

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta elektrotechnická

**Zpřesnění polohy uživatele mobilního  
terminálu s využitím senzorové fúze**

leden 2017

**Diplomant:** Bc. Filip Sušánek

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Filip Sušánek**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Zpřesnění polohy uživatele mobilního terminálu s využitím sensorové fúze**

Pokyny pro vypracování:

Navrhňte a zrealizujte systém pro zpřesnění určení GPS polohy uživatele. Využijte dostupných prostředků v moderním mobilním terminálu s operačním systémem Android. Systém bude využívat sensorovou fúzi či další technologie pro zvýšení přesnosti lokalizace. Navržený a zrealizovaný systém experimentálně ověřte a výsledky vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Grewal, M.S.; Weill, R.L.; Andrews, A.P.: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. New York, NY: Wiley, 2000. ISBN 0-471-20071-9.
- [2] Esselink, B.: *A Practical Guide to Localization*. Amsterdam & Philadelphia: John. Benjamins, 2000. ISBN 9-02721-956-7.

Vedoucí: Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 21. 12. 2015

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 9. 1. 2017

.....

podpis diplomanta

**Anotace:**

Tato práce se zabývá analýzou možností lokalizace uživatele v interiérovém prostředí pomocí moderního mobilního telefonu se systémem Android a aplikováním sensorové fúze. Součástí je podrobný teoretický rozbor problematiky lokalizace. Návrh nového lokalizačního systému je v práci podrobně rozebrán a poté otestován v praxi. Systém lokalizace uživatele je založený na rozpoznání orientace měřícího zařízení, detekci kroků a měření relativní výšky.

Navržený lokalizační systém je otestován na třech různých testovacích prostředích – interiéru, exteriéru a kombinaci obojího.

**Klíčová slova:** Android, Dead reckoning, exteriér, inerciální navigace, interiéru, komplementární filtr, lokalizace, Madgwickův orientační filter, mobilní telefon, navigace, sensorová fúze

**Summary:**

This thesis focuses on the possible analysis of localization of the user in the indoor and outdoor surroundings. This is achieved with the help of modern mobile phone with the Android operating system and with the application of sensor fusion. The one part of the thesis contains the theoretical discussion of the localization issue. After that the thesis contains design of new localization system based on Dead reckoning and inertial navigation technique.

Designed localization system is tested in three different scenarios – indoor path, outdoor path and combination of both indoor and outdoor.

Keywords: Android, complementary filter, Dead reckoning, indoor, inertial navigation, localization, Madgwick orientation filter, navigation, outdoor, sensor fusion, smartphone



## Obsah práce

1	Úvod.....	10
2	Teoretický rozbor.....	11
2.1	Rozdělení technik lokalizace a navigace.....	11
2.2	Klasické techniky lokalizace.....	13
2.2.1	Angulace.....	13
	Angle of Arrival (AoA).....	13
2.2.2	Laterace.....	14
	Time of Arrival/Time of Flight (ToA/ToF).....	15
	Time Difference of Arrival (TDoA).....	15
	Round Trip Time (RTT).....	15
	Received Signal Strenght (RSS).....	16
2.3	Problematika lokalizace v budovách a zastavěných oblastech.....	16
2.3.1	Problémy venkovních metod.....	16
2.3.2	Možné způsoby pro lokalizaci v budovách.....	17
	Proximity detection.....	17
	Scene analysis.....	18
	Dead reckoning.....	18
2.4	Dead reckoning.....	19
2.4.1	Určení počáteční polohy.....	19
2.4.2	Odhad polohy následující.....	19
2.4.1	Měření zrychlení a rychlosti.....	20
2.4.2	Orientace – Eulerovy úhly.....	21
2.4.3	Orientace – Quaterniony.....	22
2.4.4	Výhody a nevýhody Dead reckoning.....	23
2.4.5	Technologie pro sledování změn vnitřního stavu.....	24
2.4.6	Moderní technologie pro DR.....	24
	Gyroskop.....	25
	Akcelerometr.....	25
2.4.7	Komerční systémy.....	25
	Thales TopAxyz IMU.....	25
	Google Tango.....	26
2.5	Moderní mobilní telefon se systémem Android.....	27
2.5.1	Historie mobilního operačního systému Android.....	27

2.5.2	Struktura operačního systému .....	28
2.5.3	Specifikace měřicího zařízení Samsung Galaxy S IV .....	29
2.5.4	Lokální a referenční rámec souřadnic v Androidu.....	29
2.5.5	Akcelerometr, gyroskop a magnetometr.....	31
2.5.6	Senzor orientace, detektor kroků a tlakoměr .....	31
2.6	Senzorová fúze.....	33
2.6.1	Komplementární filtr .....	34
2.6.2	Kalmanův filtr.....	34
2.6.3	Madgwickův orientační filtr .....	35
3	Praktická část.....	38
3.1	Architektura lokalizačního systému pro pohyb chodce uvnitř i vně budov.....	38
3.1.1	Popis fungování systému .....	39
	Určení orientace zařízení .....	39
	Detekce kroků .....	40
	Vyhodnocení délky kroku.....	40
	Určení relativní výšky.....	40
3.1.2	Sběr a vyhodnocení dat.....	40
	Měření a sběr dat.....	40
	Vyhodnocení dat.....	41
3.1.3	Lokalizační systémy.....	41
	Systém A.....	41
	Systém B .....	42
3.2	Aplikace pro záznam dat z mobilního terminálu se systémem Android.....	42
3.2.1	Struktura a princip fungování aplikace .....	43
3.2.2	Popis měřicí aplikace .....	43
3.3	Analýza chování senzorů při měření v klidu .....	44
3.3.1	Akcelerometr .....	44
3.3.2	Gyroskop.....	46
3.3.3	Magnetometr .....	49
3.3.4	Kompas .....	51
3.3.5	Tlakoměr.....	53
3.4	Určení orientace zařízení vůči referenčnímu rámci .....	57
3.4.1	Orientace systému A .....	57
	Charakteristika kompasu ze systému Android.....	57
	Charakteristika orientace pomocí gyroskopu.....	57
3.4.2	Orientace systému B .....	58

	Charakteristika orientace pomocí Madgwickova filtru .....	58
3.4.3	Porovnání systému A a B .....	60
	Klidový stav .....	60
	Dynamické měření – pohyb .....	61
3.5	Detekce kroků.....	62
3.5.1	Krokoměr systému A – implementace systému Android.....	62
3.5.2	Krokoměr systému B – vlastní implementace.....	63
3.5.3	Porovnání systémů .....	65
3.6	Vyhodnocení délky kroku .....	67
3.7	Výškoměr .....	67
	Filtr .....	68
	Barický stupeň.....	68
	Přesnost měření .....	69
3.8	Měřící polygon .....	70
3.8.1	Interiér – budova FEL ČVUT v Dejvicích .....	70
	Ukázka změřené trasy .....	71
	Srovnání jednotlivých úseků trasy.....	74
	Korekce trasy pomocí externího systému.....	76
3.8.2	Exteriér – Podolí.....	77
	Ukázka změřené trasy .....	78
3.8.3	Exteriér–interiér – Sokol .....	80
	Ukázka změřené trasy .....	81
	Ukázka jiné trasy procházející exteriérem a interiérem .....	83
3.9	Shrnutí výsledků měření.....	85
4	Budoucí výzkum .....	86
5	Závěr .....	87





## 1 Úvod

Předmětem této práce je návrh lokalizačního systému s využitím sensorové fúze pro lokalizaci uživatele mobilního telefonu uvnitř budov i v exteriéru. Lokalizační systém funguje bez potřeby instalace nutné infrastruktury, jelikož pro lokalizaci využívá sensorové prostředky mobilního zařízení.

Práce se dělí na několik částí – teoretický rozbor, praktickou část, budoucí výzkum a závěr. V teoretickém rozboru je provedena analýza problematiky lokalizace, vyhodnocení různých přístupů a technik. Kapitola se dále podrobně věnuje lokalizační technice *Dead reckoning*, jejím principům a aplikaci. Dále je proveden popis měřícího zařízení, jeho specifikace a specifikace použitých senzorů. Nakonec se kapitola věnuje rozboru sensorové fúze, jejímu vysvětlení a příkladům technik fúze – komplementární filtr, Kalmanův filtr a Madgwickův orientační filtr.

V navazující praktické části se nachází návrh lokalizačního algoritmu využívající techniku *Dead reckoning*, detailní popis jeho fungování a představení dvou lokalizačních systémů využívající tento lokalizační algoritmus. První systém, označený jako Systém A, využívá gyroskop a kompas systému Android pro určení orientace zařízení, krokoměr systému Android a tlakoměr. Sensorová fúze orientace z gyroskopu a kompasu probíhá pomocí navrženého komplementárního filtru. Druhý systém, označený jako Systém B, využívá data z hardwarových senzorů měřícího zařízení – akcelerometru, gyroskopu, magnetometru a barometru. Následná fúze pro určení orientace zařízení v prostoru probíhá pomocí Madgwickova orientačního filtru. Detekce kroků se provádí na základě analýzy dat z akcelerometru.

V praktické kapitole se také nachází popis záznamové aplikace pouštěné na mobilním zařízení a analýza výstupních dat ze senzorů zařízení. Následuje rozbor praktických výsledků a naměřených testovacích tras.

V závěru práce se nachází shrnutí naměřeným výsledkům, vyhodnocení lokalizačního systému a úvaha k dalšímu možnému budoucímu výzkumu.

## 2 Teoretický rozbor

Tato teoretická část práce popisuje problematiku lokalizace uvnitř i vně budov pomocí různých přístupů a technologií. Rozebírá principy fungování a vhodné případy použití. Dále podrobněji zkoumá lokalizační techniku *Dead reckoning* a její implementaci v praxi. V této kapitole se také nachází rozbor použitého měřicího zařízení Samsung Galaxy S4 a popis problematiky senzorové fúze.

Takzvané *Location Based Services* (LBS) hrají v dnešním životě nezastupitelnou roli. Slouží k poskytování relevantních informací na základě pozice uživatele na Zemi. [1] Díky LBS tak například zjistíte stav dopravy na trase před vámi, předpověď počasí pro vaše okolí, možnosti dopravy veřejnou dopravou z určitého místa a mnoho dalšího. S nástupem moderních technologií a rozvojem LBS vzrostla potřeba rychlého a spolehlivého určování polohy uživatele. [1]

Historie lokalizace však sahá do daleko do minulosti a prošla dlouhým vývojem. Mezi nejstarší metody určení pozice a orientace patří sledování polohy Slunce a orientačních bodů v krajině nebo na nebi. Vynález kompasu znamenal počátek lokalizace pomocí člověkem vytvořené technologie. [2] K dnešnímu standardu určování polohy pomocí družicového rádiového signálu z oběžné dráhy však vedla ještě dlouhá cesta.

### 2.1 Rozdělení technik lokalizace a navigace

Techniky lokalizace a navigace můžeme rozdělit do následujících šesti skupin na základě technologie a metodiky provedení.

1. Navigace na základě orientačních bodů (*Pilotage*) [3]
  - Určení pozice a další navigace probíhá vzhledem k okolním orientačním bodům
  - Jako orientační body mohou sloužit výrazné objekty v dohledové vzdálenosti, např. vrcholy hor, údolí, řeky, domy a mnoho dalšího
2. Navigace výpočtem (*Dead reckoning*) [3]
  - Díky záznamu kurzu, rychlosti pohybu a uplynulého času lze sestavit trasu a určit svoji současnou pozici
  - Znalost výchozí pozice je zásadní, k ní se všechny další pozice vztahují
3. Navigace pomocí nebeských těles (*Celestial navigation*) [3]
  - Určení polohy se odvíjí na základě úhlu mezi vybraným nebeským tělesem vzhledem k horizontu v daném čase nebo z pohybu objektů po obloze
  - Pro navigaci může sloužit během dne Slunce a v noci zářící hvězdy nebo Měsíc
4. Radionavigace (*Radio navigation*) [3]
  - Technika pracuje s rádiovým signálem o určité frekvenci vyslaném od zdrojů se známou polohou
  - Lokalizace pomocí stanic GSM, satelitů systému GPS či různých radiomajáků

## 5. Inerciální navigace (*Inertial navigation*) [3]

- Spoléhá na známou počáteční pozici a měření změny vnitřního stavu orientace a zrychlení
- Měřicí zařízení využívá senzorů a zaznamenává změny vnitřního stavu
- Od techniky *Dead reckoning* se liší tím, že svoji polohu určuje ze změřených změn orientace a změn ve zrychlení

## 6. Analýza prostředí (*Fingerprinting/Scene analysis*) [4]

- Tento způsob lokalizace má dvě fáze – získání referenčních dat a porovnávání aktuálního měření s referenčními daty
- Lokalizaci můžeme založit na různých měřitelných bezdrátových attributech, jako je například WiFi nebo magnetické pole
- Lokalizace probíhá pouze v místě, pro které je daný atribut zmapován

První a třetí způsob, tedy navigace podle orientačních bodů a podle nebeských těles, provádí člověk. Přístroje schopné obstarat tyto způsoby je velmi těžké vyvinout a používat v praxi. I přesto existuje několik vlašovek využívajících moderní mobilní telefony, jako například projekt Tango od společnosti Google. [5] Projekt Tango využívá inerciální navigace v kombinaci s analýzou obrazu z přítomných kamer pro určení orientace a pohybu zařízení v prostoru. [5] V současnosti je však navigace podle orientačních bodů nebo nebeských těles stále doménou člověka.

Pro ostatní druhy navigace (2, 4, 5, 6) již existují a v praxi se i využívají specializované přístroje, například inerciální navigaci projektu Apollo, balistických střel nebo ponorek. [3] Pro zvýšení přesnosti se mohou různé techniky lokalizace kombinovat. [6] Předmětem této práce je prozkoumání možností použití druhé (*Dead reckoning*) a páté techniky (inerciální navigace) pro lokalizaci chodce uvnitř i vně budov.

Jiné možné dělení technik lokalizace a navigace je dle prostředí, ve kterém se lokalizace odehrává.

