem

od referenční roviny. Zásadním problémem všech těchto metod je, že matematický aparát předpokládá signál šířený přímo mezi vysílačem a mobilní stanicí a nepočítá s multipath efektem, pro zpřesnění polohy a eliminaci multipath efektu je tedy třeba používat často velmi masivního matematického aparátu, příkladem může být algoritmus MUSIC, použitý v lokalizaci SpotFi, který se snaží určit paprsek šířený přímou cestou a zahodit ostatní. Metodu RSS používá například iBeacon pracující v sítích Bluetooth, TDoA používá například systém Cricket, kombinaci AoA a RSS používá již zmíněný SpotFi.

Další možností určení polohy je metoda otisku, nebo-li Fingerprinting. Tato metoda již nepoužívá matematický aparát pro určení polohy, ale využívá prostého přiřazení polohy dle rádiové mapy. Navigace probíhá ve dvou částech, v první "offline" fázi se vytváří rádiová mapa prostředí. Prostor (např. patro budovy) se rozdělí na soustavu čtverců a každému čtverci se přiřadí lokalizační vektor, který může obsahovat například intenzity vysílačů v daném bodě (tedy údaje RSSI), nebo třeba intenzity magnetického pole Země pro magnetické navigace. Rádiová mapa se vytvoří buď fyzickým měřením, nebo se stále častěji využívá matematického modelu, který může mapu upravovat dle změn v prostředí. V druhé "online" fázi navigace probíhá samotné určení polohy, mobilní stanice změří navigační vektor a porovnává jej s rádiovou mapou, pokud nalezne stejný vektor, je poloha přiřazena dle čtverce, kterému vektor přísluší. Častější případ je však pouze částečná shoda, či podobnost a pak se přiřazuje např. dle principu nejbližšího souseda a principů pravděpodobnosti. Je logické, že pokud se nacházíme například u vchodu do budovy a naměříme další vektor, který bude odpovídat poloze poblíž vchodu, ale zároveň poloze o 80 m dále, bude poloha určena jako poloha poblíž vchodu. Otiskové metody mohou dobře pracovat v neproměnném prostředí, ovšem každá změna (pohyb lidí, otevřené dveře..) způsobí změnu rádiové mapy, v případě velkých změn (stavba zdi) je třeba vytvářet mapu novou. Přesnost základních systémů můžeme předpokládat na úrovni místností, příkladem může být například lokalizace v sítích Wi-Fi dle systému Microsoft RADAR.

Další a nejjednodušší metodou je prosté přiřazení známé polohy vysílače jako polohy neznámé mobilní stanice. Tato metoda poskytuje velmi hrubé určení polohy a často je používána ve spojitosti s mobilní sítí, kdy je poloha mobilu určena jako poloha vysílače, přes který komunikuje a chyba je pak na úrovni vzdálenosti, do které vysílač vysílá. Dle použití v buňkových sítích nazýváme metodu jako buňkovou. Od buňkové metody

je odvozena metoda zúžených bodů, oblast je pokryta senzory dané sítě, pokud kolem senzoru projdeme, je naše poloha určena právě polohou senzoru. Metodu zúžených bodů můžeme realizovat například pomocí soustavy infračervených přijímačů a vysílačů, příkladem je systém Active Badge. Podobně lze realizovat navigaci pomocí RFID čteček a pohyblivých tagů. Chyba je na úrovni vysílací vzdálenosti senzorů, systémy, pracující s metodou zúžených bodů, jsou realizovány s přesností na úrovni místností.

Ze signálových metod je vhodné vyzdvihnout metody používající optických signálů a sice tzv. počítačové vidění, kdy je mobilní stanice vybavena kamerou, která snímá okolí a hledá význačné body, pomocí kterých může systém určit polohu (značky, QR kódy, čáry na stěnách a zemi). Určitě je lákavá představa propojení takového systému pomocí virtuální reality a chytrých brýlí, kdy brýle určují svojí polohu a zároveň na displej promítají informace o poloze, či cestě, kterou máme jít.

Z výše popisovaných metod, ať už výpočtových, nebo otiskových, či jen přiřazujících, je jasné, že přesnost lokalizace roste s počtem použitých vysílačů, senzorů, orientačních bodů v prostředí. Zatímco sítě Wi-Fi jsou konstruovány s ohledem na cenu - každý přístupový bod je třeba napájet a jejich cena je vysoká, je jasné, že pro přesnou navigaci jsou nevhodné. Oproti tomu sítě Bluetooth (od verze 4.0 Low energy) jsou vhodnější a poskytují lepší přesnost při nižších nákladech. Velmi zajímavé je použití sítí UWB, které eliminují multipath efekt a poskytují tak velmi přesnou lokalizaci při nízké energetické náročnosti.

Shrnutí metod a konkrétních lokalizačních technologií můžeme vidět v tabulkách 5.1 až 5.3.

Tab. 5.1 Shrnutí představených systémů

System	Signál	Princip určení	Přesnost
Inerciální	Inerciální senzory	Dead reckoning	Relativní, až desítky cm za hodinu
Mobilní síť	Rádiový	Cell ID +TA	550m
Active Badge	Infračervený	Zúžené body	Na úrovni místností
Cricket	Ultrazvuk +rádiový	TDoA	2 cm při 10m ³
Microsoft RADAR	Rádiový	Fingerprint	4 m
SpotFi	Rádiový	AoA + RSS	40 cm
iBeacon	Rádiový	RSS	2-5m
Ubisense	UWB	TDoA	5-10 cm

Tab. 5.2 Shrnutí výhod a nevýhod představených metod určení polohy

Metoda	Výhody	Nevýhody
Inerciální	Nezávislá na prostředí, odolná proti rušení, univerzální použití	Citlivost senzorů, složité filtrační algoritmy pro odstranění chyb, narůstající chyba s dobou běhu
Trilaterace	Jednoduchý matematický aparát	Předpokládá přímé šíření signálu, závislé na pokrytí prostoru vysílači
Multilaterace	Jednoduchý matematický aparát	Potřeba více uzlů oproti trilateraci, předpokládá přímé šíření, závislé na pokrytí prostoru vysílači
Cell ID, Cell ID + TA	Jednoduchá metoda, doplňková služba	Velmi nepřesné, závislé na vysílačích
Zúžené body	Jednoduchá metoda, lze realizovat s nízkou energetickou náročností	Třeba pokrýt oblast senzory, přesnost dle počtu senzorů
Triangulace	Jednoduchý matematický aparát	Předpokládá přímé šíření, měření úhlů není standardní funkcí - je třeba doplňkový hardware (např. pro Wi-Fi sítě)
Fingreprinting	Nevyžaduje přímé šíření, eliminuje do určité míry multipath a lze použít pro členité interiéry	Složitá realizace, je třeba vytvářet mapu prostředí. Pro RF sítě je třeba pokrýt oblast vysílači. Při jemném dělení prostoru velká databáze otisků.

Obrazová	Lze realizovat pomocí kamery (dostupné každému mobilu)	Potřeba databáze s polohou orientačních bodů, rozmístění orientačních bodů po dané oblasti.
Magnetická	Nevyžaduje senzorovou síť, nebo vysílače, magnetometr je součástí spousty zařízení	Často několik identických vektorů mag. pole v rámci jedné budovy, velmi citlivé, nepřesné, oproti metodě otisku nelze rozlišovat ve vektoru ID vysílačů

Tab. 5.3 Shrnutí výhod a nevýhod představených systémů

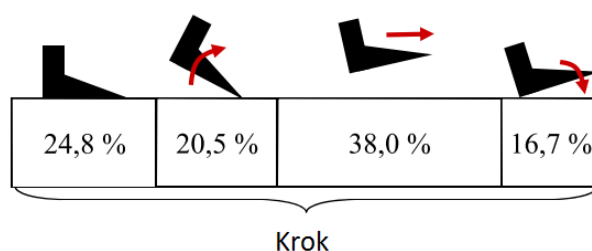
Systém	Výhody	Nevýhody
Inerciální	Nezávislé na prostředí, odolné proti rušení, univerzální použití	Citlivost senzorů, složité filtrační algoritmy pro odstranění chyb, narůstající chyba s dobou běhu
Mobilní síť	Dostupné pro každé zařízení se SIM kartou, druhotná služba existující sítě	Nepřesné, pouze orientační poloha dle velikosti buňky
Active Badge	Jednoduchá realizace pomocí infračervených senzorů, odznaky vydrží dlouho na baterii	Nízká přesnost, dlouhá doba vysílání, problémová funkčnost při přímém slunečním svitu, nutnost přímé viditelnosti, centralizovaná struktura - omezení anonymity
Cricket	Přesné určení polohy, levná realizace, decentralizovaná síť poskytující anonymitu	Energetická náročnost je vyšší v porovnání s např. Active Badge
Microsoft RADAR	Lze implementovat do existujících Wi-Fi sítí, možnost použití matematického modelu šíření pro vytvoření rádiové mapy	Wi-Fi sítě konstruovány s minimem vysílačů s ohledem na cenu, závislé na změnách prostředí - změna rádiové mapy, potřeba rádiové databáze, při větší změně v prostředí třeba znovu vytvářet rádiovou mapu, nízká přesnost
SpotFi	Vysoká přesnost v sítích Wi-Fi, potlačení multipath efektu	Složité matematický model, omezeno na MIMO sítě
iBeacon	Nízká energetická náročnost a cena majáků, možnost doplňkových informací při propojení s internetem - např. informační systémy s určením polohy a popisem zboží v obchodě, multiplatformní jednotný standard	Přesnost v řádech metrů, nutnost rozmístění velkého počtu majáků
Ubisense	Omezení multipath efektu, vysoká přesnost i pro velmi členité interiéry, nízká energetická náročnost	Málo rozšířené, potřeba rozmístění vysílačů, vysoká cena realizace

6 Návrh integrace do textilií

V této kapitole se budu věnovat možnostem integrace navigačních systémů do textilií. Prvním úkolem je stanovit si, které systémy je vhodné integrovat a proč. Po úvaze byla pro integraci zvolena inerciální navigace a RFID navigace, důvody jsou popsány v následujících kapitolách.

6.1 Integrace inerciálního systému

Pro integraci jsou vhodné inerciální systémy, které mohou pracovat nezávisle na svém prostředí a najdou uplatnění například při mapování jeskyní, při průzkumu neznámých oblastí, nebo při operacích jednotek záchranných sborů. Jejich integraci vyžadujeme díky jejich kladům v porovnání s ostatními navigacemi, tedy nezávislost na pokrytí prostředí signálem, spolehlivosti. Pro integraci do textilií jsou rozhodující rozměry a energetická náročnost, vhodné je použití systému inerciální navigace typu Strapdown, která umožňuje dosáhnout menších rozměrů na úkor výpočetní náročnosti. Systém by měl obsahovat tříosý akcelerometr, gyroskop a magnetometr, vhodné je doplnění o teploměr a barometr pro korekci. Pokud by to bylo možné z hlediska rozměrů, je vhodné spojení inerciálního systému s jednotkou GPS, která bude v případě dostupnosti sloužit ke korekci, hlavní funkci navigace však plní inerciální systém, vzhledem k požadavku na nezávislost dostupnosti signálu. Vhodné a často používané umístění navigace je na nártu, případně na špičce boty (nebo uvnitř), díky tomuto umístění lze použít filtrace založené na detekci kroku, na obrázku 6.1 můžeme vidět schematické znázornění kroku, vidíme, že v jedné části se noha vůbec nepohybuje a ve dvou vykonává pohyb vzhůru a dolů, pouze v třetí části je měřitelná rychlost směrem dopředu, tuto část se snažíme měřit. Při umístění na chodidle můžeme zároveň zároveň jednoduše měřit počet kroků a jejich délku.

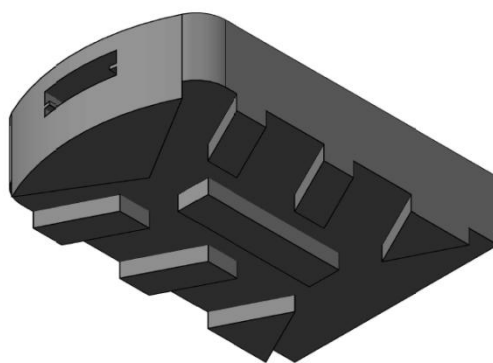


Obr. 6.1: Průběh lidského kroku. Převzato z: [13]

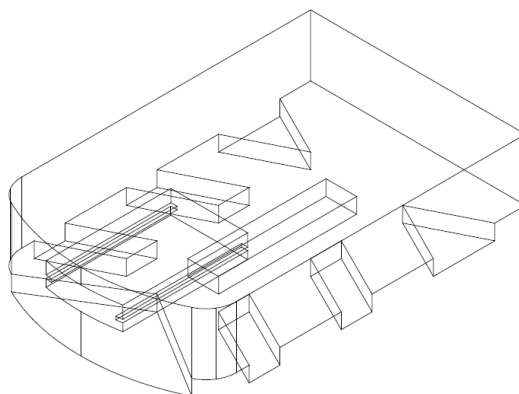
Nevýhodou umístění na botě jsou parazitní zrychlení v ostatních směrech, nepravidelnost pohybu, atd.

Součástí této práce je také měření dvou inerciálních systémů, podívejme se na možnost jejich integrace do obuvi. Bližší informace a fotografii modulů lze nalézt v kapitolách 7.1 a 7.2.

Modul Movea je dostatečně malý pro jednoduché umístění do obuvi. V současnosti je integrován do hasičské zásahové obuvi pomocí pouzdra na špičce, vzhledem k jeho rozměrům a pevnosti pouzdra by ale bylo možné jej například umístit do podpatku boty. Inerciální jednotka by byla umístěna na pevně, nebo by bylo možné ji vyjmout, z hlediska případné údržby je vhodnější, aby byla vyjímatelná. Prázdný prostor uvnitř podpatku by bylo třeba vyztužit, aby na pouzdro nepůsobili moc velké síly, také by byla potřeba pevnostní analýza pouzdra. Umístění otvoru pro inerciální modul můžeme vidět na obrázcích 6.2 a 6.3, model byl vytvořen ve studentské verzi programu AutoCAD 2019.



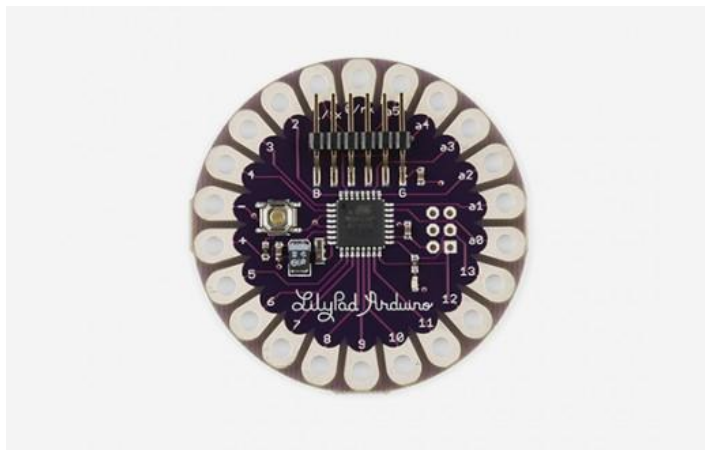
Obr. 6.2 Podpatek s otvorem pro vložení inerciálního modulu, stínovaný model, pohled zdola



Obr. 6.3 Podpatek s otvorem pro vložení inerciálního modulu, drátový model, pohled shora

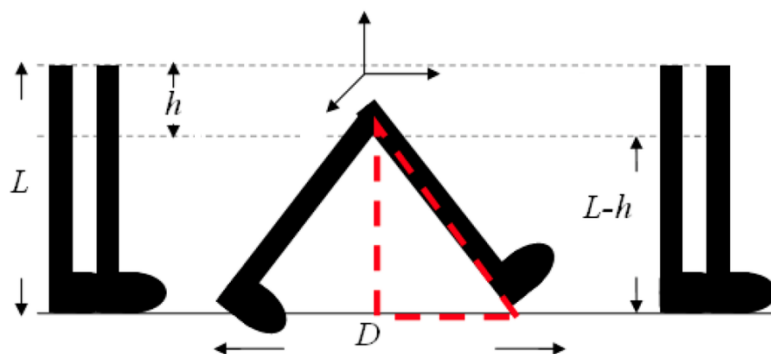
Modul Arianna není dostatečně malý pro komfortní vložení do vnitřku boty, lze integrovat pouze jeho inerciální senzor. (viz obr. 7.3, senzor je umístěn na kabelu v poloprůhledném pouzdře). Senzor bychom mohli vložit do vnitřku boty, do oblasti nad nártem, připojovací kabel může být vyveden šněrováním ven, nebo být umístěn uvnitř boty souběžně s jazykem a vystupovat z boty až v prostoru pro nohu. Druhá část modulu by byla umístěna v pouzdře na horní části boty, nebo připnuta k nohavici obleku.

Modul Arianna nicméně přináší zajímavou myšlenku v podobě rozdělení jednotky na část se senzory a zpracovatelskou část s napájením a rozhráním pro připojení. Inerciální senzory by byly umístěny ve špičce boty, odtud by byly připojeny pomocí vodivých nití do zpracovatelské části umístěné v podpatku, podobně jako v návrhu integrace modulu Movea. Pro tento účel je vhodná například platforma Arduino a jejich základní deska LilyPad. Základní deska by byla v podpatku umístěna společně s baterií a Bluetooth modulem pro připojení. Zpracovatelská část by dokonce mohla být integrována třeba do stehenní části kalhot, propojení vodivých nití mezi botou a nohavicí by bylo realizováno konektory.



Obr 6.4 Základní deska Arduino LilyPad. Převzato z [36]

Pokud budeme sledovat pohybujícího se člověka, můžeme vidět, že některé části těla se pohybují více pravidelně a některé méně. Umístění inerciálních senzorů například na ruce by bylo nevhodné, při chůzi se ruka pohybuje dopředu a dozadu, navíc můžeme rukama vykonávat různé činnosti, které nemají s chůzí souvislost. Nabízí se ale možnost integrace do spony opasku. Při bližším pozorování zjistíme, že tato část těla se při chůzi pohybuje dopředu bez zbytečných výkyvů do stran. Kromě pohybu dopředu se oblast pasu pohybuje také nahoru a dolů v závislosti na délce kroku a délce nohou. Při použití jednoduché geometrie lze pomocí Pythagorovy věty určit délku kroku. Takový systém je představen například v článku [37], kde autoři dosáhli přesnosti 98% s chybou 0,48 m. Princip funkce můžeme vidět na obrázku 6.5, pokud víme, jak vysoko je senzor umístěn nad zemí (L , odpovídá zároveň délce nohy), můžeme akcelerometrem měřit, o kolik senzor poklesne při kroku ($L-h$) a stanovit Pythagorovo větou polovinu délky kroku $0,5 D$, vynásobením dvěma dostáváme délku kroku D .