### 1. Venkovní techniky [1]

- a. Lokalizace a navigace v dnešní době spoléhá především na radionavigaci
- b. Stanice se známou polohou vysílají svůj signál a koncová stanice z přijatého signálu odvozuje svoji pozici
- c. Tyto techniky bývají velmi náchylné na nedodržení přímé viditelnosti, neboli NLOS (*None Line of Sight*)

### 2. Vnitřní techniky [1]

- a. Využívají se v jakékoliv uzavřené struktuře jako je obchodní centrum, knihovna nebo univerzitní kampus.
- b. NLOS zde ve většině případů není možné dodržet, proto zde venkovní techniky poskytují často nepřesné a nesprávné určení polohy
- c. Mezi použitelné způsoby lokalizace patří např. *Proximity Detection*, *Scene Analysis*, *Dead reckoning* a *Inertial Navigation*

### 3. Smíšená navigace

- a. Jde o techniku lokalizace použitelnou ve venkovním a zároveň i vnitřním prostředí [1]
- b. V současnosti je jednou takovou použitelnou lokalizační technikou světová databáze WiFi a databáze vysílačů mobilních sítí se zaměřenými pozicemi na Zemi [7]

- c. Navigace funguje všude tam, kde je pokrytí mobilním signálem nebo WiFi sítěmi, tedy i v interiérech [7]
- d. Přesnost správné polohy uživatele je menší než u GPS, ale s houstnoucím pokrytím bezdrátovými sítěmi se může zvýšit až na srovnatelnou úroveň [7]
- e. Nejrozšířenějšími příklady této smíšené navigace jsou databáze provozované Googlem a Applem [7]
- f. Další způsob, jak dosáhnou smíšené navigace je kombinace více technik, jedné pro venkovní použití a druhé pro vnitřní použití [1]

## 2.2 Klasické techniky lokalizace

Potřeba určování polohy a navigace s koncem zámořských objevů neochabla, naopak ještě mnohonásobně vzrostla. [8] Dnes v téměř každém státu má každý jedinec svůj vlastní mobilní telefon. Velká část z nich využívá i mobilní připojení na internet a s ním spojené LBS. Podle zprávy vydané ITU v 2016 je v rozvinutých zemích registrováno 90,3 mobilních připojení k internetu na 100 obyvatel. Celosvětový průměr pak dělá jen 49,4 na 100 obyvatel, avšak neustále každým rokem vzrůstá. [9]

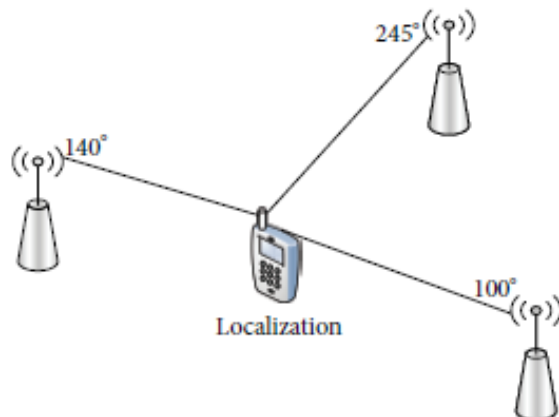
Pro lokalizaci a navigaci po Zemi se postupem času ukázal jako nejefektivnější způsob určování polohy pomocí radionavigace. Zdroje vysílají signál o určité frekvenci a koncové zařízení provádí vyhodnocení a určení pozice. Obecně lze ze změřeného signálu určit směr vysílání, vzdálenost vysílače a také vzájemnou rychlost vysílače a přijímače. V případě více vysílačů lze určit přesnou pozici pomocí angulace (triangulace) nebo alterace (trilaterace). [1]

### 2.2.1 Angulace

Technika lokalizace označená jako angulace spočívá v měření úhlu příchodu signálů od vysílačů se známou polohou. [1]

#### Angle of Arrival (AoA)

Pro určení polohy pomocí vysoce směrových antén teoreticky stačí dva vysílače rádiového signálu. Pomyslné přímky vedené z vysílačů pod změřenými úhly se protnou v jednom bodě, měřící pozici. Ke zvýšení přesnosti se však využívá měření úhlů z více vysílacích stanic, alespoň ze tří. Odtud pak název pro tuto techniku – triangulace. Zkratka AoA značí anglický termín *Angle of Arrival*. [4]



Obrázek 1: Technika AoA. Převzato z [63]

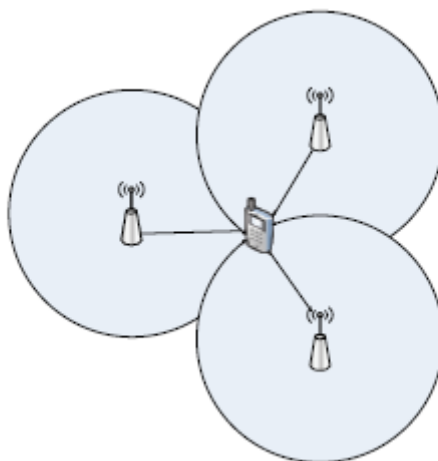
Měřicí zařízení musí být vybaveno pro určení správného směru vysílání vysoce směrovými anténami. Měření se také musí provádět v celé horizontální rovině, aby došlo k přesnému určení pozice vysílací strany. [1]

Techniky lokalizace založené na AoA mají určitá omezení. Předně měřicí zařízení musí být vybaveno vysoce směrovými anténami a jejich obsluha musí být prováděna správně. Další nepřesnosti vznikají vlivem prostředí mezi vysílací a přijímací stranou. Jakmile není mezi stranami přímá viditelnost, mohou vznikat odrazy signálu od překážek a může dojít k vícecestnému šíření. Tyto jevy mohou změnit směr příchodu signálu k uživateli a z toho důvodu snížit přesnost takového systému. [4]

Tato technika funguje dobře v rozlehlých, nezastavených a plochých krajinách, avšak v zastavených oblastech a v budovách ji lze jen těžko použít. [1]

### 2.2.2 Laterace

Druhý způsob určení polohy na základě příchozího signálu ze stanic se známou polohou se nazývá laterace. Technika spočívá v měření vzdáleností od vysílacích stanic. V tomto případě by nám dvě změřené vzdálenosti od vysílačů poskytly informaci o dvou polohách se stejnou pravděpodobností. Pro správné určení pozice je tedy zapotřebí alespoň tři různých vysílacích stanic. Z toho důvodu se mnohem častěji používá název trilaterace. [1]



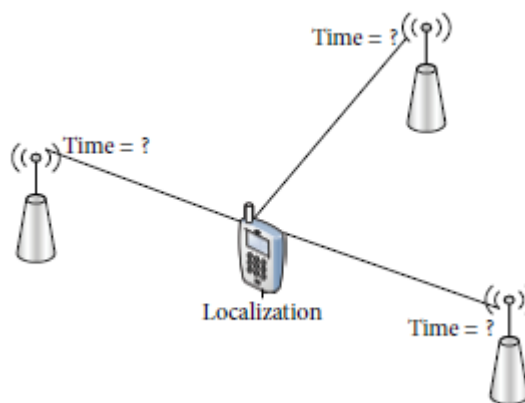
Obrázek 2: Technika laterace. Převzato z [1]

Na druhu systému záleží způsob měření vzdálenosti. Existují techniky založené na čase vysílání a na síle vysílání. Měření času můžeme provádět třemi způsoby: *Time of Arrival*, *Time Difference of Arrival* a *Round Trip Time*. Technika založená na sledování síly vysílání se nazývá *Received Signal Strength*. [1]

Metody laterace mají výhodu v tom, že lépe fungují v zastavěném prostředí a uvnitř budov. Vícecestné šíření ani odrazy signálu nemění významně měření, neboť systém neměří, odkud signál přišel, ale pouze za jak dlouho signál od vysílání dorazil. [1]

### Time of Arrival/Time of Flight (ToA/ToF)

Pomocí této techniky se měří čas mezi příchodem a odesláním zprávy nebo signálu. Vysílací strana pošle signál s časovou značkou a přijímací strana pomocí vlastních přesných hodin zjistí dobu přenosu. Z doby přenosu vypočítá pomocí známé rychlosti signálu vzdálenost od vysílače. Hledaná pozice je průsečíkem minimálně tří kružnic od tří vysílačů. [4]



Obrázek 3: Technika ToA. Převzato z [63]

Tento systém vyžaduje přesnou synchronizaci hodin všech účastníků, vysílačů i přijímače. Systém GPS využívá pro určování polohy trilateraci pomocí ToA. [1]

### Time Difference of Arrival (TDoA)

Dvojice vysílacích stanic vyšle signál ve známém čase a přijímací stanice změří rozdíl mezi vzdálenostmi mezi vysílacími stanicemi. Takto získaný rozdíl vzdálenosti však ještě nestačí k určení pozice. Je třeba změřit rozdíly mezi několika různými dvojicemi vysílačů. Každé takové měření vyprodukuje výsledek ve formě hyperbolické křivky. Průsečík několika těchto křivek určí pozici přijímací strany. Lokalizace pomocí této techniky se nazývá multilaterace. [4]

### Round Trip Time (RTT)

V tomto případě počáteční signál vysílá stanice snažící se určit svoji polohu. Vysílač, v tomto případě uživatel, vyšle signál stanici, která odpoví signálem odeslaným zpět. Vysílací zařízení z rozdílů časů vyslání a přijetí signálu vypočítá svoji vzdálenost vzhledem k odpovídající stanici. [4]

Výhodou systému založeného na RTT je, že nepotřebuje synchronizaci vysílačů a přijímače. Naopak nevýhodou je výpočetní náročnost vysílacího zařízení během komunikace s více stanicemi. To může způsobovat zpoždění lokalizace a možné nepřesnosti. [1]

## Received Signal Strength (RSS)

RSS systém je založený na analýze přijatého signálu. Odhad vzdálenosti se provádí na základě slábnutí síly signálu vyslaného ze známého vysílače. [1] Rádiový signál během svého šíření v prostředí slábne vlivem překážek a samotného prostředí. [10]

Systémy založené na RSS technice tohoto jevu využívají pro odhad vzdálenosti od vysílače. Pro určení přesné pozice přijímače jsou nutné alespoň vzdálenosti od tří vysílačů. Průsečík jejich kružnic udává hledanou lokaci. [1]

Další způsob využívající techniku RSS funguje na principu srovnávání změřených dat se známým souborem změřených dat pro danou lokaci. Tento systém měří *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). První důležitou fází pro funkci systému je získání souboru naměřených hodnot RSSI pro danou lokaci. Tato data jsou poté k dispozici ve druhé fázi, kdy dochází k porovnání aktuální změřené hodnoty RSSI se souborem známých dat a vyhledání nejpravděpodobnější pozice. [4] Jde o systém uvedený v kapitole 2.1 jako *Scene Analysis* neboli analýza prostředí.

Po uvedení přehledu různých obecného popisu technik lokalizací následuje problematika lokalizace v budovách.

### 2.3 Problematika lokalizace v budovách a zastavěných oblastech

Ve venkovních aplikacích se nejrozšířenějším systémem pro lokalizaci kdekoliv na Zemi stal satelitní systém americké armády *Global Positioning System*. [3] Již existují a plánují se však i další satelitní navigační systémy. Například ruský GLONASS, čínský COMPASS a evropské Galileo. [11]

Satelitní navigace umožňuje přesnou a relativně jednoduchou lokalizaci kdekoliv, kde je přítomný signál z družic. [3]

Další lokalizační technikou používanou ve venkovních aplikacích je určování polohy pomocí vysílačů mobilních sítí GSM, WCDMA a dalších. Lokalizace probíhá pomocí klasických technik triangulace nebo trilaterace. Přesnost je nižší než u satelitních systémů, ale stejně tak i výpočetní náročnost. [12]

Tyto systémy však nelze použít v uzavřených prostorech a tak je nutné hledat alternativy.

#### 2.3.1 Problémy venkovních metod

Systém satelitní navigace GPS i lokalizační systém pomocí mobilních sítí je silně závislý na přímém šíření signálu bez působení překážek. V ideálním případě, pokud se signál šíří na přímou viditelnost a nedochází k rušení signálu vlivem odrazů a vícecestného šíření, dosahuje satelitní navigace velmi přesných výsledků, řádově jednotky metrů. [3]

Dalším jevem, který se přidává k ovlivňování signálu, je slábnutí intenzity vlivem šíření přes překážky a vlivem prostředí. Rádiový signál je vyslán s určitou intenzitou a ta je během jeho šíření ovlivňována prostředím, kterým prochází. [10] Satelitní navigace je nejvíce ovlivňována vrstvou atmosféry zvanou ionosféra. Kvůli slunečnímu záření dochází k ionizaci ionosféry a vznikají oblaka volných elektronů, která způsobují disperzi rádiového signálu. [3]

Tyto jevy způsobují nepřesnost v určování polohy. Přesnost satelitní navigace ovlivňují častěji a výrazněji odrazy signálu a vícecestné šíření způsobené překážkami na trase vysílač-přijímač. [3]



Přesnost lokalizace pomocí mobilních sítí závisí na způsobu použité techniky lokalizace. V případě triangulace největší chybu opět způsobuje odraz signálu a vícecestné šíření. [1] Avšak v případě trilaterace chybu měření způsobují překážky a prostředí ovlivňující intenzitu přijatého signálu. [1]

Zastavěné nebo uzavřené oblasti se těmto jevům nevyhnou a tak přesnost dvou výše uvedených systémů klesá. Pro zachování přesnosti lokalizace, alespoň jako v případech na přímou viditelnost, by bylo zapotřebí vytvořit takový matematický model šíření signálu, který bude brát v potaz charakteristiku okolí a bude co nejvěrněji modelovat šíření skutečného signálu v daném interiéru. [4] Takovýto model je však obtížný na vytvoření a musel by být vytvářen pro každou jednotlivou lokaci. [4] Z toho důvodu se zkoumají vhodnější a flexibilnější metody lokalizace v interiérech.

### 2.3.2 Možné způsoby pro lokalizaci v budovách

Tradiční metody lokalizace používané v exteriéru lze jen stěží použít pro interiérové prostředí, proto existují systémy poskytující lokalizaci na základě jiných charakteristik. [1]

Mezi hlavní způsoby lokalizace uvnitř budov se řadí následující: sledování přiblížení (*Proximity detection*), analýza prostředí (*Scene analysis/Fingerprinting*) a navigace výpočtem (*Dead reckoning*). [1] [4] Další možné způsoby navigace se zakládají například na ultrazvuku, optickém vjemu, magnetickém poli nebo infrastruktuře daného prostředí. [1]

#### Proximity detection

Princip techniky sledování přiblížení spočívá v tom, že stanice svoji polohu určí podle zdroje vysílání v okolí. Zdroj vysílání má známou polohu a známý dosah. Jakmile se klient připojí, zaregistruje nebo aktivuje tuto známou stanici, vyhledá ve své databázi stanici s informacemi o jejím umístění a dosahu. Z těchto dat klient určí svoji polohu jako polohu stanice s přesností danou jejím omezeným dosahem. [4]

Přesnost technik založených na sledování přiblížení závisí na parametrech konkrétního systému. Technika *Proximity detection* je jedna z nejjednodušších lokalizačních systémů a je velmi jednoduchá na implementaci. [1] V případě využití technologie jako je NFC může přesnost dosáhnout až jednotek centimetrů. Ovšem kompletní pokrytí daných prostor takovými buňkami s takto vysokou přesností by vyžadovalo velké množství vysílacích zařízení. Z tohoto důvodu je nutný kompromis mezi přesností lokalizace a hustotou a velikostí buněk pokrývajících danou oblast.

*Proximity Detection* se využívá v mobilních sítích, kde zařízení uživatele určí svoji polohu na základě připojení k vysílací stanici, tzv. *Cell of Origin* (CoC). [4] Pokud zařízení detekuje více vysílacích stanic, tedy dojde k překryvu buněk, existují dva přístupy, které mohou být implementovány. První a jednodušší spočívá v prostém přiřazení polohy terminálu k poloze vysílací stanice s nejsilnějším signálem. [1] Druhý a složitější způsob spočívá v určení polohy pomocí přiřazení váhy vysílací stanici vzhledem k úrovni přijatého signálu. Výsledkem je zcela nová vypočtená poloha terminálu, která se nemusí rovnat poloze některého ze zachycených vysílačů. [4]

Systémy lokalizace založené na *Proximity detection* mohou využívat mnoho technologií. Například výše zmíněné mobilní sítě, WiFi sítě, NFC a RFID komunikaci, Bluetooth, ZigBee, infračervené či ultrazvukové vysílače. Většina bezdrátových technologií může být teoreticky použita také pro tento způsob lokalizace. [1]

## Scene analysis

Technika analýzy prostředí má dvě fáze. [1] První, tzv. *offline* kalibrační fáze, spočívá v získání souboru dat měřené veličiny společně se souřadnicemi měřeného místa. V předem určených bodech v prostoru dojde k záznamu dané veličiny. Z těchto dat se vytvoří databáze a mapa prostředí reprezentující rozložení měřeného parametru. Obvykle se měří síla přijatého signálu RSSI nějakého rádiového zdroje. Mapu lze vytvořit měřením v lokaci nebo pomocí počítačového modelu. [4]

V druhé, tzv. *online* operační fázi, dochází k lokalizaci terminálu pomocí aktuálně změřené veličiny. Aktuální změřený vzorek se porovnává vůči databázi a v případě shody dojde k přiřazení lokace. [1]

Jako referenční veličinu lze s pomocí této techniky použít téměř jakoukoliv externí změřitelnou veličinu. S velkým úspěchem se používá RSSI WLAN. Lze však i používat magnetické pole budovy, zvukový záznam nebo obrazový záznam. [13] Ve všech případech dochází k porovnávání výsledků měření s databází.