Obr. 6.5: Princip detekce délky kroku při umístění senzorů na opasku. Převzato z: [37]

Z popisu je jasné, že při umístění takového systému jinak by měřil chybně. Podobné pravidlo platí i pro systémy, které jsou určeny pro umístění na chodidle a mají s vlastnostmi pohybu chodidla spjatý některé části algoritmu, či jsou navrhovány s ohledem na tyto vlastnosti.

6.2 Integrace RFID systému

Pro další návrh integrace bylo rozhodováno mezi systémem založeném na Bluetooth LE a mezi systémem pracujícím s RFID. Integrace Bluetooth má několik zásadních nevýhod a sice potřebu napájení, relativně složitý obvod a přímá integrace do textilie by mohla způsobovat problémy při údržbě. Bluetooth systémy je tedy vhodné integrovat spíše do náramků, přívěšků a podobně. Naproti tomu RFID umožňuje vytvořit pasivní systém, který nepotřebuje napájení. Díky pasivní realizaci jsou RFID systémy vhodné pro integraci přímo do textilie.

Princip navigace v RFID systému by pracoval dle metody zúžených bodů. Čtečky RFID lze umístit například na rámy dveří, případně na zdi delších chodeb v pravidelných rozestupech. Pokud kolem čtečky projde člověk, který nese RFID tag, čtečka to zaznamená a pošle centrálnímu počítači, který uloží polohu člověka jako známou polohu čtečky. Takový systém poskytne přesnost lokalizace na úrovni místností, což je dostatečné např. pro kancelářské prostory, školy, a podobně.

Pasivní RFID nemá žádný stálý zdroj energie, signál ze čtečky RFID indukuje v anténě tagu proud, který je dostatečný pro chvilkové napájení tagu a umožní mu odpovědět na zprávu [38]. Samotný RFID tag sestává z RFID čipu s pamětí a antény [38]. Díky absenci napájení lze dosáhnout velmi malých rozměrů. Vzhledem k tomu, že tag potřebuje pro odeslání informace uložené v paměti energii ze čtečky, je třeba, aby čtečky periodicky vysílaly do svého okolí. Každý RFID tag v prostoru bude mít v paměti unikátní identifikátor, který jasně určuje jeho nositele. Data o poloze budou centralisticky určována serverem, přístupem k němu bude získán údaj o poloze konkrétního tagu. Pro přístup k serveru lze použít například mobilní aplikaci. Pro tento systém navigace je nutné zvolit čtečky s dostatečným vysílacím dosahem, aby se nestalo, že čtečka tag nenaznamená. Umístění na dveřních rámech toto řeší. Zároveň je třeba

zajistit, aby vyzařovací úhel čtečky zachytil tag. Pro ideální volbu čteček by bylo třeba realizovat testování.

Samotný tag bude integrován přímo do textilie pomocí vyšívání technologií. Tag může být součástí loga firmy, společnosti. Anténa je vytvořena pomocí vodivé nitě a je přímo součástí textilie. Vodivé nitě jsou tvořeny syntetickými vlákny s metalickou příměsí pro elektrickou vodivost [39]. Nitě jsou dostatečně flexibilní pro ohýbání, odolné vůči chemickým vlivům a mohou se i prát [39]. Na obr. 6.6 můžeme vidět provedení textilního tagu společnosti TexTrace, z druhé strany je logo firmy, uprostřed můžeme vidět čip a okolo vyšívanou anténu [39].



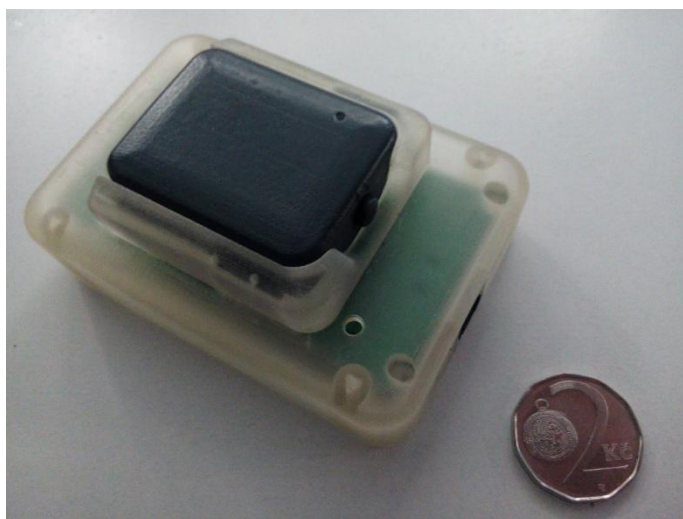
Obr. 6.6: Textilní RFID tag. Převzato z: [39]

7 Testování inerciálních systémů

Tato kapitola se zabývá testováním dvojice inerciálních systémů, v první části je popis jednotlivých systémů, postup jejich připojení a výstup, v druhé části lze najít záznamy z měření.

7.1 Modul Movea

Movea (viz obr. 7.1) je inerciální modul od společnosti InvenSense v kompaktním pouzdře pro umístění na špičku hasičské boty. Movea obsahuje tříosý akcelerometr LIS3DH, tříosý gyroskop IMU3000, tříosý magnetometr MAG3110 a jednoosý barometr PPL3115A2, s mikroprocesorem jsou senzory propojeny přes sběrnici I²C. Mikroprocesor analyzuje a vyhodnocuje data z inerciálních senzorů, vyhodnocená data jsou dále zasílána přes Bluetooth modul např. do mobilního telefonu. Celé zařízení je napájeno 3,7 V baterií, která by dle datasheetu měla být schopna napájet zařízení alespoň dvě hodiny. Algoritmus analýzy inerciálních dat není znám, je součástí firmwaru, ke kterému si firma chrání přístup, z datasheetu vyplývá, že tento algoritmus je volán až 200x každou sekundu, což způsobuje některé problémy, které budou zmíněny dále. Dále zařízení obsahuje jedno tlačítko, které slouží k zapnutí a vypnutí zařízení a jednu indikační LED diodu informující o stavu zařízení. Součástí je dok sloužící jako nabíječka.



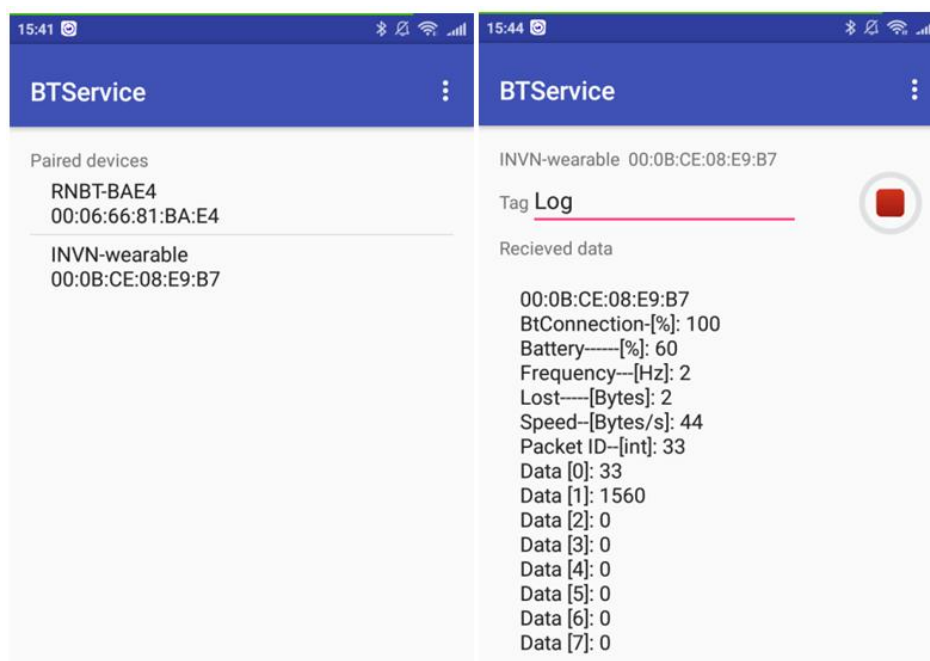
Obr. 7.1: Inerciální modul Movea s nabíječkou

Technické informace byly přebrány z datasheetu, který je umístěn na CD nosiči, přiloženém k práci. Dále v něm lze nalézt detailnější informace o systému Movea, jako například parametry jednotlivých součástek.

7.1.1 Propojení s telefonem

Modul byl testován připojením k mobilnímu telefonu přes rozhraní Bluetooth, pro sběr dat byla použita aplikace pro mobilní operační systém Android „BTService“. Po dobu činnosti aplikace sbírá data odeslaná z inerciálního modulu a ukládá je do souboru.

Před instalací aplikace je třeba povolit instalaci aplikací z neověřených zdrojů, po jejím nainstalování je třeba ručně aplikaci povolit práva přístupu k úložišti. Před samotným užíváním aplikace je nutné spárovat mobilní telefon s inerciálním modulem, výchozí přednastavený PIN je 0000, název zařízení je INVN-wearable, poté již nic nebrání použití aplikace. Po jejím zapnutí, (obr. 7.2 vlevo) se zobrazí výchozí obrazovka, obsahující seznam spárovaných zařízení, ze seznamu vybereme INVN-wearable (takto je modul Movea označen) a z menu v pravém horním rohu vybereme připojit, proběhne spárování mobilního telefonu s modulem.



Obr. 7.2: Aplikace BTService

Po připojení modulu se posunem obrazovky doleva dostaneme do druhé části aplikace (obr. 7.2 vpravo), kde můžeme sledovat přijímaná data a zároveň spustit ukládání do souboru. Ukládání do souboru se spustí stisknutím červeného tlačítka a stejným tlačítkem lze ukládání ukončit, vytvořený soubor poté nalezneme ve složce „invensense\advanex“, která se nachází v kořenové složce interního úložiště. Soubor je ve formátu txt.

7.1.2 Výstup z aplikace

Níže můžeme vidět část záznamového souboru, vysvětlení jednotlivých sloupců pak v tabulce 7.1.

A	B	C	D	E	F	G	H
26	1544	2	98	1	0	0	0
27	1544	2	98	1	0	0	0
28	1545	3	132	2	-1	1	0
29	1545	3	132	2	-1	1	0
30	1545	4	160	4	-3	0	0
31	1545	4	160	4	-3	0	0

Tab. 7.1 význam jednotlivých sloupců záznamového souboru pro modul Movea

Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H
Význam	ID paketu	Neznámé	Počet kroků	Délka kroku [cm]	Vzdálenost [m]	Poloha x [m]	Poloha y [m]	Poloha z [m]

Výstupem jsou tedy souřadnice x,y,z, počátek souřadnic je určen jako počátek měření, kromě aktuální polohy danou souřadnicemi, můžeme také vidět počet kroků, délku kroku a celkovou ušlou vzdálenost.

V kapitole 7.1, kde jsem systém stručně představoval, jsem říkal, že rychlé a stálé volání algoritmu způsobuje některé nepříjemnosti. Část souboru, která je uvedena výše, obsahuje pouze unikátní řádky, ve skutečnosti ovšem soubor obsahuje velké množství duplicitních řádků, jako příklad mohu uvést testovací měření na ověření funkčnosti, kdy jsem během minuty obešel chatu a soubor obsahoval přes 700 000 řádků a dosáhl celkové velikosti 17 851 kB, ve skutečnosti však pouze 103 řádků bylo unikátních a z nich tvořený soubor byl velký pouze 3 kB. Při dlouhém měření tedy soubory obsahují miliony řádků a mohou dosahovat velikosti v řádu GB. Pro účely analýzy dat jsem vytvořil v programovacím jazyce C filtrační program, který projde originální soubor a do nového

souboru zapisuje pouze ty řádky, které nejsou duplicitní, zdrojový kód tohoto programu lze vidět v příloze B.

7.2 Modul Arianna

Arianna je inerciální modul od společnosti Dune, sestává z inerciálních senzorů, připojených kabelem k napájení, výpočtové jednotce a Bluetooth vysílači, které jsou umístěny v plastovém pouzdře (viz obr. 7.3). Zařízení je navrženo pro připnutí suchým zipem na nohu, senzor se umísťuje na špičku, kabel je vhodné protáhnout šněrováním boty, aby nepřekážel. Z dostupných online datasheetů nelze vyčíst parametry a typ použitých součástek, z příložené dokumentace ke korekční knihovně (umístěna na CD nosiči) lze vyčíst princip korekčního algoritmu ATA (z anglického Arianna Tracking Algorithm). Modul pracuje s proměnou frekvencí zasílání dat, data jsou závislá na vykonání kroku. Pokud uživatel stojí, je každé 3 s odesílána stejná zpráva, pokud je v pohybu, jsou informace odesílány rychlostí až 3 zprávy za sekundu. Zařízení je vybaveno jedním tlačítkem, dvojicí LED diod informujících o stavu zařízení a MicroUSB portem.

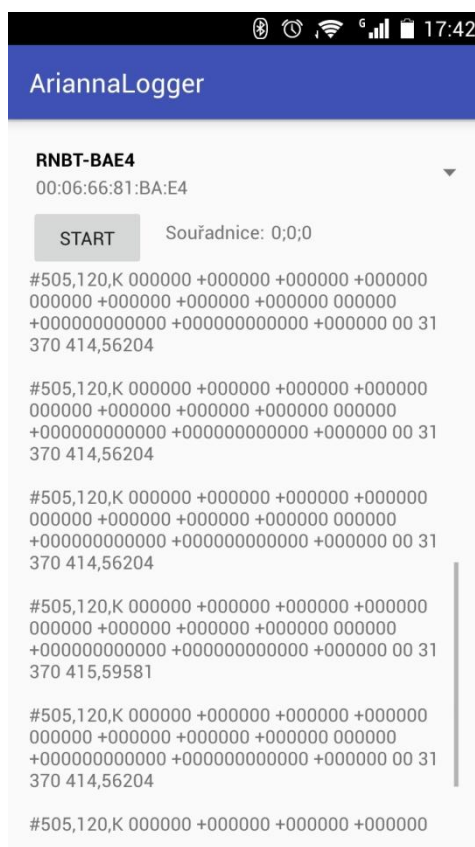


Obr. 7.3: Inerciální modul Arianna

7.2.1 Propojení s telefonem

Modul byl testován připojením k mobilnímu telefonu přes rozhraní Bluetooth, pro sběr dat byla použita aplikace pro mobilní operační systém Android "AriannaLogger". Aplikace sbírá zasláná data a ukládá je do souboru, její rozhraní můžeme vidět na obrázku 7.4.

Před instalací aplikace je třeba opět povolit instalaci z neověřených zdrojů a ručně nastavit přístup k úložišti. Spárování mobilního telefonu s modulem nevyžaduje PIN, název zařízení je RNBT-BAE4. Po zapnutí aplikace vybereme ze seznamu modul Arianna (RNBT-BAE4) a stiskneme start, proběhne výchozí inicializace a zařízení je aktivní, na obrazovce můžeme přímo vidět aktuální souřadnice a log odesílaných dat, která jsou ukládána do souboru v kořenovém adresáři zařízení ve složce "_ARIANNA_LOGGER" ve formátu txt.



Obr. 7.4: Prostředí aplikace AriannaLogger

7.2.2 Výstup z aplikace

Log je v tomto případě složitější, než u modulu Movea, část souboru můžeme vidět na příkladu dále:

```
0;0;0#505,120,K 000000 +000000 +000000 +000000 000000 +000000
+000000 +000000 000000 +000000000000 +000000000000 +000000 00
31 370 416,48622
0;0;0#505,120,K 000000 +000000 +000000 +000000 000000 +000000
+000000 +000000 000000 +000000000000 +000000000000 +000000 00
31 370 416,48622
0;0;0#505,120,K 000000 +000000 +000000 +000000 000000 +000000
+000000 +000000 000000 +000000000000 +000000000000 +000000 00
31 370 413,16923
```

Obecně je zápis v tomto tvaru:

X;Y;Z;#aaa,bbb,xxx...xxx,cccc<cr>

Kde X,Y,Z jsou aktuální souřadnice, aaa je identifikátor zařízení, bbb je počet bitů v datovém packetu, xxx...xxx je datový packet obsahující navigační údaje, ccccc je kontrolní součet a <cr> je konec řádky.

Datový packet, v řetězci zastoupený jako xxx...xxx, obsahuje celkem 16 polí, jejichž význam je v následující tabulce (tab 7.2).

Tab 7.2 Význam jednotlivých složek datového packetu

Pořadí	Počet znaků	Význam
1	6	Číslo kroku
2	6 + znaménko	Souřadnice x [cm]
3	6 + znaménko	Souřadnice y [cm]
4	6 + znaménko	Souřadnice z [cm]
5	6	První korekční parametr
6	6 + znaménko	Druhý korekční parametr
7	6 + znaménko	Třetí korekční parametr
8	6 + znaménko	Čtvrtý korekční parametr

9	6	Pátý korekční parametr
10	12 + znaménko	GPS šířka
11	12 + znaménko	GPS délka
12	6 + znaménko	GPS výška
13	2	GPS kvalita signálu
14	2	Teplota senzorů
15	3	Stav baterie
16	3	Chráněno

7.3 Měření

V následující kapitole se budu věnovat testování představených systémů. Oba systémy byly testovány při umístění na botě nad prsty. Pro záznam z modulu Movea byl použit mobilní telefon Xiaomi Redmi 5A Prime, pro záznam z modulu Arianna mobilní telefon Honor 3C. Pro záznam z GPS byl použit tablet s GPS modulem Asus Nexus 7. Mapové podklady byly použity v režimu offline, pro záznam trasy byla použita mobilní aplikace mapy.cz.