Nevýhodou této lokalizační techniky je nutnost mít vytvořenou mapu prostředí v závislosti na parametru. Takovouto mapu lze získat měřením v lokaci nebo vytvořením vhodného modelu a následným výpočtem. Dlouhé a časově náročné měření dokáže počítačová simulace eliminovat, ale je zde nebezpečí špatně nastaveného modelu. [1]

V současnosti je *Scene analysis* nejrozšířenější technikou používanou pro *indoor* lokalizaci. [13]

## Dead reckoning

Navigace výpočtem neboli *Dead reckoning* je proces určení pozice z předcházející známé pozice a sledování změn rychlosti a orientace. Na základě změn v rychlosti a orientaci v čase od poslední známé pozice lze jednoduchým výpočtem dostat pozici novou. [1] [3]

Anglických termínů pro tuto techniku je několik. Nejčastěji se lze setkat s termínem *Dead reckoning*, avšak existují varianty známé jako *Ded reckoning* nebo *Deducted reckoning*, které označují totéž. [14]

Důležitým okamžikem v této technice je určení výchozí pozice. To proběhne na základě jiné lokalizační techniky, například pomocí orientačních bodů a pomocí mapy nebo pomocí satelitní navigace. Každá další určená lokace se odvodí od tohoto počátečního bodu. [15]

Během času a pohybu se sleduje uplynulý čas, rychlost a směr pohybu. Každá jednotlivá poloha v čase se vypočte na základě předchozí pozice a přírůstku uražené vzdálenosti za uplynulý čas určitým směrem. [4]

Slabinou systémů využívajících *Dead reckoning* je kumulativní chyba systému v čase, tedy rostoucí odchylka od skutečné pozice a tím rostoucí nepřesnost systému. [1] Z podstaty fungování této techniky, kdy se současná pozice vypočítává výhradně na základě pozice předcházející, nelze tuto chybu eliminovat jinak, než dalším externím systémem provádějícím korekci v čase. [3]

## 2.4 Dead reckoning

Technika navigace a lokalizace známá pod anglickým termínem *Dead reckoning* (DR), neboli česky navigace výpočtem, je již několik století stará. Tento způsob sloužil především k určování pozice námořních plavidel při vzdálení se od pevniny. Pomocí kompasu a lana s uzly se měřil kurz plavidla a jeho rychlost. [16]

Existuje však i jiné využití techniky *Dead reckoning*. Již ve 3. století ve starověké Číně byl znám vynález zvaný „Jih ukazující dvoukolový povoz“. Toto čistě mechanické zařízení bylo schopno po počátečním nastavení udržovat daný směr sochy na povoze i přes pohyb a otáčení vozu. Přestože pravděpodobně tento vůz sloužil spíše pro pobavení a nepoužíval se jako navigační pomůcka na dlouhých cestách kvůli své kumulativní chybě, stále jde o velmi zajímavý vynález. [17]

Princip fungování DR pro určování aktuální pozice spočívá v určení počáteční pozice pomocí jiné navigační techniky a následném sledování rychlosti a směru pohybu v čase. Každé následující určení pozice probíhá tak, že k předcházející pozici se přičte vypočtený rozdíl z rychlosti, směru a uplynulého času. [4]

### 2.4.1 Určení počáteční polohy

Inicializační fáze lokalizační techniky DR je velmi důležitá. Při nepřesném nebo špatném určení výchozí pozice budou i všechna následující určení nepřesná nebo přímo špatná. Samotná technika DR nemá žádný mechanismus pro průběžné zpřesňování lokalizace. Jediné možné zpřesnění lze udělat pouze přerušением předchozí navigace a novým určením výchozího bodu. [4]

Pokud nedojde k určení výchozí pozice, pak je technika DR schopna pouze měřit relativní pohyb a pozici vůči výchozímu bodu. Když však určíme výchozí bod, technika poté umožňuje měřit absolutní trasu pohybu a absolutní pozici v prostoru. [4]

Jako externí referenci pro určení výchozí pozice můžeme použít jakýkoliv jiný absolutní poziční a navigační systém. V exteriérech se v současnosti nejvíce využívá pozice ze satelitního navigačního systému, např. GPS. V interiéru lze s úspěchy použít například techniky *Map Matching*, *Cell of Origin* nebo *Scene Analysis* založené na sledování přijatého WiFi signálu, či jiné fyzikální veličiny. [4]

### 2.4.2 Odhad polohy následující

Identifikace pozice v horizontální rovině vyžaduje vždy dvě souřadnice. Při plavbě po moři tyto dvě souřadnice stačí, jelikož výška plavidla v čase není důležitá. Avšak pro pohyb v budovách nebo v jakémkoli členitém terénu je vhodné znát i svoji výšku. Tu lze určit dvěma způsoby. Můžeme použít externí zařízení, které měří absolutní, nebo relativní výšku a změny v průběhu času sledovat. Druhá možnost je sledovat směr pohybu nejen v horizontální rovině úhlem  $\theta$ , ale sledovat i úhel  $\sigma$  mezi horizontální rovinou a směrem pohybu.

Horizontální rovina je obvykle určena dvěma na sebe kolmými osami. V této práci se používá systém Android, který má systém os ENU. Osa X míří na východ, osa Y míří na sever a osa Z míří vzhůru od středu Země. Proto použijeme pro horizontální pohyb právě souřadnice X a Y. [18]

Vektor označující určenou pozici nazvěme  $s_i$ , kde index  $i$  označuje číslo určené lokace. Pro absolutní určení pozice v čase a prostoru má vektor  $s_i$  čtyři složky. Obsahuje souřadnice  $x_i, y_i, z_i$  a  $t_i$ , kde  $x, y$  a  $z$  označují prostorové souřadnice a  $t$  čas, kdy došlo k výskytu v tomto bodě.

$$s_i = [x_i \ y_i \ z_i \ t_i] \quad (1)$$

Pro určení pozice a navigace uživatele nám však často stačí pouze první dvě složky vektoru  $s_i$ , které určí pozici v horizontální rovině. Tyto souřadnice lze jednoduše vypočítat na základě uražené vzdálenosti a směru pohybu určeném úhlem  $\theta$ . [4]

$$s_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i-1} + l_i \sin \theta_i \\ y_{i-1} + l_i \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Úhel  $\theta$  je změřený azimut pomocí kompasu, neboli úhel mezi magnetickým severem a směrem pohybu.  $l_i$  označuje uraženou vzdálenost od poslední aktualizace polohy. Části vektoru  $s_{i-1}$ , tedy  $x_{i-1}$  a  $y_{i-1}$  označují poslední předchozí vypočtenou pozici. Pomocí tohoto vzorce dojde k aktualizaci předchozí pozice o změřenou uraženou vzdálenost a k definování nové pozice  $s_i$  v horizontální ploše. [4]

Uražená vzdálenost  $l_i$  se získá způsobem vlastním příslušné aplikaci. Často se získává z rychlosti a uplynulého času. V pravidelných intervalech dochází k měření aktuální rychlosti. Vzdálenost se poté vypočte vynásobením rychlosti uplynulým časem. [8]

$$l_i = v_i * t_i \quad (3)$$

Další způsob výpočtu vhodný právě pro pohybujícího se chodce spočívá v určování uražené vzdálenosti pomocí sledované délky kroku. V případě, že dojde ke kroku, vypočte se následující pozice pomocí rovnice (6), ve které značí  $l_i$  vzdálenost  $i$ -tého kroku. [6]

$$l_i = l_{step}(i) \quad (4)$$

Sledování a určování pravděpodobné délky kroku uživatele se podrobně věnuje kapitola 3.6.

### 2.4.1 Měření zrychlení a rychlosti

V aplikacích, kde není možné fyzicky přesně změřit uraženou vzdálenost pohybujícího se objektu, je proto třeba ji vypočítat ze známé rychlosti nebo zrychlení a uplynulého času. [3] Pro měření ujeté vzdálenosti na bicyklu se používá cyklistický tachometr. Moderní digitální tachometr zaznamenává impulsy a otáčky kola. Ze zadaného obvodu kola se vypočte ujetá vzdálenost prostým vynásobením počtu změřených otáček. [19]

$$l = o_{kola} * k_{otáček} \quad (5)$$

V aplikacích, kde lze přímo měřit rychlost pohybujícího objektu či vozidla, se uražená vzdálenost vypočítá integrací rychlosti a uplynulého času. V letectví se například využívá přístroj zvaný letecký rychloměr. Ten měří rychlost letadla vůči okolnímu vzduchu. [20]

$$l = \int v dt \quad (6)$$

Dalším způsobem, jak lze odvodit uraženou vzdálenost s použitím rychlosti, je integrovat zrychlení pohybujícího se objektu a získat tak rychlost objektu. Integrujeme-li zrychlení v čase,

dostaneme hodnotu aktuální rychlosti pohybu objektu. Provedeme-li pak integraci takto získané rychlosti, vyjde nám hodnota aktuální pozice. [4]

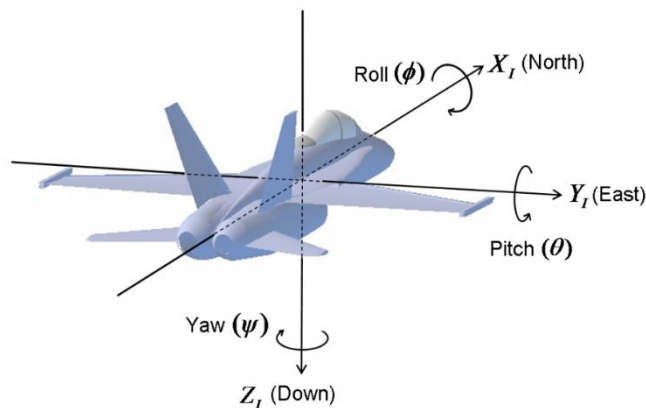
$$v = \int a dt \quad (7)$$

Nevýhoda tohoto způsobu spočívá ve dvojité integraci pro získání uražené vzdálenosti. Chyba ve měření zrychlení se projeví lineárně rostoucí chybou v určení rychlosti a kvadraticky rostoucí chybou v určení vzdálenosti. [4]

### 2.4.2 Orientace – Eulerovy úhly

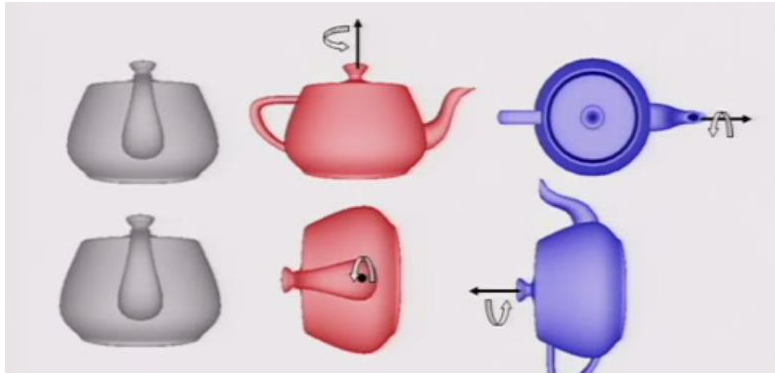
Pro popis orientace objektu v prostoru lze použít tzv. Eulerovy úhly. Tyto úhly jsou celkem tři a popisují rotace okolo všech tří os. Rotace okolo osy má kladné znaménko ve směru proti hodinovým ručičkám a záporné znaménko po směru hodinových ručiček. [21]

Rotace okolo osy Z se nazývá *Yaw*, nebo také někdy *Azimuth* a česky jde o kurz nebo azimut. Rotace okolo osy Y se nazývá *Pitch* a jde o podélný sklon a rotace okolo osy X se nazývá *Roll* a označuje příčný sklon. [21] [22] Sekvencí těchto úhlů jde popsat jakákoliv orientace objektu v prostoru vzhledem k referenčnímu systému os. Jinými slovy v referenčním rámci lze popsat orientaci lokálního rámce objektu.



**Obrázek 4: Definice Eulerových úhlů. Yaw = azimut/kurz, Pitch = podélný sklon, Roll = příčný sklon. Převzato z [21]**

Eulerovy úhly mají tu výhodu, že jsou pro člověka dobře srozumitelné. Nevýhody pro použití v technické praxi však převažují. Předně pro popis orientace objektu v 3D prostoru je nutné dodržovat dané pořadí rotací. Důvod je ten, že při záměně pořadí v aplikaci rotací můžeme dostat jiný výsledný úhel.



Obrázek 5: Změna pořadí v aplikování rotace. Převzato z [64]

Nutnost dodržovat pořadí rotací dala vzniknout konvenci, která určuje pořadí jednotlivých rotací jako *Yaw*, *Pitch* a *Roll*. Neboli rotace podél osy Z, Y a X, tedy napřed úprava kurzu, poté podélného sklonu a nakonec sklonu příčného. [21]

Další a hlavní velkou nevýhodou Eulerových úhlů je jev zvaný *Gimbal Lock*. Jedná se o natočení, ve kterém se ztrácí informace o rotaci kolem jedné z os. Dojde ke splynutí a překryvu dvou os. Tento jev nastává, když podélná rotace okolo osy Y bude rovna 90°. V ten okamžik příčná rotace okolo osy X je stejná s kurzem okolo osy Z. Rotace okolo jedné z těchto os ovlivňuje úhel na ose druhé. Znamená to tedy, že již nelze sledovat budoucí změnu natočení okolo osy Z nebo X. [21]

### 2.4.3 Orientace – Quaterniony

Quaternion je čtyřdimenzionální komplexní číslo, které může být použito pro vyjádření orientace objektu v prostoru. Jde o alternativu k vyjádření orientace pomocí Eulerových úhlů. Princip určení orientace s pomocí quaternionů spočívá v definování osy rotace vektorem  ${}^R\vec{r}$  v referenčním rámci a úhlu  $\theta$  otočení lokálního rámce okolo této osy. [23]

Tato operace se značí  ${}^R_L\hat{q}$  a říká, že provádíme rotaci rámce  $L$  vzhledem k rámci  $R$  pomocí vektoru  $\hat{q}$ . Značení vektorů převzato z práce Sebastiana Madgwicka. [23] Index  $L$  označuje lokální rámec, neboli uspořádání os sledovaného objektu a index  $R$  označuje globální rámec, ke kterému orientaci vztahujeme. V našem případě globální rámec je popsán pomocí ENU, tzn. osa X míří na východ, osa Y na sever a osa Z vzhůru od středu Země.

$${}^R_L\hat{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4] \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \\ -r_x \sin \frac{\theta}{2} \\ -r_y \sin \frac{\theta}{2} \\ -r_z \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Jednotkový vektor  ${}^R\vec{r}$  obsahuje tři složky a popisuje osu otáčení objektu v referenčním rámci souřadnic. Úhel  $\theta$  udává směr a velikost otočení okolo osy otáčení definované pomocí  ${}^R\vec{r}$ . [23]

Numerické operace s quaterniony často vyžadují normalizaci vektoru  ${}^R_L\hat{q}$ . Doplněk quaternionu  ${}^R_L\hat{q}$  se značí  ${}^R_L\hat{q}^*$  a popisuje rotaci referenčního rámce  $R$  do lokálního rámce  $L$ . [23]

$${}^R\hat{q}^* = {}^L\hat{q} = [q_1 \ -q_2 \ -q_3 \ -q_4] \quad (10)$$

Násobení quaternionů značené  $\otimes$  lze použít pro spojité rotace. Například ze dvou různých rotací  ${}^A\hat{q}$  a  ${}^R\hat{q}$  lze získat výslednou rotaci  ${}^L\hat{q}$ . [23]

$${}^L\hat{q} = {}^A\hat{q} \otimes {}^R\hat{q} \quad (11)$$

Výsledek násobení dvou quaternionů  $a$  a  $b$  se vypočítá pomocí Hamiltonova pravidla podle následující rovnice. Násobení quaternionů není komutativní, tedy záleží na pořadí násobení. [23]

$$\begin{aligned} a \otimes b &= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \otimes [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4] \\ &= \begin{bmatrix} a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4 \\ a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_2 \\ a_1b_3 - a_2b_4 + a_3b_1 + a_4b_2 \\ a_1b_4 + a_2b_3 - a_3b_2 + a_4b_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

Rotaci třídímního vektoru  $\vec{v}$  z jednoho rámce do druhého provedeme pomocí násobení příslušnými quaterniony. Ovšem nejprve je nutné rozšířit třídímní vektor  ${}^L\vec{v}$  na čtyřdímní přidáním  $0$  jako prvního členu. [23]

$${}^L\vec{v} = [0 \ v_x \ v_y \ v_z] \quad (13)$$

Poté je možné provést násobení quaterniony pro dosažení transformovaného vektoru  ${}^R\vec{v}$ , který je identický s  ${}^L\vec{v}$ , pouze je vyjádřený v jiném referenčním rámci. [23]

$${}^R\vec{v} = {}^R\hat{q} \otimes {}^L\vec{v} \otimes {}^L\hat{q}^* \quad (14)$$

Výhodou použití quaternionů oproti Eulerovým úhlům je to, že quaterniony nemohou trpět jevem *Gimbal Lock*. Důvodem je aplikace pouze jedné rotace pro dosažení požadované orientace na rozdíl od posloupnosti otáčení pomocí Eulerových úhlů. Quaternion dále jednoznačně popisuje orientaci objektu v prostoru. [4]

#### 2.4.4 Výhody a nevýhody Dead reckoning

Velká výhoda lokalizační techniky Dead reckoning spočívá v tom, že pro sledování pohybujícího objektu není nutné vytvářet jakoukoliv sledovací infrastrukturu. Systém si vystačí pouze se senzory pro měření času, sledování rychlosti a směru pohybu. [4]

Výpočetní náročnost takového systému je velmi nízká. Proto se technika používala již ve středověku při námořních výpravách a později v aviatice. Díky jednoduchosti výpočtu může lokalizaci rychle provádět člověk ručně na papíře, či ve spolupráci s mapou. [16]

Za ideálních podmínek a přesném měření rychlosti a směru pohybu lze velmi věrohodně rekonstruovat absolvovanou trasu. [3]

Mezi nevýhody DR patří nutnost počátečního určení výchozí pozice pomocí jiného systému pro dosažení absolutní lokalizace. Bez tohoto určení získá uživatel pouze relativní trasu pohybu k neznámému výchozímu bodu. Chybné určení výchozí pozice způsobí chybu, kterou během lokalizace již nelze opravit. Chyba je způsobena procesem určení každé následující pozice, kdy se vychází ze znalosti pozice předcházející. [4] Tato chyba má kumulativní charakter a roste s časem a uraženou vzdáleností.