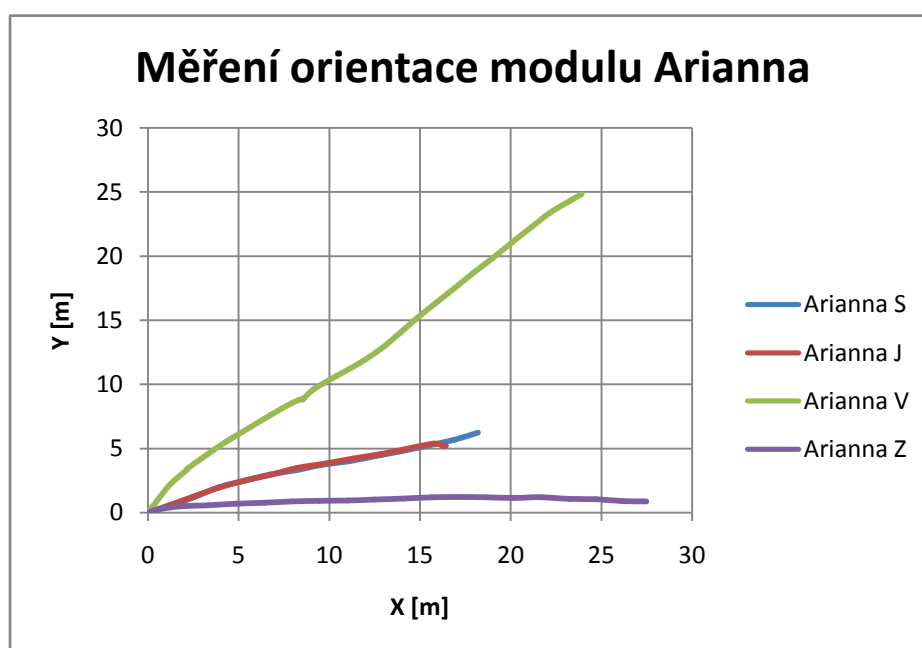
7.3.1 Výchozí určení souřadnic

Před samotným měřením jsem se rozhodl ověřit, jak se v počátku orientuje souřadný systém vůči zařízení a vůči okolí.

Prvotní testování probíhalo bez záznamu do souborů, spočívalo v připojení modulu k aplikaci a sledování, která souřadnice se mění. Modul byl na botě pevně fixován, výchozí směr byl určen postavením se čelem vždy jiným směrem před zapnutím. U modulu Arianna bylo pozorováno, že ať vyrazím kterýmkoliv směrem, souřadnice přibývají stejným způsobem a modul si tedy souřadný systém natáčí dle své výchozí polohy. Naproti tomu u modulu Movea se v různých směrech měnily různé souřadnice, souřadnice jsou pravděpodobně určovány dle orientace světových stran.

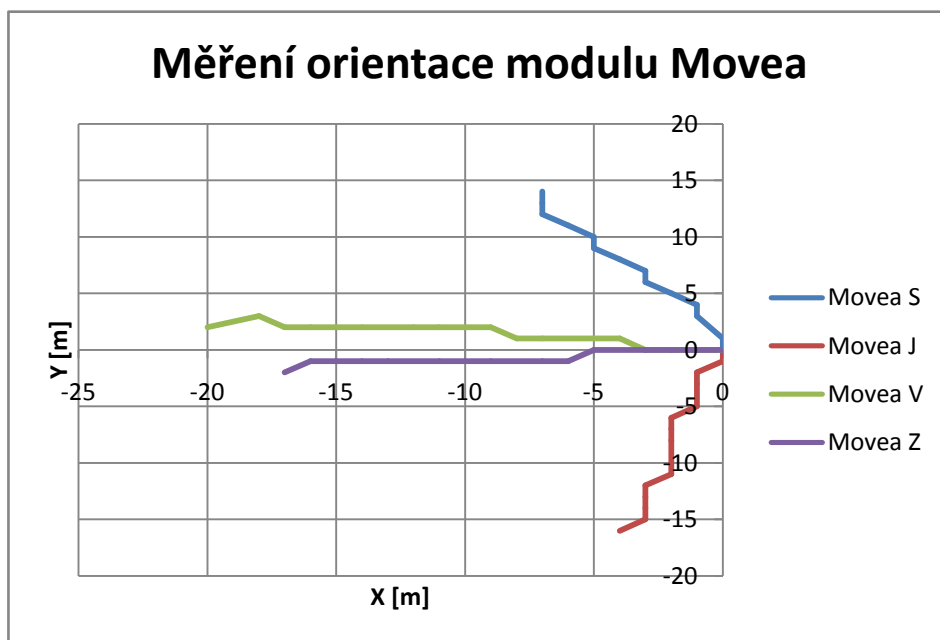
V druhé fázi měření, již se záznamem, jsem provedl celkem 4 měření pro každý modul. Měření mají stejnou výchozí pozici a liší se směrem. Směry jsou dle světových stran, určeno magnetickým kompasem v mobilní aplikaci.

V grafu 7.1 pro modul Arianna můžeme vidět, že směry měření jsou přibližně stejné, v rozmezí cca od 0° do 45° otočení od osy X. Graf potvrzuje to, co bylo sledováno ve fázi bez záznamu a sice, že zařízení určuje orientaci souřadnicového systému spíše dle své výchozí polohy. Pokusil jsem se zjistit, která strana zařízení je x a která y, bohužel to nelze přesně určit: přibližně pro prvních 10 měření se zařízení chovalo pořád stejně, v různých směrech se měnila stejná souřadnice, po delší době běhu se ale souřadný systém změnil (např. strana, která do té doby fungovala jako x, tedy pokud jsem ji na počátku měření orientoval směrem před sebe a vyšel tím směrem, měnila se pouze souřadnice x, se najednou chovala jako -y) a došlo k prohození souřadnic. Bohužel opět bez zjevného vztahu k světovým stranám.



Graf 7.1: Měření orientace modulu Arianna

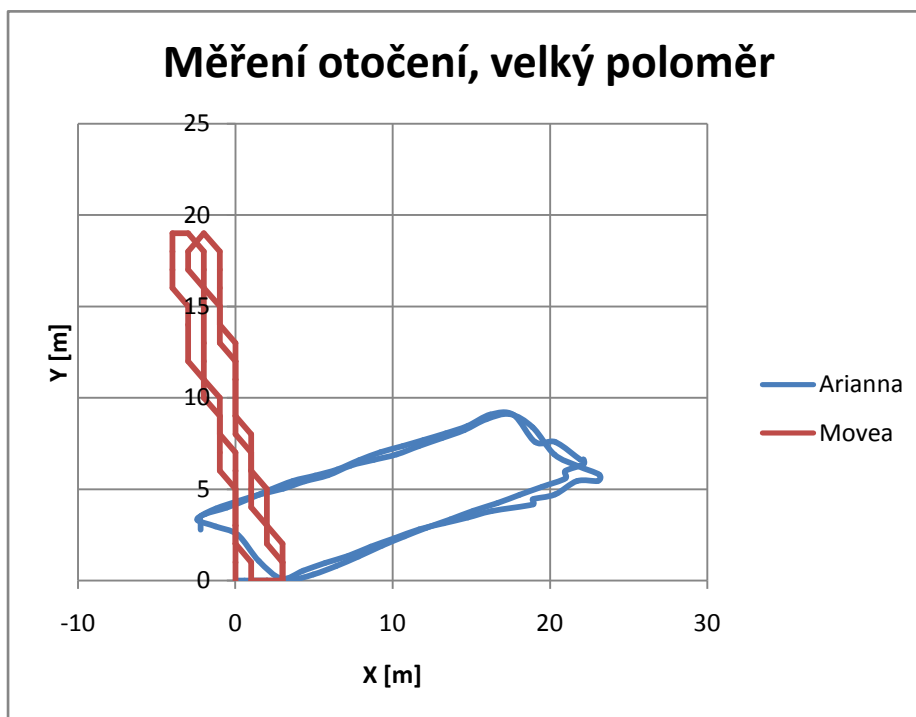
Při měření s modulem Movea bylo pozorováno, že se orientace souřadnicového systému fixuje dle světových stran. Bohužel se zde projevuje chyba magnetometru a tedy chybného určení kurzu. V grafu 7.2 můžeme vidět, že trajektorie ve směru Sever a Jih jsou sice stočeny a nejsou rovnoběžné, ale přibližně ukazují správným směrem, stejně jako Západ. Co je v grafu chybné, je směr Východ, který je dle měření totožný se směrem Západ, zde pravděpodobně došlo k nesprávnému určení orientace zařízení vůči světovým stranám. Test byl proveden celkem třikrát a pokaždé byl jeden směr určen špatně.