Výše popsané chybné určení rychlosti ilustruje příklad z letectví. Na palubě letadla se nachází rychloměr měřící rychlost letadla na základě proudícího vzduchu v okolí. Tento přístroj velmi přesně určí rychlost vůči okolnímu prostředí, avšak neumí vzít v úvahu rychlost samotného atmosférického proudění vzduchu. [20] Pokud tedy bude foukat silný vítr proti nebo po směru letu, bude nutné provést úpravu změřené rychlosti o tento jev, jinak dojde k velké chybě v určení pozice. Stejně tak boční vítr ovlivní uletěnou trasu tím, že způsobí snos letadla po směru proudění vzduchu. [24]

## 2.4.5 Technologie pro sledování změn vnitřního stavu

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, lokalizační a navigační technika DR se historicky používala při pohybu neznámým prostorem a prostředím bez orientačních bodů, např. po moři nebo poušti. [16] Pozdější využití našla v nově se rozvíjejícím letectví, kdy sloužila jako hlavní navigační pomůcka až do rozšíření radionavigace. [24]

V námořní navigaci se data pro DR sbírala pomocí kompasu, lana s uzly a přesýpacích hodin. Kompas sloužil jako přístroj měřící kurz plavidla. V případech, kdy nefungoval či se ztratil, se kurz určoval pomocí nebeských orientačních bodů. [25]

Lano s uzly sloužilo pro měření rychlosti plavidla vůči hladině. Na konec lana se přivázalo speciálně opracované dřevo, tzv. „log“, které po vhození do vody zůstalo na místě. Na laně byly navázány uzly v intervalech 1/120 námořní míle. Lano se po vhození do vody začalo odvíjet a měřilo, kolik uzlů projde za interval 30 s. Prostým vynásobením se získala rychlost lodí v uzlech za hodinu. Přesýpací hodiny sloužily k měření přesného času pro výpočty. [25]

Letectví pro měření rychlosti a kurzu využívá opět kompas a rychloměr. Rychloměr v letectví má podobu anemometru, kdy se měří rychlost protékajícího vzduchu měřící sondou. Existuje několik typů anemometru pro určení rychlosti, např. na základě průtoku vzduchu, nebo na základě rozdílu statického a dynamického tlaku. [20]

Během letu se letadla kromě navigace v horizontální rovině musí pohybovat i ve vertikální rovině, je tedy nutné mít přístroj pro určení výšky. K tomu slouží přístroj měřící statický tlak okolního vzduchu, který převádí na pravděpodobnou výšku letadla. Dříve se přístroj používal tak, že v místě startu letadla se tamní atmosférický tlak nastavil na nulovou hladinu, tedy výšku 0 m. Během letu se aktuální výška vypočítávala z rozdílu nastaveného výchozího tlaku a aktuálního změřeného tlaku. V současnosti se pro určení letových hladin využívá tento přístroj nastavený na referenční hodnotu celosvětového průměru atmosférického tlaku při hladině moře. Tato referenční hodnota je 1013,25 hPa. [26]

## 2.4.6 Moderní technologie pro DR

Rozvoj moderní techniky přinesl nové technologie i do lokalizační techniky *Dead reckoning*. V současnosti se pro měření pohybu používají tzv. *Inertial Measurement Unit* (IMU) neboli inerciální jednotky. Taková jednotka obsahuje několik druhů senzorů pro sledování zrychlení a změny v orientaci. [1]

Standardní IMU jednotka obsahuje tříosý akcelerometr a tříosý gyroskop. Tato konfigurace jednotky se označuje jako *6 Degrees of Freedom* (6DOF). Obsažené senzory jsou schopné měřit zrychlení a úhlovou rychlost na všech třech na sebe kolmých osách a tím pokrýt měření v jakékoliv orientaci. [3] Pokud je jednotka označena jako 9DOF, pak ještě navíc obsahuje magnetometr, který



měří intenzitu magnetického pole a to také na všech třech osách. To umožňuje zarovnat jednotku pro orientaci vůči Zemi, která se tak stane referenčním rámcem. 9DOF jednotky se také označují jako MARG (*Magnetic, Angular Rate and Gravity*), nebo AHRS (*Attitude and Heading Reference Systems*). [23]

## Gyroskop

Gyroskop je zařízení sloužící pro měření úhlové rychlosti, nebo přímo úhlů mezi aktuálním stavem a výchozí pozicí. Mechanický gyroskop funguje na principu uchování momentu hybnosti, kdy rotující kotouč je zavěšen ve volně pohyblivé mechanické konstrukci. Konstrukce se skládá ze tří do sebe vložených kruhů umožňujících rotaci ve všech možných směrech. Rotující disk při otáčení konstrukcí zachovává svoji původní orientaci a je možné z konstrukce odečítat přímo Eulerovy úhly vůči výchozí orientaci. [27] [28]

Avšak moderní MEMS gyroskopy funguje na jiném principu. Neobsahují žádnou rotující součástku. Díky implementaci na čip je nutné využití jiného principu pro měření úhlové rychlosti. Proto se používá vibrující prvek, který díky Coriolisovu efektu detekuje působící sílu na vibrující prvek podléhající rotaci. [27] [28]

Existuje několik různých typů gyroskopů, z nichž každý má různou velikost a různou přesnost. V současnosti zástupce specializovaných komerčních gyroskopů se nazývá *Ring Laser Gyroscope* (RLG). Tento vysoce přesný gyroskop využívá dvojice laserových paprsků odrážejících se v měřicí soustavě. Laserové paprsky jsou vyslány ze dvou zdrojů proti sobě a poté společně dopadají na stínítko, kde dochází k interferenci. Tento gyroskop má přesnost a stabilitu o několik řádů vyšší než levné MEMS gyroskopy, avšak za cenu složitější a větší konstrukce. [3]

## Akcelerometr

Akcelerometr připevněný k objektu slouží pro měření zrychlení působících na objekt. Mechanický akcelerometr se skládá z měřící hmoty zavěšené ze dvou stran na pružinách připevněných k pevné konstrukci. Takto připevněné závaží umožňuje měřit zrychlení pouze v jedné ose. Působením vnějších mechanických sil na objekt dojde k vychýlení závaží z důvodu zákona zachování hybnosti, kdy se závaží musí vychýlit ze svého klidového stavu. [3]

Moderní MEMS akcelerometr funguje na stejném principu. Díky zrychlení dochází k vychýlení měřící hmoty, které se projeví změnou kapacity mezi elektrodami integrovaného obvodu. [27] [28]

Existuje několik druhů akcelerometrů, které se liší svojí konstrukcí, přesností a vhodností použití. MEMS technologie se prosazuje všude tam, kde je zapotřebí miniaturizace, nízká cena a nejsou vysoké nároky na přesnost. [3]

### 2.4.7 Komerční systémy

#### Thales TopAxyz IMU

Komerční vysoce kvalitní IMU jednotka od společnosti Thales pohání velké množství navigačních systémů na moři, na souši, ve vzduchu i ve vesmíru. Konstrukce této jednotky zahrnuje tři RLG (*Ring*

*Laser Gyroscope*) gyroskopy. Každý gyroskop obsahuje pár laserů měřící úhlovou rychlost. Použité akcelerometry jsou také nejvyšší kvality. [29]

Díky pokročilé technologii TopAxyz IMU jednotka vykazuje stabilitu orientace v čase menší než 0,01 °/h. Střední hodnota chyba měření akcelerace je pouze řádově 100  $\mu g$ . [30]

Pro srovnání méně pokročilé systémy mohou trpět chybou řádově stovky stupňů za hodinu a chybou měření akcelerace řádově 100 mg. [30]

## Google Tango

V únoru roku 2014 představil Google veřejnosti projekt Tango. Jde o zařízení, které pomocí kombinace inerciální jednotky a obrazu z několika speciálních kamer dobře rozpoznává pohyb uživatele a zároveň vytváří 3D model prostředí okolo uživatele. [31]

Speciální hardware tvoří širokoúhlá kamera a mobilní IMU, která se skládá z akcelerometru a gyroskopu. IMU jednotka zaznamenává pohyb na základě zrychlení a orientace. Obraz z kamery je analyzován a proběhne vyznačení bodů pro sledování pohybu neboli *motion track*. Tyto dva zdroje pohybu jsou poté sloučeny a dojde k významnému zpřesnění polohy a záznamu pohybu uživatele. [32]

Jako příklad slouží chůze po budově, kdy uživatel vyjde po schodech pět pater, přejde budovu, pět pater sejde a vrátí se na výchozí pozici. Tango změří celkovou dráhu 380 m a v porovnání se skutečnou trajektorií dojde k odchýlení na konci trasy pouze o 1 %. [33]

V roce 2016 došlo k představení prvního komerčně dostupného mobilního telefonu vybaveného potřebnými senzory. Jde o Lenovo Phab 2 Pro. [31]

## 2.5 Moderní mobilní telefon se systémem Android

V dnešní době existuje mnoho výrobců mobilních telefonů, kteří využívají různě upravený software od společnosti Google. Trh se zařízeními je doslova obrovský. Podle průzkumu společností Open Signal za rok 2015 existovalo v tomto roce 1294 různých značek vyživajících systém Android. [34] Výrobci těchto značek uvedli v témže roce celkem 24093 různých modelů zařízení běžících na tomto systému. [34] Ze všech celosvětově prodaných zařízení s Androidem bylo téměř 38 % vyrobeno firmou Samsung. [34]

Jako zástupce moderních a velmi rozšířených mobilních telefonů bylo zvoleno pro tento výzkum zařízení od společnosti Samsung označeno jako Galaxy S IV. Používá se také označení Samsung Galaxy S4. Tento přístroj byl uveden na trh již v roce 2013 a ve své době stál na špičce v segmentu mobilních telefonů nejenom v modelové řadě výrobce, ale i celého trhu. [35] [36]

Model Galaxy S IV je zařízení, které i v roce 2016 reprezentuje vyšší střední třídu v současnosti prodávaných mobilních telefonů. [37] Přestože od doby svého uvedení představil Samsung již tři další generace nástupců, stále můžeme S4 najít v nabídce některých českých internetových obchodů. [38]

### 2.5.1 Historie mobilního operačního systému Android

Systém Android započal svoji cestu již v roce 2003, kdy byla založena společnost Android Inc. Zakladatelem byl Andy Rubin společně se třemi společníky. Předmětem jejich zájmu byl vývoj softwaru pro mobilní telefony a digitální fotoaparáty. O dva roky později se Android Inc. stává součástí společnosti Google. Celý vývojový tým přechází pod křídla tohoto giganta a šéfem vývoje zůstává Andy Rubin až do roku 2013. [39]

Ještě před oficiálním představením systému veřejnosti se na základě několika zveřejněných patentů spekuluje, zda Google nepracuje na novém operačním systému pro chytré telefony. V roce 2007 se systém představí veřejnosti a dojde k uvolnění prvního *Software Development Kit* (SDK) pro vývojáře. [40]

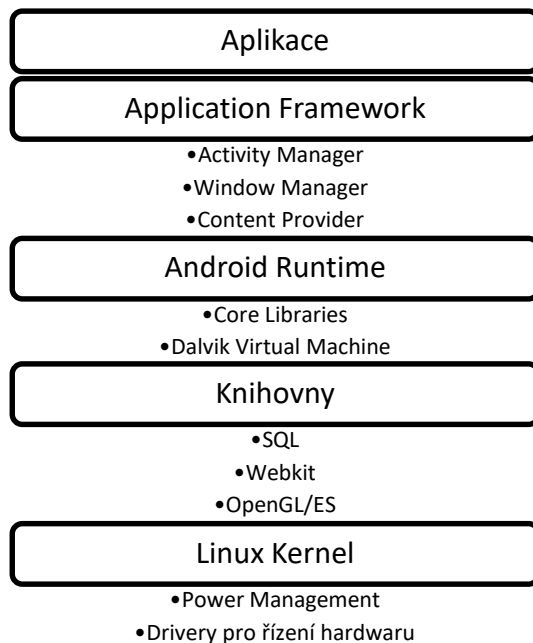
O rok později na trh vstupuje první smartphone od společnosti HTC označený jako *HTC Dream*. Znamější je však brandovaná verze T-Mobile G1. Aktualizace systému na verzi 1.5 jménem *Cupcake* nastartovala zájem o nový systém a sama je někdy označována za první plnohodnotnou verzi systému. [39]

Od té doby již uplynula dlouhá doba a bylo představeno několik zásadních verzí systému. Každá verze nese číselné označení a název. Slovní označení verzí pochází z linuxového světa, kde často další verze je označena názvem začínajícím na následující písmeno abecedy. Číselné označení se mění na základě závažnosti změn systému. Menší změny mění pouze desetinné číslo, kdežto zásadnější a významnější aktualizace zvětší celé číslo. V současnosti je nejnovější verze jménem *Nugat* nesoucí označení 7.0. Představena byla v srpnu 2016 a zatím běží pouze na minimu zařízení. [41]

Trh chytrých mobilních zařízení v dnešní době jasně ovládá Android s velkým náskokem před největším konkurentem iOS od firmy Apple. Za rok 2015 byl podíl ze všech prodaných chytrých zařízení 82,8 % ve prospěch zařízení s Androidem. Zařízení s iOS tvořily pouze 13,9 % všech prodejů. [42]

## 2.5.2 Struktura operačního systému

Open source mobilní operační systém Android je postaven na Linuxovém jádře. Systém lze strukturovat do pěti vrstev, z nichž každá má na starosti část funkcí důležitých pro chod celého operačního systému. [43]



Obrázek 6: Architektura systému Android. Převzato z [27]

Vrstvou nejbliže hardwaru daného zařízení je jádro neboli *kernel*. Toto jádro vychází z linuxového kernelu. Kernel zprostředkovává spolupráci mezi hardwarem zařízením a softwarem, který na něm běží. Do kompetencí vrstvy spadá správa paměti, sítě, zavádění ovladačů nebo například správa procesů. [43]

Další vrstva knihoven rozšiřuje kernel o schopnosti práce s různými součástmi systému, například vykreslování grafiky, přehrávání a akcelerace videa nebo zvuku a další. [43]

Třetí vrstva umožňuje spouštění aplikací napsaných v jazyce Java. Kód napsaný v jazyce Java potřebuje pro správný chod interpretaci kompilaci do *byte* kódu, který poté *Java Virtual Machine* spustí a vykonává. V případě systému Android se virtuální stroj jmenuje Dalvik. Každá spuštěná aplikace má přiřazený vlastní proces a vlastní instanci Dalviku. [44] Stroj Dalvik byl v systému přítomen defaultně až do verze 5.0 označené jako *Lollipop*. Poté byl nahrazen novějším Android Runtime, zkráceně ART. Ten se od Dalviku liší v implementaci jiného kompilátoru, který umožňuje zrychlit spouštění aplikací a snížit spotřebu baterie. [45]