Graf 7.2: Měření orientace modulu Movea

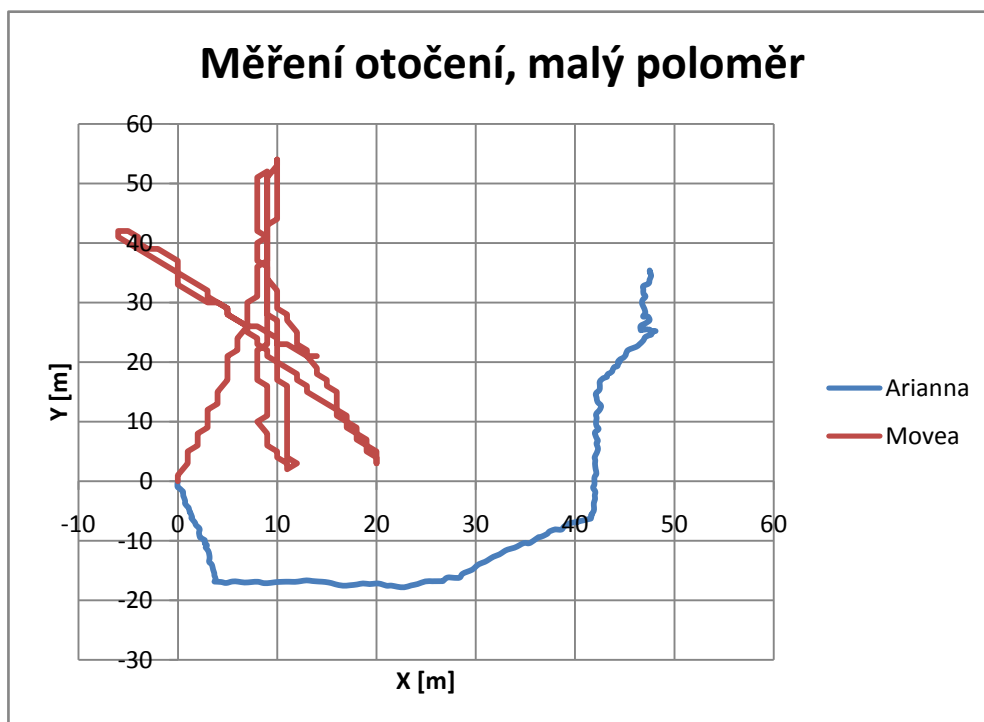
7.3.2 Měření otočení

Předchozí zkušenosti ukázali, že inerciální moduly fungují spolehlivě v přímém směru, ale nechovají se ideálně při otočení. Další měření se tedy týká detekce otočení. Pro první měření byla zvolena trasa dlouhá cca 20m, orientovaná směrem na Sever. Po ujití 20m následovalo otočení a cesta zpět do výchozího bodu, následně to samé znovu, celkem tedy 3 otočky. Otočení bylo s velkým poloměrem. Výsledky pro jednotlivé moduly můžeme vidět v grafu 7.3, oba moduly detekují pomalé otočení s velkým poloměrem dobře. Arianna měří s jemnějším krokem a tak je trasa hladká, zatímco u modulu Movea je kostrbatá vlivem měření v celých metrech. Poloměr otočení byl přibližně 2 m.



Graf 7.3: Měření otočení s velkým poloměrem

Poté bylo testováno stejným způsobem prudké otočení, tedy s malým poloměrem, blížící se otočení na patě. Tam a zpět jsem šel třikrát, celkem tedy 5 otoček. Výsledky můžeme vidět v grafu 7.4. Modul Arianna na prudké otočení téměř nereaguje, trajektorie se sice v několika bodech láme, naprosto ale neodpovídá otočení o 180°. Modul Movea sice prudké otočení registruje, bohužel po otočení špatně určuje směr a tak jsou jednotlivé cesty tam a zpět posunuté vůči sobě. Přesto měření ukazuje, že Movea dokáže i prudké otočení zaznamenat.



Graf 7.4: Měření otočení s malým poloměrem

7.3.3 Měření klidové chyby

Účelem měření bylo zjistit, zda zařízení v klidu "neujíždějí", tedy zda se dle senzorů nemění jejich poloha. To by mohlo být způsobeno například špatnou kalibrací senzorů. Zařízení byly umístěny na rovnou podložku a připojeny k aplikaci. Doba testování byla půl hodiny. Ani jeden modul nevykazoval změnu souřadnic, lze tedy říct, že klidová chyba je potlačena.

7.3.4 Měření souvislé trasy

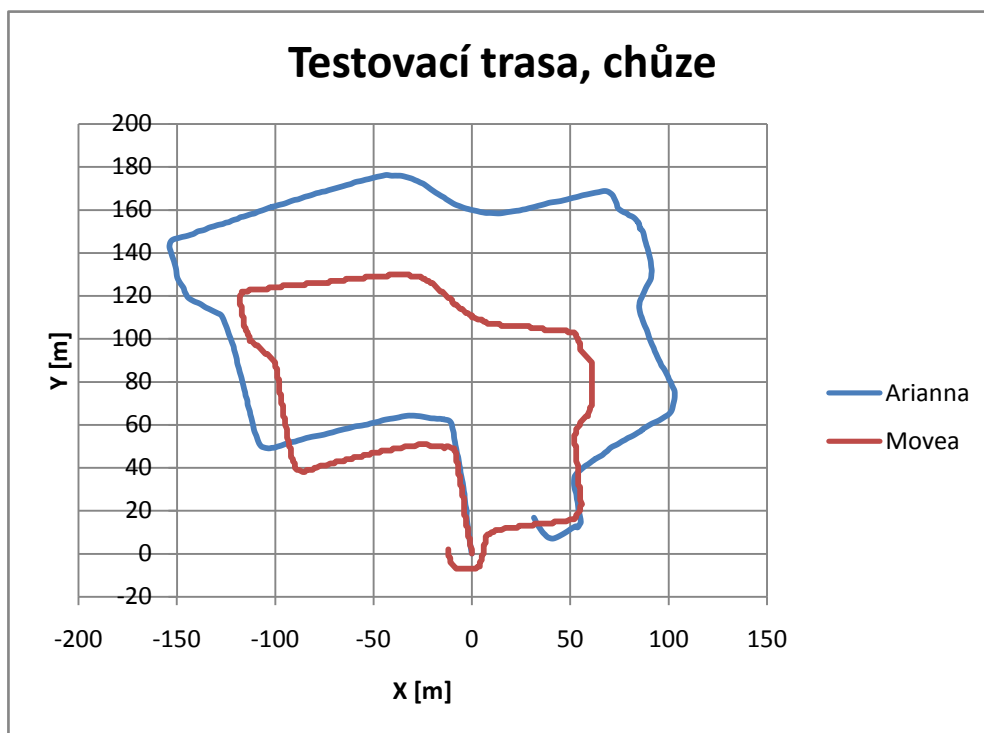
Pro měření byla vybrána trasa ve městě s minimální změnou výškového profilu. Trasa je uzavřená, to jest výchozí bod je stejný, jako koncový. Trasa byla měřena pomocí GPS a pomocí jednotlivých inerciálních modulů. Měření bylo provedeno za chůze (GPS i inerciální) a za běhu (jen inerciální). Na obr. 7.5 můžeme vidět záznam trasy z GPS. Celková vzdálenost je 667 m s výškovým rozdílem 14 m. Začátek trasy byl orientován směrem na sever. Ze záznamu trasy můžeme vidět odchylku GPS, po hlavní silnici (žlutá) jsem šel při straně po chodníku, stejně tak cesta z hlavní ulice do cíle se neдрží přesně cesty. Další chyba je vidět hned na začátku měření, počátek by měl být v krajním bodě černé čáry (jejíž význam bude zmíněn později).



Obr. 7.5: záznam trasy z GPS

V grafu 7.5, na další stránce, můžeme vidět záznamy trasy z inerciálních modulů. Při bližším pohledu je vidět, že trasa z modulu Movea tvarově odpovídá trase z GPS. Stejně tak odpovídá trasa modulu Arianna. Cesty se liší ušlou vzdáleností, pro určení, který systém je přesnější, byla pomocí map změřena vzdálenost mezi startem a začátkem ohybu

hlavní ulice 17. listopadu, vzdálenost je černě vyznačena na obr. 7.5. Vzdálenost je 170 m, čemuž dle grafu 7.5 odpovídá spíše měření modulem Arianna.



Graf 7.5: Záznam testovací trasy z inerciálních modulů při chůzi

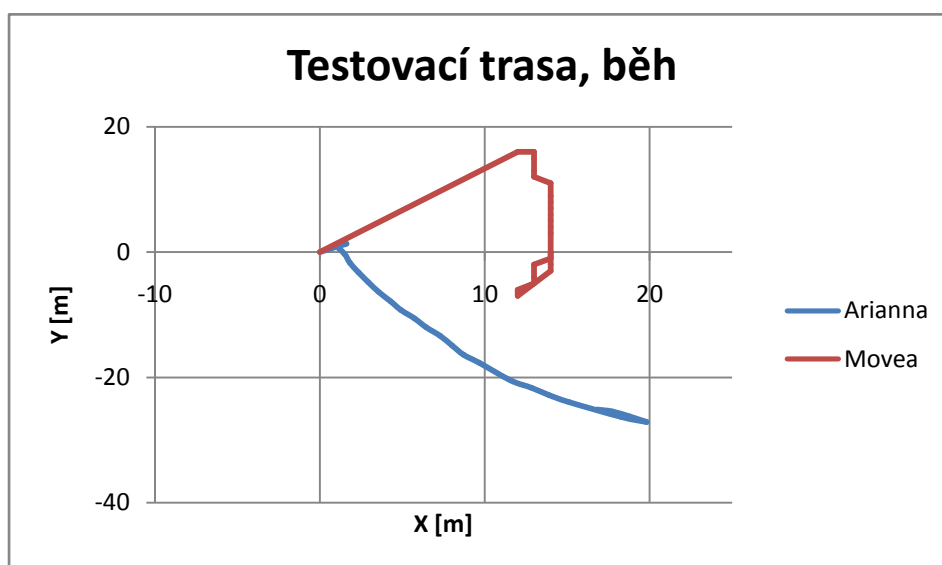
Z naměřených dat lze dále určit chybu v koncovém bodě - trasa začínala a končila na stejném místě, výchozí bod je tedy 0;0;0 a koncový x;y;z, chybu lze určit jako velikost vektoru z počátečního bodu do koncového. Výpočet byl proveden pro chybu v rovině XY a pro celkovou chybu v prostoru. V tabulce 7.3 můžeme vidět koncový bod pro jednotlivé moduly a chybu v XY a XYZ. Za zmínění stojí koncový bod modulu Movea, konkrétně souřadnice Z, která je o 77 metrů níže. Problémy s měřením souřadnice Z jsou pozorovány napříč všemi testy (kromě klidové chyby). Naproti tomu Arianna vykazuje při měření osy Z dobré výsledky. V rovině XY vykazuje Movea menší chybu, po přidání osy Z je chyba mnohonásobně větší vlivem špatného měření v této ose.

Tab. 7.3: Koncová chyba trasy, chůze

	Arianna	Movea
Koncový bod [m]	31,52;16,72;2,72	-12;2;-77
Chyba XY [m]	35,6	12,2
Chyba XYZ [m]	35,8	77,96

Testování ukázalo, že Arianna kopíruje trasu věrněji, ale v rovině má v koncovém bodě větší absolutní chybu. Movea naproti tomu má větší relativní chybu během měření, ale koncová chyba je nižší. V prostoru je Movea vlivem špatného měření X velmi nepřesná.

Stejné měření bylo provedeno při běhu. Výsledky naprosto neodpovídají realitě, detekce kroků při běhu nefunguje a naměřené údaje nelze použít pro další analýzu. Výsledky lze vidět v grafu 7.6.



Graf 7.6 Záznam testovací trasy z inerciálních modulů při běhu

7.3.5 Měření výšky

Posledním realizovaným měřením je měření výšky. Start i cíl trasy jsou před bytovým domem, měření spočívá ve výstupu do třetího patra po schodech a návratu zpět. Výška jednoho patra je 2,6 m, nejvyšší bod by se tedy měl nacházet ve výšce 7,8 m. V tabulce 7.4 můžeme vidět souřadnici Z pro nejvyšší naměřený bod a koncový bod. Nejvyšší bod by měl odpovídat hodnotě 7,8 m, koncový hodnotě 0 (dle výchozího bodu).

Tab. 7.4: Měření výšky

	Arianna	Movea
Nejvyšší bod [m]	8,14	6
Koncový bod [m]	-0,1	-2

Měření potvrzuje závěry pozorované již při měření trasy. Arianna měří ve směru osy Z přesně, zatímco Movea má s touto osou problém.

Závěr

V první části práce jsem se zaměřil na teoretický popis možností lokalizace osob bez signálu GPS. V druhé části práce se zabývám možnostmi integrace vybraných systému do textilií a měřením dvojice inerciálních systémů.

Ve dvou úvodních kapitolách popisuji, proč určovat polohu, co je to poloha a navigace a proč navigovat bez GPS.

V kapitole 3 se věnuji systémům inerciální navigace, pracujícím na principu "Dead reckoning", tedy dopočet dalšího bodu trasy z předchozího známého. Měření probíhá pomocí inerciálních senzorů a sice akcelerometru pro měření zrychlení a následné určení dráhy a gyroskopu pro měření úhlové rychlosti a následné určení natočení. Systémy jsou zpravidla doplněny dalšími senzory, například magnetometrem, či barometrem.

Ve čtvrté kapitole popisuji teorii určování polohy pomocí různých druhů signálů, jedná se o signály rádiové, optické, magnetické, zvukové. V kapitole představuji souhrn metod a jejich principů. Součástí je i popis reálných systémů, které využívají dané teoretické metody.

V následující kapitole shrnuji teoretické poznatky z předchozích částí práce a porovnávám jednotlivé představené systémy a metody.

V kapitole 6 jsem vytvořil teoretický návrh integrace navigačního systému do textilie. Pro integraci jsem zvolil systémy inerciální navigace z důvodu jejich nezávislosti na prostředí, ve kterém se pohybují a systém pasivního RFID z důvodu absence napájení a jednoduchého provedení. Pro integraci inerciálního modulu Movea (modul představen v kapitole 7) jsem popsal možnost vložení do podpatku boty. Na základě provedení modulu Arianna (modul představen v kapitole 7) představuji teoretický návrh s využitím platformy Arduino. Dále popisuji možnost integrace inerciálního systému do spony opasku. Integraci systému na principu RFID jsem navrhl pomocí vyšívávacích technologií. Systém pracuje s přesností na úrovni místností.

V Poslední kapitole se věnuji testování dvou zapůjčených systémů. Součástí je představení modulů, způsob jejich připojení, formát výstupu. V rámci ověření funkčnosti jsem realizoval několik měření.

Pro začátek jsem zkoušel, jakým způsobem jednotlivé moduly orientují souřadnicový systém (kapitola 7.3.1). Dle měření modul Movea orientuje souřadný systém v závislosti na světových stranách, zatímco Arianna jej orientuje dle své polohy (má tedy souřadnice pevné vůči sobě). K tomuto bylo provedeno praktické měření se záznamem, jehož výsledky lze vidět na grafech 7.1 a 7.2 (str. 62 a 63). Zanesená chyba je pravděpodobně způsobena chybou magnetometru.

Jako další jsem testoval otočení, což byla dle předchozího seznamování se s moduly problematická část. Měření jsem provedl na krátké dráze s několika otočkami o 180°. Provedl jsem dvě měření, jedno s velkým poloměrem otočení, druhé s malým (téměř otočka na patě). Na otočení s velkým poloměrem reagovaly oba senzory dobře, díky jemnějšímu kroku je na tom Arianna o něco lépe, poloměr otočení odpovídá více reálnému poloměru. Výsledky z měření velkého poloměru lze vidět v grafu 7.3 (strana 62). Horší výsledky poskytlo měření otočení s malým poloměrem, zde modul Arianna na otočení téměř nereagoval. Movea sice ano, ale po otočení je výsledný směr určen špatně a tak nejsou dráhy rovnoběžné, jak by měly být. Výsledek lze vidět v grafu 7.4 (strana 63).

Dále jsem měřil klidovou chybu. Test probíhal po dobu půl hodiny, kdy jsem se zařízením nehýbal. Oba moduly zůstaly dle měření v bodě 0;0;0, lze tedy říct, že klidová chyba je nulová.

V dalším měření jsem již testoval moduly v reálném prostředí. Pro test jsem vybral trasu s minimálním rozdílem výšek a s několika zatáčkami. Počáteční a koncový bod trasy je stejný, aby bylo možné určit chybu polohy na konci měření. Dráha je dlouhá 667 m. Měření jsem provedl za chůze a za běhu. Současně s inerciálními jednotkami jsem dráhu měřil i pomocí GPS. Záznam trasy z GPS můžeme vidět na obr. 7.5 (str. 64) a záznamy stejné trasy z inerciálních modulů v grafu 7.5 (str. 65). Oba moduly kopírují dobře tvar trasy, ovšem můžeme pozorovat rozdíl v celkové vzdálenosti. Pro určení přesnějšího modulu jsem z mapy odměřil vzdálenost ve směru osy Y a zjistil, že věrněji dané trase odpovídá měření modulem Arianna. Dále v tabulce 7.3 (str. 66) jsem porovnal chybu

v koncovém bodě v rovině a v prostoru. V rovině XY je přesnější modul Movea s chybou 12,2 m oproti Arianně s chybou 35,6 m. V prostoru je na tom hůře modul Movea z důvodu chybného měření ve směru osy Z. Celková chyba v prostoru pro modul Movea je 77,96 m, zatímco pro modul Arianna 35,8 m. Pro stejnou trasu během jsou výsledky neprůkazné, naměřené hodnoty naprosto neodpovídají realitě.

V posledním měření jsem měřil funkčnost osy Z. Měření spočívá ve výstupu do schodů a následnému návratu zpět. Výsledky lze vidět v tabulce 7.4 (str. 67), ze které vyplývá, že modul Arianna je při určování výšky přesný, zatímco Movea "ujíždí" dolů, což jasně ukázalo i měření na souvislé trase, kde chyba koncové souřadnice Z byla pro Movea -77 m, zatímco pro Arianna jen 2,72 m.