*Application Framework* tvoří čtvrtou a z pohledu vývojáře nejdůležitější vrstvu. Vývojáři ve svých aplikacích využívají funkce a služby této vrstvy pro vytvoření vlastní aplikace. Tato vrstva má také na starosti životní cyklus spuštěné aplikace, práci se soubory nebo například vytváření uživatelského prostředí. [43]

Z pohledu uživatele je nejdůležitější poslední pátá vrstva a to vrstva aplikační. Zde se nachází již hotové aplikace a uživatel si je spouští a obsluhuje. [43] Zabezpečení systému je řešeno tím, že každá aplikace běží s vlastní instancí virtuálního stroje Dalvik nebo ART. Díky tomu by se aplikace neměli vzájemně ovlivňovat. [44]

### 2.5.3 Specifikace měřicího zařízení Samsung Galaxy S IV

Model uvedený při představení byl vybaven chipsetem Exynos 5410 Octa. Ten se skládá z osmijádrové procesorové jednotky CPU a tří jádrové grafické jednotky GPU PowerVR SGX544. CPU je vybaveno 4-mi výkonnými jádry Cortex-A15 taktovaných na 1,6 GHz a 4-mi úspornými jádry Cortex-A7 taktovanými na 1,2 GHz. [46]

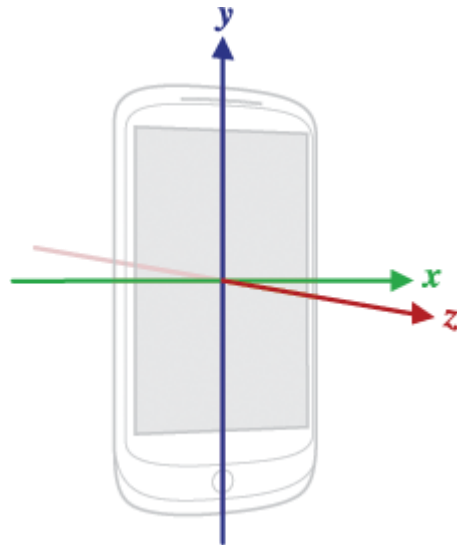
Testovaný model S4 je však o něco novější, představený byl ve třetím kvartálu roku 2013. Hlavní odlišností od předchozí varianty je jiný použitý chipset, který přinesl podporu LTE. Chipsetem je Qualcomm MSM8974 Snapdragon 800. CPU má pouze 4 jádra Krait 400, taktované jsou však na 2,3 GHz. Použitá GPU je Adreno 330 taktovaná na 600 MHz. Výkonově jsou chipsety srovnatelné a velký rozdíl mezi nimi není. Paměť RAM se zastavila na velikosti 2 GB. I v dnešní konkurenci nových modelů má S4 výkonově stále co nabídnout. [35]

Senzorová výbava staršího top modelu výrobce je velice bohatá. Výrobce dal k dispozici uživateli mnoho hardwarových a softwarových senzorů. Z těch fyzických základních jmenujme akcelerometr, gyroskop, magnetometr, senzor světla a méně obvyklé senzory teploty, tlaku, vlhkosti a přiblížení. Softwarové senzory nejsou fyzickými čipy v telefonu, přestože se tak pro uživatele tváří. Jde o algoritmy zpracovávající v reálném čase údaje z fyzických senzorů a poskytující nové a doplňující informace. Mezi tyto senzory patří lineární akcelerace, gravitace, senzor orientace, detektor kroků a krokoměr. [35] [46] [47] Specifikace vybraných senzorů lze nalézt v následujících kapitolách.

### 2.5.4 Lokální a referenční rámec souřadnic v Androidu

Záznam zrychlení, otáčení a magnetického pole probíhá ve třech na sebe kolmých osách. [48] Díky tomu je možné pokrýt celý rozsah pohybu a měřit při jakékoliv orientaci zařízení. Tři měřicí osy pro akcelerometr, gyroskop a magnetometr umožňují 9 stupňů volnosti, neboli *9DOF*. [3]

Prvním systémem souřadnic je uspořádání os vzhledem k přístroji. Termín pro tento systém je lokální rámec souřadnic.

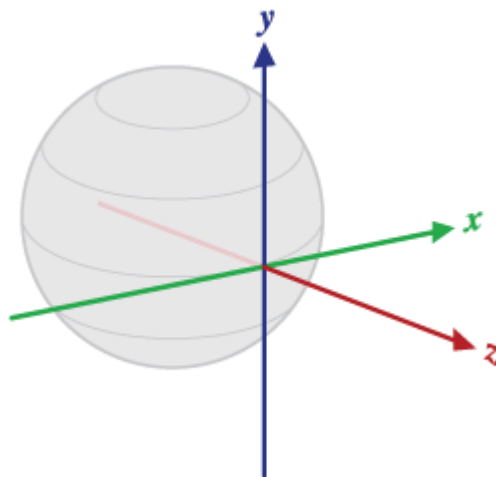


Obrázek 7: Lokální rámec souřadnic. Zarovnání měřicí os vzhledem k přístroji. Převzato z [48]

Každý senzor měří hodnoty vzhledem ke třem uvedeným osám. Hodnoty změřené na ose X se vztahují k pomyslné přímce vedené ze středu k pravé straně přístroje. Hodnoty na ose Y se vztahují k přímce ze středu k horní hraně přístroje a hodnoty na ose Z patří k ose vystupující kolmo z displeje směrem k uživateli. [48]

Gyroskop měří hodnoty úhlové rychlosti na jednotlivých výše popsaných osách tak, že kladná hodnota rotace např. okolo osy X je proti směru hodinových ručiček. Záporný směr rotace okolo měřicí osy znamená rotaci po směru hodinových ručiček. [48]

Dalším systémem, který používá Android a ke kterému vztahuje svoji polohu a orientaci, je systém uspořádání os vzhledem k planetě Zemi. Termínem pro tento systém je referenční rámec souřadnic. [18]



Obrázek 8: Referenční rámec souřadnic. Uspořádání os vzhledem k Zemi. Převzato z [49]

V tomto uspořádání míří osa X na západ, osa Y na sever a osa Z je vertikála vycházející ze středu Země. Tento systém se nazývá podle svého uspořádání ENU, neboli *East-North-Up*. Pokud se zarovnájí osy telefonu se světovými osami a osa Y telefonu ukazuje na sever, Android ukáže hodnotu azimutu  $0^\circ$ . [18]

Několik dalších uspořádání os se používá v technické praxi, ale systém Android pracuje pouze s výše uvedenými systémy souřadnic. Mezi další uspořádání používané například v letecké praxi patří tzv. NED, neboli *North-East-Down*, kdy osa X míří na sever, osa Y na východ a osa Z do středu Země. [49]

Madgwickův orientační filtr, který byl v této práci využit, například využívá tzv. systém NEU neboli *North-East-Up*. [23] Tato skutečnost byla nutná vzít v úvahu při použití s výstupními daty z mobilního telefonu s Androidem. Více o této úpravě v kapitole 2.6.3 a 3.4.2.

## 2.5.5 Akcelerometr, gyroskop a magnetometr

Hardwarové senzory měřící síly ve třech osách v telefonu Galaxy S4 jsou akcelerometr, gyroskop a magnetometr.

V následující tabulce jsou uvedené získané specifikace pomocí aplikací Sensor Kinetics a Phone Tester. [47] Tímto způsobem lze získat základní údaje o použitých senzorech, jako je označení, výrobce, měřící rozsah, minimální zpoždění a spotřeba.

Senzor	Akcelerometr	Gyroskop	Magnetometr
<b>Měřicí rozsah</b>	$\pm 19,613 \text{ m/s}^2$	$\pm 8,727 \text{ rad/s}$	1200 $\mu\text{T}$
<b>Rozlišení</b>	0,001	0,000*	0,06
<b>Min. zpoždění</b>	10 ms	10 ms**	10 ms
<b>Spotřeba</b>	0,250 mA	6,1 mA	6 mA
<b>Označení</b>	STMicroelectronics K330 3-axis Accelerometer	STMicroelectronics K330 Gyroscope Sensor	Yamaha Corporation YAS532 Magnetic Sensor

Tabulka 1: Souhrn specifikací hardwarových senzorů

\* Rozlišení 0,000 u gyroskopu je pravděpodobně chyba v systému. Tento údaj hlásí aplikace od Sensor Kinetics, zatímco druhá aplikace Phone Tester ukazuje stejnou hodnotu jako spotřeba.

\*\* Při měření byl Android schopen dodávat hodnoty přibližně každých 5 ms. Nicméně v 99 % případů šlo vždy o dvě po sobě jdoucí identické hodnoty.

Bohužel se nepodařilo nalézt dokumentaci k senzorům od výrobce STMicroelectronics pro ověření údajů. Dohledat je možné pouze dokumentaci k magnetometru od Yamaha Corporation. [50]

## 2.5.6 Senzor orientace, detektor kroků a tlakoměr

Tyto senzory měří pouze jednu veličinu, a tedy nepatří mezi výše uvedené fyzické tříosé senzory. Jde o senzor orientace, detektor kroků a tlakoměr. Technicky vzato senzor orientace měří ve skutečnosti tři úhly, rotace okolo os X, Y a Z, ale pro potřeby této práce ho můžeme zařadit mezi jednoveličinové senzory, jelikož se zde využívá pouze rotace okolo osy Z. Tento senzor společně s detektorem kroků je softwarový, výrobce telefonu nebo Google implementuje algoritmy zpracovávající fyzické senzory určitým způsobem a výstupem je nový fiktivní senzor. [51]

Senzor orientace poskytuje úhel natočení vůči referenčnímu systému os, tedy Zemi. Tento senzor také měří úhel natočení na všech třech osách, ale pro potřebu tohoto výzkumu byl vzat pouze údaj o jednom úhlu a to azimutu, tedy úhel okolo osy Z zařízení mezi osou Y a magnetickým severem. Jelikož matematicky definovaný kladný směr rotace je proti směru hodinových ručiček, údaj o změřeném úhlu se násobí -1 pro zachování konvence úhlů kompasu, kdy sever má hodnotu 0 °, východ +90 °, jih +90 ° (nebo -180 °) a západ +270 ° (nebo -90 °). Tento údaj slouží jako jednoduchý kompas. Tento senzor vypočítává orientaci na základě sensorové fúze dat z přítomného magnetometru a akcelerometru. [18]

Tlakoměr je hardwarový senzor a měří absolutní tlak okolního prostředí. Vrací hodnotu v milibarech. Více informací v následující tabulce.

<b>Senzor</b>	<b>Orientace</b>	<b>Tlakoměr</b>
<b>Měřicí rozsah</b>	0-360°	0-1013,25 hPa
<b>Rozlišení</b>	Neznámé	1,000
<b>Min. zpoždění</b>	10 ms	180 ms**
<b>Spotřeba</b>	Neznámá	1 mA
<b>Označení</b>	AOSP Sensor.TYPE_ORIE NTATION	STMicroelectronics Barometer Sensor

**Tabulka 2: Souhrn specifikací senzoru orientace a tlakoměru**

\* Tento údaj je výstupem z testovacích aplikací. V praxi však tlakoměr je schopen změřit i vyšší tlaky.

\*\* Maximální vzorkovací frekvence. Z pozorování však vyplývá, že senzor je schopen aktualizovat svoji hodnotu pouze s frekvencí 1 Hz. Více v kapitole 3.3 s analýzou výstupních dat senzorů.

Detektor kroků je opět softwarovým senzorem, který vychází z analýzy a zpracování dat z akcelerometru. Součástí systému Android je od verze KitKat 4.4. Implementace senzoru vrátí hodnotu 1,0 společně s časovým razítkem vždy, když je detekován jeden uživatelův krok. Zpoždění detekce kroku by mělo být pod 2 s. [48] Existuje ještě alternativa, kterou je také softwarový senzor krokoměr neboli *Step Counter*. Ten vrací součet kroků za určité časové období. [52]



## 2.6 Senzorová fúze

Jednou z možností zvýšení přesnosti či spolehlivosti měření je proces spojení informací z více zdrojů. Jde zároveň o efektivnější přístup než zvýšení počtu a různorodosti samotných zdrojů informací. [53]

Senzorová fúze je proces kombinování dat ze stejných či různých senzorů způsobem, kdy výsledná informace má v jistém smyslu „lepší“ hodnotu, kterou není možné získat pomocí jednotlivých senzorů. Pojem „lepší hodnota“ může znamenat přesnější, spolehlivější či srozumitelnější údaj. [54]

Dalším pojmem, se kterým se lze setkat, je informační fúze. Tento rozšiřující pojem v sobě zahrnuje i jiné zdroje informací než samotné senzory. Jako zdroj doplňujících informací může použít databáze, uživatelův vstup a jiné. V této práci se však bude operovat s pojmem sensorové fúze, jelikož primárním a jediným zdrojem informací během fúze budou samotné senzory. [54]

Výhody implementace sensorové fúze jsou následující. [54]

- Robustnost a spolehlivost
  - Více senzorů a jejich větší rozmanitost zajišťuje fungování systému i při výpadku jednotlivých senzorů.
- Rozšířené prostorové a časové pokrytí
  - Jeden senzor může pokrýt prostor tam, kde ostatní nemůžou nebo je schopen měřit, když ostatní nemůžou.
- Zvýšení věrohodnosti
  - Měření jednoho senzoru se potvrdí jiným senzorem měřícím stejnou nebo podobnou oblast.
- Snížení nejistoty a nepřesnosti
  - Spojená informace z různých zdrojů sníží nejednoznačnost a nejistotu měření dané veličiny.
- Odolnost proti rušení
  - Více druhů senzorů měřících stejnou veličinu či stejnou oblast lépe odolává případnému rušení.
- Zvýšení přesnosti
  - Více nezávislých měření stejné veličiny umožní zvýšit přesnost měření a odhad měření je tedy přesnější a s menší nejistotou než jednotlivá individuální měření.

Senzorová nebo informační fúze lze implementovat a provádět ve třech úrovních. [54]

- *Low-level* (nejnižší úroveň)
  - Pracuje se surovými nebo předfiltrovanými daty z informačních zdrojů a výstupním produktem jsou nová data, která budou mít hodnotnější informaci než původní vstupy.
- *Intermediate-level* (střední úroveň)
  - Vstupem jsou již předzpracovaná data, jako například detekované hrany nebo pozice, a produktem opět nová hodnotnější informace.
- *High-level* (nejvyšší úroveň)
  - Provádí rozhodování nad vstupními daty. Metody rozhodování mohou být založené například na váhování vstupů, fuzzy logice či statistice.

Implementace sensorové fúze lze provádět mnoha způsoby. V této práci je použita *low-level* fúze, tedy nejnižší úroveň práce se surovými daty. Na této úrovni existuje několik způsobů implementace, komplementární filtr, Kalmanův filtr a Madgwickův orientační filtr. [54] [23]

### 2.6.1 Komplementární filtr

Komplementární filtr využívá skutečnosti, že výstup dvou různých sensorů je vzájemně nezávislý. Měření jednoho neovlivňuje měřenou hodnotu druhého. Jelikož však měří stejnou veličinu, lze je kombinovat pro výslednou větší přesnost a reálnější obraz skutečnosti. [54]

Vhodně navržený filtr umožňuje využít charakteristiky fúzovaných sensorů a zohlednit jejich silné stránky a přitom vzájemně kompenzovat ty slabé. Například jeden typ senzoru může mít dobrou schopnost měřit v krátkodobém horizontu s vysokou přesností, avšak v dlouhodobém horizontu přesnost měření klesá a roste odchylka od skutečné hodnoty. Druhý typ senzoru naopak krátkodobě měří s nízkou přesností, avšak je dlouhodobě stabilní. [55]

Komplementární filtr umožňuje sloučit tyto dva typy sensorů, kdy fúzuje krátkodobou přesnost prvního typu a dlouhodobou stálost druhého typu. Příkladem použitým i v této práci je fúze určení orientace v horizontální rovině pomocí gyroskopu a magnetometru. Příkladem dalšího použití může být fúze dvou sensorů stejného typu měřící stejnou veličinu, ale zatížených různými typy rušení. [55]

$$d_i = \alpha * x_i + (1 - \alpha) * y_i \quad (15)$$

Rovnice popisuje princip implementace sensorové fúze pomocí komplementárního filtru. Vylepšená hodnota  $d_i$  vznikne součtem vstupních dat  $x_i$  a  $y_i$  vynásobených koeficientem  $\alpha$ . [55]

Způsob nastavení koeficientu  $\alpha$  se liší dle použité aplikace. Například dochází-li k fúzi dvou sensorů, z nichž jeden prochází dolní propustí a druhý naopak horní, lze  $\alpha$  definovat následovně. [55]

$$\alpha = \frac{\frac{T}{\Delta t}}{(1 + \frac{T}{\Delta t})} \quad (16)$$

Kde  $T$  určuje mezní frekvenci dolní a horní propusti. Koeficient  $\alpha$  se však v praxi často nastavuje a ladí odhadem nad konkrétními vstupními daty a u konkrétní aplikace. [55]

### 2.6.2 Kalmanův filtr

Tento filtr je soubor rovnic poskytujících efektivní prostředek pro odhadnutí stavů procesu způsobem, který minimalizuje střední kvadratickou chybu. Implementace filtru je velmi efektivní v tom, že dokáže odhadovat stav procesu v minulosti, přítomnosti i v budoucnosti. Umožňuje filtrovat zašuměné signály v časové oblasti bez nutnosti použití Fourierovy transformace. [56]

Kalmanův filtr pro svoji práci bere v úvahu šumové charakteristiky vstupu a výstupu pomocí kovariančních matic. Tyto matice se v každém vzorku aktualizují. Jde tedy o dynamický a relativně složitý systém rovnic. Avšak pokud by kovarianční matice byly v čase konstantní, došlo by k významnému zjednodušení výpočtů. [55]

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (17)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (18)$$

Stavový vektor  $x_k$  je výstup Kalmanova filtru, řídicí vektor  $u_{k-1}$  a měřící vektor  $z_k$  jsou naopak vstupy. Proměnné  $w_{k-1}$  a  $v_k$  reprezentují šum procesu a šum měření. Předpokládá se, že jsou na sobě nezávislé a s normálním rozložením pravděpodobnosti. [55]

Předpokládejme konstantní rozložení kovariančních matic. Předpoklad platí pro jednoduché systémy, kde nepředpokládáme rychlé změny šumových charakteristik vstupních senzorů. Tento předpoklad zjednoduší výsledné rovnice. [56]

$$\hat{x}_k^- = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (19)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (20)$$

Proměnná  $K$  je tzv. Kalmanův zisk. Tato proměnná, v případě že kovarianční matice budou konstantní, se také po spuštění rychle stabilizuje a zůstane dále konstantní.  $\hat{x}_k^-$  je předpovězená hodnota stavového vektoru a proměnná  $\hat{x}_k$  je aktualizovaný odhad stavového vektoru. [56]

Pokud Kalmanův filtr pracuje s konstantními kovariantními maticemi a je 1. řádu, tedy nepočítá odhad odchylky (*drift estimation*), pak je jeho výsledná implementace velmi podobná komplementárnímu filtru. [55]

### 2.6.3 Madgwickův orientační filtr

Tento filtr je zaměřený výhradně pro sensorovou fúzi na určení orientace v IMU nebo MARG jednotkách. Implementace pro MARG jednotky obsahuje kompenzaci střední hodnoty měření gyroskopu a zkruslení magnetického pole. [23]

Koncept Madwickova orientačního filtru je založen na reprezentaci dat z akcelerometru a gyroskopu pomocí quaternionů. Tato reprezentace dovoluje použití *gradient-descent* algoritmu pro vypočtení směru chyby gyroskopu. Použití quaternionů pro orientaci také eliminuje vznik nebezpečných singularit jako je *Gimbal Lock*. [23]

Rozdíl ve filozofii Madgwickova a Kalmanova filtru spočívá v určení chyby měření. Kalmanův filtr pro určení této chyby využívá aktualizovaný odhad stavu, kdežto Madgwickův filtr používá předchozí hodnotu určení stavu. [55]

Výhody oproti Kalmanovu filtru spočívají v efektivitě i při nízkých vzorkovacích frekvencích a nižší výpočetní náročnosti. [23]

Pokud v referenčním rámci známe směr působení určitého pole, pak změřené hodnoty v lokálním rámci umožní spočítat orientaci lokálního rámce vůči tomuto poli. Pro dané změřené hodnoty však není možné určit unikátní orientaci lokálního rámce. Existuje nekonečně mnoho orientací lokálního rámce, kterých lze dosáhnout rotací okolo souběžné osy rovné směru pole v referenčním rámci. Řešení pomocí quaternionů však vyžaduje nalezení jednoho řešení tohoto problému. [23] Pro nalezení tohoto řešení je nutné vyřešit následující rovnice.

$$\min_{\substack{L\hat{q} \in \mathbb{R}^4 \\ R\hat{q} \in \mathbb{R}^4}} f(L\hat{q}, R\hat{d}, L\hat{s}) \quad (21)$$

$$f({}^L_R\hat{q}, {}^R\hat{d}, {}^L\hat{s}) = {}^L_R\hat{q}^* \otimes {}^R\hat{d} \otimes {}^L_R\hat{q} - {}^L\hat{s} \quad (22)$$

$${}^L_R\hat{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4] \quad (23)$$

$${}^R\hat{d} = [0 \ d_x \ d_y \ d_z] \quad (24)$$

$${}^L\hat{s} = [0 \ s_x \ s_y \ s_z] \quad (25)$$

Kde  ${}^L_R\hat{q}$  značí orientaci lokálního rámce, senzoru, v referenčním rámci, Zemi a systému os ENU. Vektor  ${}^R\hat{d}$  určuje směr daného pole v referenčním rámci,  ${}^L\hat{s}$  označuje změřené hodnoty pole v lokálním rámci na senzoru. Minimum nalezené pomocí funkce  $f$  vrátí jedinečnou hodnotu quaternionu  ${}^L_R\hat{q}$  popisujícího rotaci senzoru vůči referenčnímu rámci. [23] Následující rovnice popisují *gradient-descent* algoritmus pro nalezení směru působení pole a řešení Jakobiánu funkce  $f$ .

$$\nabla f({}^L_R\hat{q}_k, {}^R\hat{d}, {}^L\hat{s}) = J^T({}^L_R\hat{q}_k, {}^R\hat{d}) f({}^L_R\hat{q}_k, {}^R\hat{d}, {}^L\hat{s}) \quad (26)$$

$$f({}^L_R\hat{q}_k, {}^R\hat{d}, {}^L\hat{s}) = \begin{bmatrix} 2d_x \left( \frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2 \right) + 2d_y(q_1q_4 + q_2q_3) + 2d_z(q_2q_4 - q_1q_3) - s_x \\ 2d_x(q_2q_3 - q_1q_4) + 2d_y \left( \frac{1}{2} - q_2^2 - q_4^2 \right) + 2d_z(q_1q_2 + q_3q_4) - s_y \\ 2d_x(q_1q_3 + q_2q_4) + 2d_y(q_3q_4 - q_1q_2) + 2d_z \left( \frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2 \right) - s_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$(28)$$

$$J({}^L_R\hat{q}_k, {}^R\hat{d}) = \begin{bmatrix} 2d_yq_4 - 2d_zq_3 & 2d_yq_3 + 2d_zq_4 & -4d_xq_3 + 2d_yq_2 - 2d_zq_1 & -4d_xq_4 + 2d_yq_1 + 2d_zq_2 \\ -2d_xq_4 + 2d_zq_2 & 2d_xq_3 - 4d_yq_2 + 2d_zq_1 & 2d_xq_2 + 2d_zq_4 & -2d_xq_1 - 4d_yq_4 + 2d_zq_3 \\ 2d_xq_3 - 2d_yq_2 & 2d_xq_4 - 2d_yq_1 - 4d_zq_2 & 2d_xq_1 + 2d_yq_4 - 4d_zq_3 & 2d_xq_2 + 2d_yq_3 \end{bmatrix}$$

$$(29)$$

Pokud víme, že dané pole má v referenčním rámci pouze 1 nebo 2 složky, dojde ke zjednodušení rovnic celého *gradient-descent* algoritmu. Například gravitační pole  ${}^R\hat{g}$  bude obsahovat pouze složku na vertikální ose Z. Tím dojde ke zjednodušení funkce  $f$  i Jakobiánu  $J$ . Druhé zjednodušení dostaneme pro pole magnetické  ${}^R\hat{b}$ . To obsahuje pouze vertikální a horizontální složku. [23]

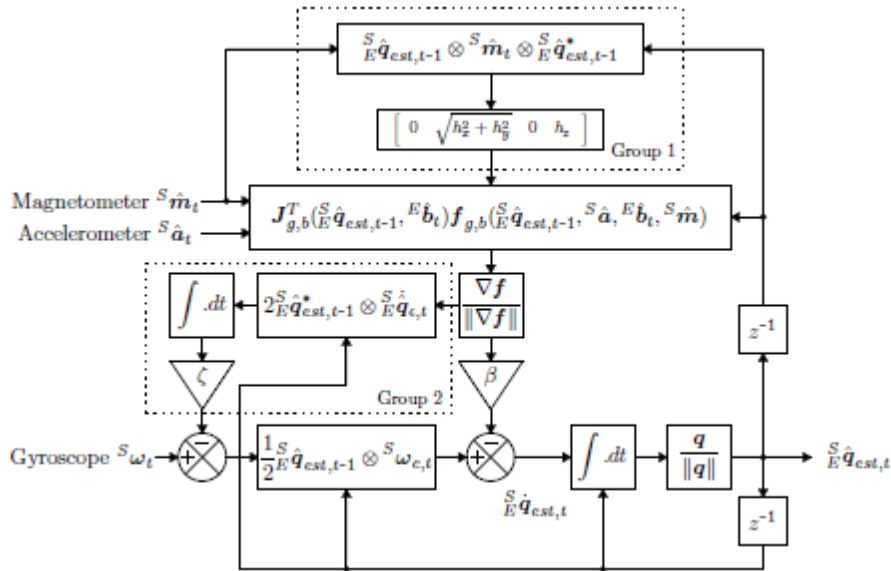
$${}^R\hat{g} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (30)$$

$${}^R\hat{b} = [0 \ b_x \ 0 \ b_z] \quad (31)$$

${}^R\hat{g}$  reprezentuje směr gravitačního pole v referenčním rámci, tedy na Zemi.  ${}^R\hat{b}$  reprezentuje složky magnetického pole Země. Pro správnou spolupráci s daty z měřícího zařízení bylo nutné provést změnu v tomto parametru a *gradient-descent* algoritmu pro toto pole. Jelikož na magnetický sever ukazuje osa Y v případě systému Android, bylo nutné provést náhradu reprezentace pole (31) za reprezentaci (32).

$${}^R\hat{b}_A = [0 \ 0 \ b_y \ b_z] \quad (32)$$

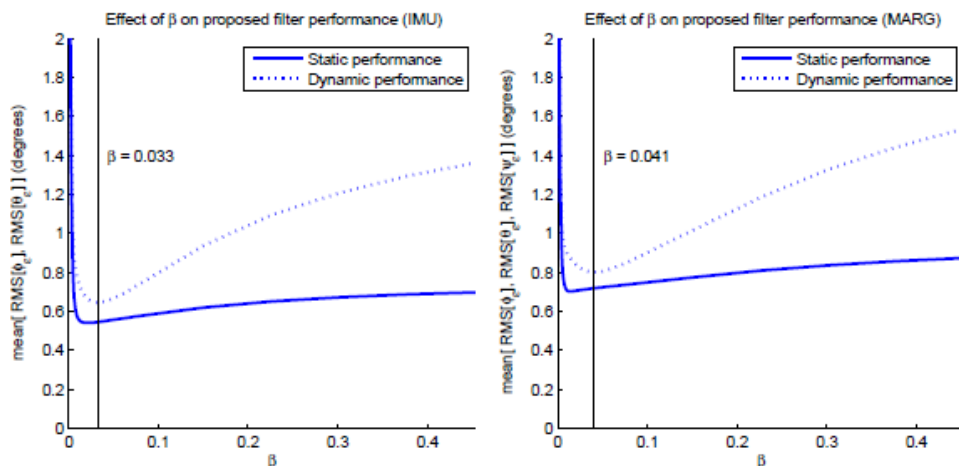
Kompletní schéma implementace Madgwickova orientačního filtru pro MARG jednotku je uvedené níže. Vstupem jsou data změřená senzorem v lokálním rámci pomocí akcelerometru, magnetometru a gyroskopu. Výstupem je odhad orientace lokálního rámce vůči rámci referenčnímu. Výstupní orientace má opět podobu quaternionu. Skupina označená jako *Group 1* pomocí zpětnovazební smyčky kompenzuje zkreslení naměřeného magnetického pole. Skupina označená jako *Group 2* pomocí zpětnovazební smyčky kompenzuje drift měřených hodnot gyroskopem. [23]



Obrázek 9: Schéma fungování Madgwickova orientačního filtru. Převzato z [23]

Chyby v měření gyroskopu mohou být ovlivněny šumem, aliasingem signálu, kvantizační chybou, chybnou kalibrací, chybným fyzickým uspořádáním senzoru při umístění, neortogonalita měřících os gyroskopu a frekvenční charakteristikou. Tyto zdroje se kompenzují pomocí parametrů zisku filtru  $\beta$  a  $\zeta$ . Zisk  $\beta$  reprezentuje střední hodnotu chyby od skutečné hodnoty, zisk  $\zeta$  reprezentuje chybu měření, kdy senzor nepodléhá rotaci a měřenou hodnotou by měla být nula. [23]

Zisk filtru  $\beta$  ovlivňuje přesnost a odezvu určení orientace. Příliš nízká hodnota parametru způsobuje velkou chybu vlivem integrálu a driftu orientace a zároveň nízkou odezvu filtru, kdežto příliš vysoká hodnota přinese rychlou odezvu filtru avšak za cenu vnesení nechtěného šumu v určení orientace. [23] Dle [23] je tedy ideální nastavení pro IMU jednotku  $\beta = 0.033$  a pro MARG jednotku  $\beta = 0.041$ .



Obrázek 107: Graf závislosti směrodatné odchylky určení správné orientace na parametru  $\beta$ . Převzato z [23]

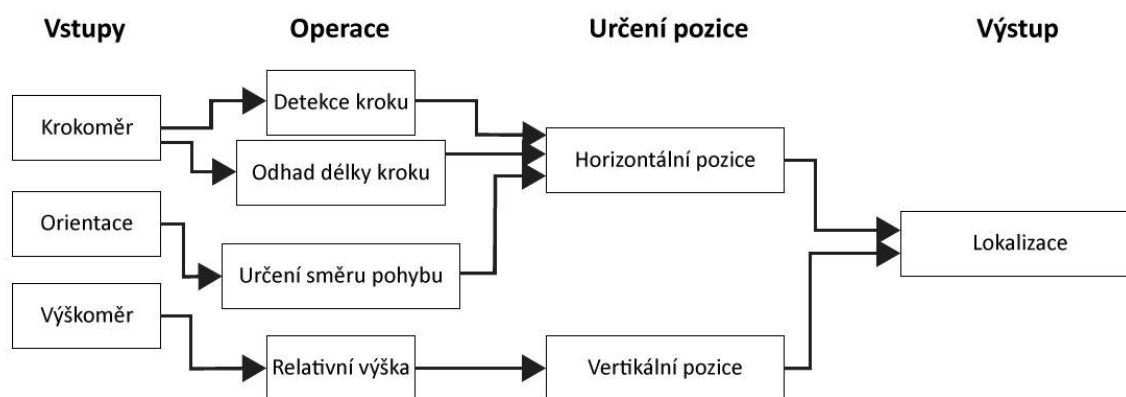
### 3 Praktická část

V této kapitole jsou popsány praktické výsledky diplomové práce a popis její realizace. V této části lze nalézt popis architektury navrženého lokalizačního systému, principy fungování systému a popis dvou na sobě nezávislých realizovaných architektur. Dále se zde nachází popis použité aplikace pro sběr dat a charakteristika použitých senzorů a naměřených dat. V dalších částech je rozebrána implementace jednotlivých částí lokalizačního systému a jejich vzájemné porovnání či porovnání s externími komerčními systémy. V závěru této kapitoly se nacházejí podrobně rozebrané tři testovací trasy – interiér budovy Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze, exteriér v Podolí a kombinace trasy exteriér-interiér Sokolu na Vinohradech.