Celkově nemohu říci, že by moduly byly připraveny pro bezchybné nasazení v terénu. Moduly trpí na problematiku určení orientace souřadnic. U modulu Movea je problém s měřením souřadnice Z. Oba moduly nedokážou přesně zaregistrovat prudké otočení a při běhu nefungují. Pro vyvinutí přesného systému je potřeba další výzkum.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁK, Jan. Historie navigace – od kvadrantu k GNSS. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 2013, **58**(1), 11–20.
- [2] HOMOLKA, Martin. *Inerciální navigační systém*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky.
- [3] WOODMAN, Oliver J. *An introduction to inertial navigation* [online]. 2007 [vid. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
- [4] BÍLÝ, Marek. *Přesný inerciální navigační systém kategorie „Tactical grade“*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra řídicí techniky.
- [5] NOVÁK, Jakub. *Snímání a zpracování údajů lokalizace dopravního prostředku*. Brno, 2005. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování.
- [6] KOPLÍK, Karel. *Metody a systémy navigace ve vnitřních prostorech*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky.
- [7] SOTÁK, M. *Inerciální navigační systém v simulinku* [online]. [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/093_sotak.pdf
- [8] HECL, David. Jak funguje digitální gyroskop? Princip toho, proč iPhone dokáže určit, v jaké je poloze. *Letem svetem Applem* [online]. 2014 [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.letemsvetemapple.eu/2014/01/23/jak-funguje-digitalni-gyroskop-princip-toho-proc-iphone-dokaze-urcit-v-jake-je-poloze/>
- [9] Sagnacův efekt. *Wikipedia* [online]. 2017 [vid. 2018-03-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sagnacův_efekt
- [10] CENK ACAR, Andrei Shkel. *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness*. B.m.: Springer Science & Business Media, 2008. ISBN 0387095365.
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Integrované MEMS GYROSKOPY. *Automatizace.hw* [online]. 2009 [vid. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroscopy>
- [12] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. *Automatizace.hw* [online]. 2007 [vid. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [13] MEURER, Michael. Terrestrial Navigation: Basic principles of terrestrial navigation. *Institute for Communications and Navigation* [online]. [vid. 2017-03-14]. Dostupné z: http://www.nav.ei.tum.de/fileadmin/w00bkq/www/Terrestrial_Navigation_Chp_3.pdf
- [14] PACLÍK, Martin. *Optimalizace softwaru pro vyhodnocení navigačních dat*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra měření.
- [15] KULKA, Bratislav. *Inerciální navigační jednotka*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [16] DVOŘÁK, Jan. *Inerciální navigační jednotka*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [17] VOJÁČEK, Antonín. Co je to Kalmanova filtrace? *Automatizace.hw* [online]. 2007 [vid. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007042901>
- [18] VAŠINA, Viktor. *Možnosti indoor geolokace mobilních zařízení*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta aplikovaných věd. Katedra informatiky a výpočetní techniky.
- [19] KRATOCHVÍLA, Michael. *Lokalizace bezdrátového zařízení pomocí elektromagnetických a ultrazvukových signálů*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací.
- [20] KIM, Sangdeok a Jong Wha CHONG. An Efficient TDOA-Based Localization Algorithm without Synchronization between Base Stations. *International Journal of Distributed Sensor Networks* [online]. 2015 [vid. 2018-03-30]. ISSN 15501477. Dostupné z: doi: 10.1155/2015/832351
- [21] ZHANG, Da, Feng XIA, Zhuo YANG, Lin YAO a Wenhong ZHAO. Localization technologies for indoor human tracking. *2010 5th International Conference on Future Information Technology, FutureTech 2010 - Proceedings* [online]. 2010 [vid. 2018-04-12]. Dostupné z: doi:10.1109/FUTURETECH.2010.5482731
- [22] KOTVA, Pavel. *Lokalizace a navigace uvnitř budov*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta aplikovaných věd. Katedra informatiky a výpočetní techniky.
- [23] ŠTĚPÁNEK, Adam. *Technologie iBeacon a její využití pro lokalizaci a komunikaci mezi mobilními zařízeními*. Brno, 2015. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky.
- [24] FAROOQ-I-AZAM, Muhammad a Muhammad NAEEM AYYAZ. Location and Position Estimation in Wireless Sensor Networks. *CoRR* [online]. 2012 [vid. 2018-03-30]. Dostupné z: doi:10.1201/b13092-12

- [25] UJCOVÁ, Marcela. Navigace v letecké dopravě s využitím MLAT systémů. *Perner's Contacts*. 2010, **5**, 381–386.
- [26] PRIYANTHA, Nissanka Bodhi. *The Cricket Indoor Location System*. Cambridge, 2005. Disertační práce, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science.
- [27] JEČNÝ, Tomáš. *Lokalizace v sítích WLAN* [online]. [vid. 2018-04-04]. Dostupné z: http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK05_semestralky/Lokalizace_v_s%EDt%EDch_WLANshort.pdf
- [28] Mobility and LBS. *FIDIS* [online]. [vid. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://www.fidis.net/resources/fidis-deliverables/mobility-and-identity/int-d1110001/doc/TOC/multiple/>
- [29] POPP, Jakub. *Určování polohy s využitím signálů komunikačních systémů*. Praha, 2015. Diplomová práce. Český vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Katedra radioelektroniky.
- [30] WANT, Roy, Andy HOPPER, Veronica FALCÃO a Jonathan GIBBONS. The active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems* [online]. 1992, **10**(1), 91–102 [vid. 2018-04-11]. Dostupné z: doi: 10.1145/128756.128759
- [31] KOYUNCU, Hakan a Shuang Hua YANG. A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS '10)* [online]. 2010, **10**(5), 121–128 [vid. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9304/f80fbca5bfdcc3820543d186d2b2da5b1c4d.pdf>
- [32] The Cricket Indoor Location System. *M. I. T. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory* [online]. [vid. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://cricket.csail.mit.edu/>
- [33] KOTARU, Manikanta, Kiran JOSHI, Dinesh BHARADIA a Sachin KATTI. SpotFi : Decimeter Level Localization Using WiFi. *Sigcomm 2015* [online]. 2015, 269–282 [vid. 2018-04-12]. ISSN 0146-4833. Dostupné z: doi: 10.1145/2785956.2787487
- [34] ZWIRELLO, Lukasz, Tom SCHIPPER, Marlene HARTER a Thomas ZWICK. UWB localization system for indoor applications: Concept, realization and analysis. *Journal of Electrical and Computer Engineering* [online]. 2012, **2012** [vid. 2018-05-01]. Dostupné z: doi:10.1155/2012/849638
- [35] CONNELL, Ciaran. What's The Difference Between Measuring Location By UWB, Wi-Fi, and Bluetooth? *electronicdesign* [online]. 2015 [vid. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-measuring-location-uwb-wi-fi-and-bluetooth>
- [36] LilyPad Arduino Main Board. *store.arduino* [online]. [vid. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/usa/lilypad-arduino-main-board>
- [37] LAN, Kun Chan a Wen Yuah SHIH. On calibrating the sensor errors of a PDR-based indoor localization system. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2013, **13**(4), 4781–4810 [vid. 2018-05-19]. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s130404781
- [38] NAYAK, Rajkishore, Amanpreet SINGH, Rajiv PADHYE a Lijing WANG. RFID in textile and clothing manufacturing: technology and challenges. *Fashion and Textiles* [online]. 2015, **2**(1) [vid. 2018-05-19]. ISSN 21980802. Dostupné z: doi: 10.1186/s40691-015-0034-9
- [39] TexTrace's Woven RFID Labels - The High-Tech Textile Solution. *rfid-in-blick.de* [online]. 2015 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.rfid-im-blick.de/de/201511122992/textrace-woven-rfid-labels-the-high-tech-textile-solution.html>

Přílohy

Příloha A - CD nosič

Příloha B: Zdrojový kód filtrační aplikace pro modul Movea

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    char c;
    char radekjedna [45];
    char radekdva [45];
    int stejnost;
    int i;
    int j;
    int k;
    FILE *fr, *fw;

    printf("Umistete zdrojovy soubor do stejneho adresare,\njako tento program a pojmenujte jej zdroj.txt\n");
    printf("\n\nFiltrovani spustite stiskem klavesy enter\n");
    while((c=getchar())!='\n'){
        }

    if ((fr=fopen("zdroj.txt", "r"))==NULL) {
        printf("Soubor zdroj.txt nelze otevrit, bud neexistuje, nebo je pozkozeny");
        return 1;
    }

    if ((fw=fopen("filtrovane.txt", "w"))==NULL) {
        printf("Soubor filtrovane.txt nelze vytvorit");
        return 1;
    }

    while ((c=getc(fr))!='\n') {
        radekjedna [i]=c;
        i++;
    }

    for(k=0;k<i;k++){
        fprintf(fw,"%c",radekjedna[k]);
        }
    fprintf(fw,"\n");
}
```



```
while(1){
  while ((c=getc(fr))!="\n") {
    if(c==EOF) goto end;
    radekdva [j]=c;
    j++;
  }

  if(i==j) {
    for(k=0;k<i;k++){
      if(radekjedna[k]==radekdva[k])
        stejnost++;
      else;}
    if(stejnost!=k){
      for(k=0;k<i;k++){
        fprintf(fw,"%c",radekdva[k]);
      }
      fprintf(fw,"\n");
      for(k=0;k<i;k++){
        radekjedna[k]=radekdva[k];
      }
      }
      j=0;
      stejnost=0;

    } else {
      for(k=0;k<j;k++){
        fprintf(fw,"%c",radekdva[k]);
      }
      fprintf(fw,"\n");

      for(k=0;k<i;k++){
        radekjedna[k]=0;
      }
      for(k=0;k<j;k++){
        radekjedna[k]=radekdva[k];
      }

      i=j;
      j=0;}

  }

end:
printf("\n\n\nfiltrace byla uspesna, pro ukonceni programu stisknete enter");

if ((fclose(fw))==EOF) {
  printf("vytvoreny soubor nelze uzavrit");
  return 1;
}
if ((fclose(fr))==EOF) {
  printf("Soubor zdroj.txt nelze uzavrit");
  return 1;
}
return 0;
}
```