#### 3.1 Architektura lokalizačního systému pro pohyb chodce uvnitř i vně budov

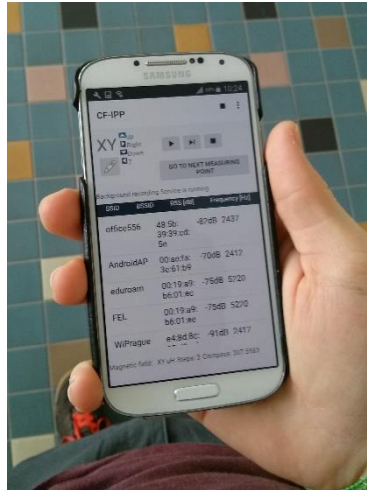
Navržený lokalizační systém využívá techniku lokalizace pomocí *Dead reckoning* a inerciální navigace. Vstupem lokalizačního systému jsou data z měřicího zařízení Samsung Galaxy S4 z implementovaných senzorů. Lokalizační systém funguje na určení relativní pozice uživatele vůči počátečnímu bodu. Relativní trasa zaznamenaného pohybu je však vyhodnocována vzhledem k referenčnímu rámci, kterým je systém souřadnic ENU, kdy osa X míří na východ, osa Y na magnetický sever a osa Z míří vertikálně směrem od středu Země. Zaznamenaná trasa je tedy v souladu s absolutní orientací, pouze není známá výchozí pozice uživatele na Zemi. Absolutní určení uživatele pro pohyb v interiérech resp. v budovách i exteriérech bude předmětem dalšího výzkumu.

Architektura navrženého systému se skládá ze čtyř skupin funkčních bloků – vstupů, operací, lokalizace a výstupu. Jako vstupem systému slouží funkce Krokoměr, Orientace a Výškoměr. Mezi prováděné operace nad vstupními daty patří funkce Detekce kroku, Odhad délky kroku, Určení směru pohybu a Relativní výška. V bloku lokalizace dochází k určení pozice v Horizontální a Vertikální funkci. Výstupní blok poté pomocí funkce Lokalizace určí pozici uživatele v prostoru.



Obrázek 11: Schéma navrženého lokalizačního algoritmu

Systém je navržen pro lokalizaci a pohyb chodce s mobilním zařízením drženém v ruce před tělem. Horní hrana zařízení, tedy osa Y, míří ve směru pohybu chodce. Jde o standardní držení zařízení v případech, kdy se uživatel pohybuje například podle mapy zobrazené na displeji mobilního zařízení. Systém nepočítá s případy jiného držení zařízení či umístěním zařízení do kapsy nebo tašky, kdy osa Y může mířit jiným směrem než je směr pohybu chodce.



**Obrázek 12: Poloha zařízení během měření**

V této práci se nachází implementace dvou na sobě nezávislých lokalizačních systémů. První systém využívá softwarovou implementaci vybraných senzorů ze systému Android a je označen jako „Systém A“. Druhý systém naopak využívá surová data z hardwarových senzorů, která poté zpracuje a je označen jako „Systém B“.

### 3.1.1 Popis fungování systému

Vstupy lokalizačního algoritmu tvoří funkce Krokoměr, Orientace a Výškoměr. Funkce Krokoměr má na starosti detekci jednotlivých kroků z měřených dat akcelerometru. Funkce Orientace se používá pro určení orientace zařízení v prostoru, a tedy určení směru pohybu. Výškoměr zaznamenává data z interního tlakoměru a vyhodnocuje změnu výšky ze změn měřeného atmosférického tlaku.

#### Určení orientace zařízení

Pro správnou funkčnost systému je zásadní správné určení orientace zařízení vzhledem k referenčnímu rámci. V případě chybného určení dojde k odchýlení lokalizace uživatele od skutečné pozice.

Dokážeme-li určit správnou orientaci zařízení v prostoru, pak můžeme rozpoznat správný směr pohybu uživatele prostorem. Omezení korektní funkčnosti pouze pro pohyb uživatele se zařízením v ruce před tělem umožňuje jednoduché určení směru pohybu. Směr pohybu je totiž přímo měřen fyzickou orientací osy Y mobilního zařízení. Hledaný směr pohybu je tak dán horizontálním úhlem mezi osou Y zařízení a magnetickým severem. Určený úhel se nachází v horizontální rovině a nazývá se azimut. Jde o stejný úhel měřený pomocí fyzického kompasu.

Záznam azimutu probíhá kontinuálně v čase od začátku měření. Úhel rovný  $0^\circ$  znamená, že měřicí osa Y zařízení míří přesně na magnetický sever Země. Tradiční rozsah hodnot azimutu vychází z fyzického kompasu a je  $0 - 359^\circ$ . Úhel rovný  $90^\circ$  znamená, že osa Y míří na východ,  $180^\circ$  osa míří na jih a  $270^\circ$  osa míří na západ. Druhou možnou definicí je rozsah azimutu v rozmezí  $-180^\circ$  až  $+180^\circ$ . První rozsah používá kompas systému Android, zatímco druhý rozsah je výstupem Madgwickova orientačního filtru. Rozdílně definované rozsahy nemají vliv na práci goniometrických funkcí použitých pro určení pozice.

## Detekce kroků

Dalším důležitým stavebním prvkem lokalizačního systému je funkce Detekce kroků. Fungování tohoto funkčního bloku spočívá v analýze signálu z akcelerometru. V případě, že dojde k detekci kroku, zaznamená se čas vzniku události a značka detekovaného kroku. Záznam tak obsahuje časovou značku události a detekovaný krok reprezentovaný konstantou 1.

Záznam detekovaných kroků se poté použije pro jejich analýzu. Analyzuje se délka intervalu mezi jednotlivými kroky, jejich střední hodnota a rozptyl. Převrácená hodnota intervalu mezi dvojicí kroků říká, s jakou frekvencí byl krok učiněn. Určení frekvence je důležité pro fungování dalšího funkčního bloku algoritmu, a to pro správné určení délky kroku.

## Vyhodnocení délky kroku

Pro správné určení pozice uživatele v horizontální rovině na základě orientace a detekovaných kroků je nutné, aby detekované kroky měly odpovídající uraženou vzdálenost. To má na starosti tento funkční blok. Na základě frekvence jednotlivých kroků a nastavení dvou parametrů charakterizujících chůzi uživatele dochází k odhadu vzdálenosti jednotlivých kroků. Podrobné algoritmy a popis bloku lze nalézt v kapitole 3.6.

Se znalostí délky kroků, časové značky detekovaného kroku a orientace zařízení v daném okamžiku můžeme rekonstruovat pohyb chodce v horizontální rovině.

## Určení relativní výšky

Chceme-li znát pozici uživatele ve 3D prostoru nestačí nám pouze složka v horizontální rovině, ale potřebujeme znát i složku vertikální. Pro tento účel se hodí využít senzor atmosférického tlaku implementovaného v mobilním zařízení. Toto určení výšky pomocí sledování atmosférického tlaku se používá v amatérském i profesionálním letectví.

Tento lokalizační systém používá určení počáteční výšky pomocí průměru z prvních 15 změřených hodnot. Tato hodnota atmosférického tlaku se nastaví jako tlak na výchozí pozici. Další změny tlaku se již vyhodnocují jako změny výšky a dochází k určení relativní vertikální souřadnice uživatele.

Podrobný popis fungování lze nalézt v kapitole 3.7.

### 3.1.2 Sběr a vyhodnocení dat

Navržený lokalizační algoritmus není implementován v aplikaci pro běh v reálném čase. Pro potřeby testování je vhodnější nejdříve provést sběr dat a až poté provádět vyhodnocení. První fází je tedy samotný sběr dat v dané lokaci (*onsite* fáze). Druhou fází je vyhodnocení dat na PC pomocí matematického softwaru Matlab [57] (*offsite* fáze).

## Měření a sběr dat

*Onsite* fáze slouží ke sběru dat o pohybu uživatele v dané lokaci. Uživatel spustí záznamovou aplikaci a zaujme měřící pozici. Po začátku záznamu uživatel chvíli počká než skončí inicializační fáze. V této fázi aplikace sbírá inicializační vzorky pro určení počátečních podmínek. Poté se může uživatel dát do pohybu. Inicializační prodleva by měla trvat od 1 do 5 vteřin.



Během sběru dat se uživatel prochází prostředím a zařízení drží v měřicí pozici. Po absolvování trasy uživatel ukončí záznam a dojde k uložení naměřených hodnot do paměti zařízení. Tyto data jsou uložena ve formě textových souborů. Tím *onsite* fáze končí.

## Vyhodnocení dat

*Offsite* fáze slouží k vyhodnocení dat a aplikování lokalizačního algoritmu. Tím, že tento algoritmus není implementován přímo do měřicího zařízení a neběží v reálném čase, dosáhneme větší flexibility při návrhu, testování a vyhodnocování samotného algoritmu.

Vyhodnocení probíhá na PC v prostředí matematického softwaru Matlab. Textové soubory s naměřenými hodnotami se zkopírují z paměti mobilního zařízení do pracovní složky v PC. V této pracovní složce se nachází open-source knihovna k Madwickova orientačnímu filtru. Tato knihovna obsahuje implementaci výpočtu orientace a také knihovnu pro práci s quaterniony. Madwickův skript pro odhad orientace bylo nutné upravit pro systém souřadnic používaného systémem Android. Více o této a další úpravě v kapitole 2.6.3 a 3.4.2.

Ve spouštěcím skriptu se nastaví, jaké měření se má analyzovat a zda jde o záznam chůze, nebo statické měření. Skript provede základní analýzu vstupních dat a případnou filtraci. Po analýze skript provede sladění časových známek změřených vzorků, jelikož systém Android nesbírá všechny hodnoty ze senzorů v jeden časový okamžik. Rozdíly ve čtení jednotlivých senzorů jsou v řádech jednotek milisekund.

Poté skript vypočítá orientaci pomocí Madwickova filtru, provede vlastní detekci kroků, odhadne jejich délky a vypočítá změřenou trasu v prostoru.

### 3.1.3 Lokalizační systémy

#### System A

Pro určení orientace využívá systém A senzorové fúze pomocí komplementárního filtru pro sloučení výstupních dat z kompasu a gyroskopu. Data kompasu poskytuje softwarový senzor „Sensor.TYPE\_ORIENTATION“ implementovaný v systému Android. Tento senzor vypočítává data na základě vlastní senzorové fúze z fyzických senzorů, z akcelerometru a magnetometru. Tato výstupní data slouží pro určení absolutní orientace zařízení a ke korekci časové degradace orientace z gyroskopu. Tento kompas dodává kvalitní data v dlouhodobém horizontu, avšak má méně přesný záznam rychlých rotací a také je ovlivňován nehomogenitami magnetického pole. Gyroskop naopak poskytuje kvalitní data v krátkodobém horizontu a zajišťuje rychlou a přesnou odezvu na pohyb za cenu rostoucí degradace odhadu orientace v čase.

Senzorová fúze pomocí komplementárního filtru umožňuje využití rychlých a přesných reakcí gyroskopu a dlouhodobé stability orientace z kompasu. Touto kombinací lze kombinovat výhody z obou senzorů a zároveň kompenzovat jejich nepřesnosti.

Kompas umožňuje měřit orientaci zařízení vzhledem k referenčnímu rámci, tedy Zemi. Výstupní hodnota tohoto senzoru je azimut určující úhel mezi osou Y měřicího zařízení a magnetickým severem. Azimut v tomto případě slouží jako vstupní hodnota orientace pro lokalizaci. Získaný úhel se nachází v rozsahu 0 – 359 °.

Gyroskop měří úhlové zrychlení, jehož integrací lze ze známých počátečních podmínek vypočítat orientaci zařízení v prostoru. Sensorová fúze těchto dvou orientací se provede podle následujícího vzorce.

$$\theta_{est} = \alpha * (\theta_{est-1} + \omega\Delta t) + (1 - \alpha) * \theta_{compass} \quad (33)$$

Kde  $\theta_{est}$  je výsledné určení azimutu zařízení. Vstupy jsou integrovaná orientace z gyroskopu ( $\theta_{est-1} + \omega\Delta t$ ) a azimut z kompasu  $\theta_{compass}$ . Parametr  $\alpha$  definuje poměr fúze dvou předcházejících úhlů pro zajištění vysoké přesnosti, rychlosti a stability. Parametr  $\alpha$  je proměnná, která se nastavuje na základě analýzy aktuálního průběhu orientací z gyroskopu a kompasu.

Dále Systém A využívá softwarovou implementaci detektoru kroků, konkrétně „Sensor.TYPE\_STEP\_DETECTOR“. V případě, že dojde k detekci kroku uživatele, je výstupem tohoto senzoru časová značka události a konstanta 1. V případě, že žádný krok nebyl rozpoznán, sensor nedává žádný výstup. Ze záznamu tohoto detektoru kroků se poté v *offsite* fázi analyzuje a odhaduje délka jednotlivých kroků.

Funkce relativního výškoměru je dosaženo pomocí měření změn atmosférického tlaku od výchozí pozice. Senzor pro odhad výšky se používá stejný i v případě Systému B.

## System B

Tento systém využívá jiný přístup než systém A. Vstupními daty jsou pouze hardwarové senzory, nad kterými se provádí vlastní sensorová fúze. Algoritmem pro fúzi je v tomto případě Madgwickův orientační filtr, který používá jako vstupy data z akcelerometru, magnetometru a gyroskopu. Dalším základním kamenem tohoto systému je implementovaný vlastní detektor kroků provádějící analýzu dat z akcelerometru.

Madgwickův filtr umožňuje získání orientace senzoru v prostoru vůči referenčnímu rámci. Z této orientace lze poté určit horizontální úhel mezi osou Y zařízení a magnetickým severem neboli azimut. Získaný úhel se nachází v rozsahu  $-180^\circ$  až  $+180^\circ$ . Rozdíl hodnot oproti rozsahu azimutu ze Systému A není fakticky žádný, oba rozsahy pokrývají hledaný prostor a při použití goniometrických funkcí vrací identické výsledky.

Detekce kroků v tomto systému probíhá také až v *offsite* fázi. Po určení orientace v prostoru se transformuje měření z akcelerometru do referenčního rámce a na takto získaných datech se provede detekce kroků. Dále se poté provede odhad délky jednotlivých kroků.

Odhad relativní výšky pomocí tlakoměru je stejný jako v případě Systému A, v tomto bodě se systémy neliší.

## 3.2 Aplikace pro záznam dat z mobilního terminálu se systémem Android

Měřicí aplikace byla vytvořena pro sběr a záznam hodnot z následujících senzorů a zdrojů: akcelerometr, gyroskop, magnetometr, tlakoměr, kompas, krokoměr a skenování dostupných WiFi sítí. Zaznamenané hodnoty WiFi sítí nebyly v této práci využity.

Jelikož měřicí zařízení opatřené za účelem této diplomové práce po obdržení obsahovalo verzi systému Android 4.4 *KitKat*, vývoj aplikace proběhl pro tuto verzi (API 19). Funkčnost aplikace byla ověřena i po upgradu zařízení na vyšší verzi Androidu 5.0 *Lollipop*.

Vývoj aplikace proběhl pomocí jazyka Java a vývojového prostředí Android Studio.

### 3.2.1 Struktura a princip fungování aplikace

Architektura aplikace je velice jednoduchá. Po spuštění aplikace se načte hlavní měřící obrazovka (*Main Activity*). Na této obrazovce se ovládá aktuální měření a zobrazují se aktuální změřené hodnoty. Pro zahájení měření se spustí služba na pozadí (*Service*), která má na starosti samotný sběr dat. Důvod, proč sběr dat neprovádí *Main Activity*, je nasnadě, *Service* běží na pozadí a může provádět záznam i pokud uživatel používá jinou aplikaci. Záznam dat probíhá na pozadí nerušeně dál bez omezování uživatele.

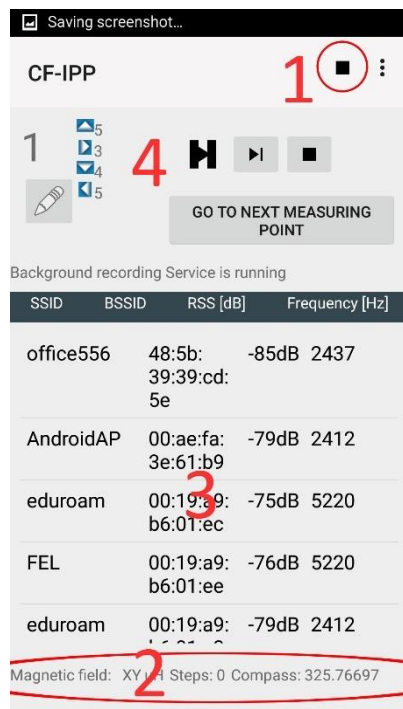
Po spuštění měření se v paměti zařízení vytvoří složka s textovými soubory formátu csv a pojmenované ve tvaru „YYYY-MM-DD--HH-MM-SS-SENSORNAME.csv“, kde YYYY značí rok, první MM číslo měsíce, DD den, HH hodinu, druhé MM minuty a SS sekundy, kdy došlo ke spuštění měření. Proměnná SENSORNAME je závislá od typu senzoru, který do souboru zapisuje své hodnoty.

Zápis hodnot do souborů probíhá kontinuálně během měření. To umožňuje menší využití paměti RAM zařízení a zároveň získání většiny hodnot i při pádu aplikace. Po ukončení měření dojde k zápisu posledních vzorků čekajících na naplnění zásobníků a uzavření souborů.

Pro analýzu měření v *offsite* fázi stačí připojit telefon k PC a zkopírovat soubory s naměřenými hodnotami do pracovní složky.

### 3.2.2 Popis měřící aplikace

V této části se nachází popis uživatelského rozhraní hlavní obrazovky záznamové aplikace.



- 1) Spuštění a ukončení sběru hodnot. Spouští měřící službu na pozadí.
- 2) Informuje o naměřených hodnotách magnetického pole, detekovaných kroků a azimutu kompasu.
- 3) Neseřazený seznam detekovaných okolních WiFi sítí
- 4) Ovládání záznamu sběru a kategorizace WiFi vzorků pro lokalizaci pomocí WiFi sítí. V tomto lokalizačním systému nevyužito.

V této práci je nejdůležitější tlačítko spouštějící a ukončující záznam dat ze senzorů. Funkcionalita sběru WiFi vzorků není v tomto výzkumu využita, protože navržený lokalizační systém je založen výhradně na technice *Dead reckoning*.

Obrázek 13: Snímek obrazovky z měřící aplikace

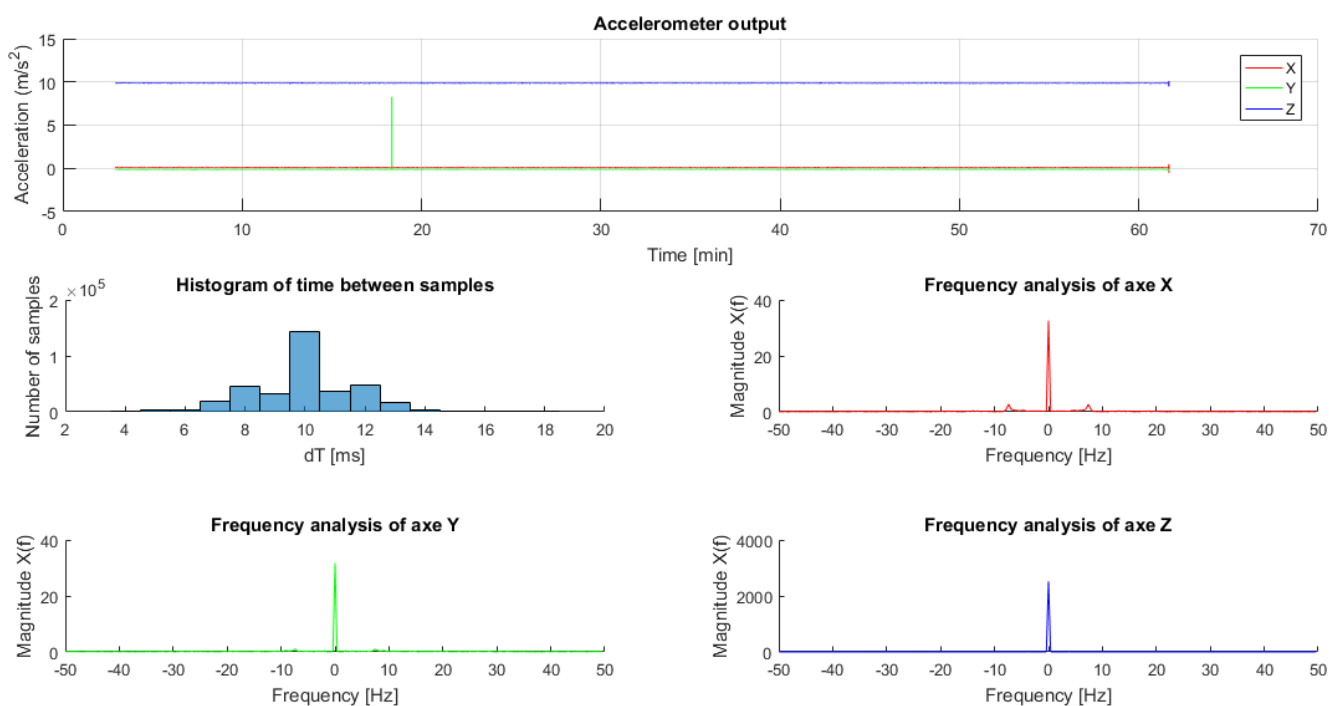
### 3.3 Analýza chování senzorů při měření v klidu

Pro určení chování použitých senzorů byla provedena série měření, během nichž zařízení bylo po celou dobu v klidu. Měřicí poloha zařízení byla navržena s ohledem na měřicí polohu při záznamu pohybu uživatele. Tedy měřicí zařízení bylo umístěno vodorovně na zadní kryt a s displejem směřujícím vzhůru k uživateli. V této poloze byla provedena čtyři měření. Při každém měření bylo pootočeno zhruba o 90 ° oproti poloze předchozí. Měření se odehrávalo ve stejném místě, v klidu a bez externích vlivů.

Technická dokumentace použitých senzorů byla představena v kapitolách 1.5.5 a 1.5.6.

#### 3.3.1 Akcelerometr

Použitý MEMS senzor s měřicím rozsahem  $\pm 19,613 \text{ ms}^{-2}$  měří hodnoty zrychlení na třech osách. Následující graf prezentuje průběh měřených hodnot během jednoho testovacího klidového měření.



Obrázek 14: Analýza dat klidového měření z akcelerometru

Výsledky měření odpovídají chování zařízení v klidu. Spektrální analýza signálu odpovídá konstantnímu signálu se stejnosměrnou složkou. Jelikož Android neumožňuje nastavit pevnou vzorkovací frekvenci, bylo potřeba provést analýzu samotného vzorkování. Výsledkem je graf s rozložením četnosti výskytu času mezi jednotlivými vzorky. Následující tabulka zobrazuje jejich interpretaci.

Akcelerometr - vzorkovací perioda [ms]			
Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
10,01	4,00	18,00	1,67

Tabulka 3: Analýza vzorkovací periody akcelerometru

System vzorkuje data z akcelerometru s hodnotou periody  $10,01 \pm 1,67$  ms, tedy frekvencí 100 Hz. Počet vzorků s nižší nebo naopak vyšší vzorkovací periodou není zanedbatelný. Z těchto výsledků vyplývá, že se systém Android snaží získat data ze senzoru tak rychle, jak je to možné a bez záruky pevné vzorkovací frekvence.

Výsledky analýz hodnot měřených v klidu obsahují následující čtyři tabulky. První sloupec vždy obsahuje pořadí provedeního měření, druhý sloupec střední hodnotu veličiny na dané ose, třetí a čtvrtý sloupec obsahuje nejmenší a nejvyšší naměřenou hodnotu (minimum a maximum) a poslední sloupec obsahuje průměrnou směrodatnou odchylku hodnot od střední hodnoty. Na posledním řádku se nachází průměr ze všech provedených měření pro každý atribut.

Akcelerometr - osa X [m/s <sup>2</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	0,05313	0,00658	0,09397	0,00915
2.	0,10944	-0,51535	0,48303	0,00914
3.	0,26849	-0,00778	0,48183	0,00950
4.	0,14114	-0,27234	0,52912	0,01219
<b>Průměr</b>	<b>0,14305</b>	<b>-0,19722</b>	<b>0,39699</b>	<b>0,01000</b>

Tabulka 4: Analýza střední hodnoty výstupu z akcelerometru na ose X

Akcelerometr - osa Y [m/s <sup>2</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	-0,07861	-0,13946	-0,02274	0,00838
2.	-0,11667	-0,27653	8,29112	0,01649
3.	0,02973	-0,21368	0,18136	0,00919
4.	0,05306	-0,27533	0,28730	0,00983
<b>Průměr</b>	<b>-0,02812</b>	<b>-0,22625</b>	<b>2,18426</b>	<b>0,01097</b>

Tabulka 5: Analýza střední hodnoty výstupu z akcelerometru na ose Y

Akcelerometr - osa Z [m/s <sup>2</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	9,86930	9,80306	9,92696	0,01000
2.	9,85217	9,48343	10,09934	0,00952
3.	9,84936	8,63110	10,82658	0,01258
4.	9,84114	9,31644	10,99417	0,01078
<b>Průměr</b>	<b>9,85299</b>	<b>9,30851</b>	<b>10,46176</b>	<b>0,01072</b>

Tabulka 6: Analýza střední hodnoty výstupu z akcelerometru na ose Z

Akcelerometr - výsledný vektor [m/s <sup>2</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	9,86976	9,80361	9,92750	0,01003
2.	9,85348	9,49584	12,87745	0,01082
3.	9,85308	8,64609	10,82869	0,01260
4.	9,84231	9,33476	11,00623	0,01079
<b>Průměr</b>	<b>9,85466</b>	<b>9,32007</b>	<b>11,15997</b>	<b>0,01106</b>

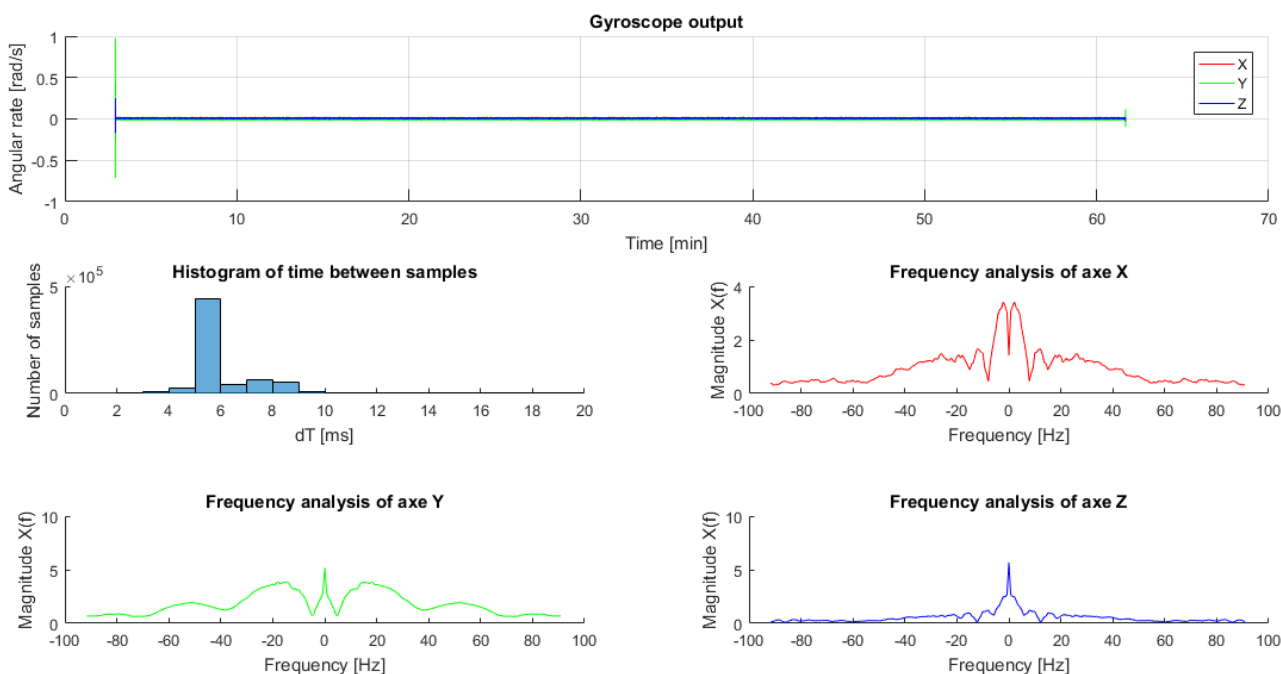
Tabulka 7: Analýza střední hodnoty výstupu z akcelerometru výsledného vektoru

Výsledný vektor zrychlení ukazuje změřené zrychlení působící na zařízení v klidu. Toto zrychlení je způsobeno výhradně gravitačním zrychlením. Z naměřených dat vyplývá, že gravitační zrychlení je pro dané místo rovno  $9,85466 \pm 0,01106 \text{ ms}^{-2}$ .

Z výsledků jednotlivých os se ukazuje, že průměrná směrodatná odchylka od střední hodnoty byla cca  $0,0108 \text{ ms}^{-2}$  na každé z měřících os. Průměrná směrodatná odchylka výsledného vektoru poté byla  $0,01106 \text{ ms}^{-2}$ .

### 3.3.2 Gyroskop

Tento trojosý MEMS senzor měří opět na třech osách hodnoty úhlové rychlosti a to v rozsahu  $\pm 8,727 \text{ rads}^{-1}$ . Ukázka naměřených hodnot reprezentuje jedno z provedených měření s přístrojem v klidu.



Obrázek 15: Analýza dat klidového měření z gyroskopu

Výsledky měření odpovídají zařízení nepodléhajícímu rotaci. Spektrální analýza signálu odpovídá konstantnímu signálu s velmi malou stejnosměrnou složkou. I zde se projevuje nekonzistence vzorkování signálu systémem Android, kdy je výstup z gyroskopu vzorkován dvojnásobnou rychlostí oproti jiným použitým sensorům.

Gyroskop - vzorkovací perioda [ms]			
Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
5,46	2,00	75,00	1,16

Tabulka 8: Analýza vzorkovací periody gyroskopu

System vzorkuje výstup z gyroskopu s periodou  $5,46 \pm 1,16$  ms, tedy frekvencí 200 Hz, což je dvojnásobek vzorkovací frekvence z akcelerometru. Avšak při podrobnější analýze samotných vzorků signálu se ukázalo, že přestože vzorkovací frekvence je 200 Hz, tak v 99 % případech jde o dva po sobě jdoucí identické vzorky. Tento fakt umožňuje bez převzorkování sladit vzorky s ostatními senzory na frekvenci 100 Hz pro další zpracování.

Následující tři tabulky obsahují výsledky klidových měření.

Gyroskop - osa X [rad/s <sup>1</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	0,00655	-0,01741	0,02535	0,00529
2.	0,00605	-0,05284	0,04643	0,00555
3.	0,00589	-0,25901	0,16768	0,00612
4.	0,00578	-0,03818	0,06750	0,00577
<b>Průměr</b>	<b>0,00607</b>	<b>-0,09186</b>	<b>0,07674</b>	<b>0,00568</b>

Tabulka 9: Analýza střední hodnoty výstupu z gyroskopu na ose X

Gyroskop - osa Y [rad/s <sup>1</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	-0,00897	-0,02963	0,02841	0,00333
2.	-0,00868	-0,09896	0,11759	0,00347
3.	-0,00845	-0,20800	0,29444	0,00440
4.	-0,00834	-0,15272	0,09468	0,00393
<b>Průměr</b>	<b>-0,00861</b>	<b>-0,12233</b>	<b>0,13378</b>	<b>0,00378</b>

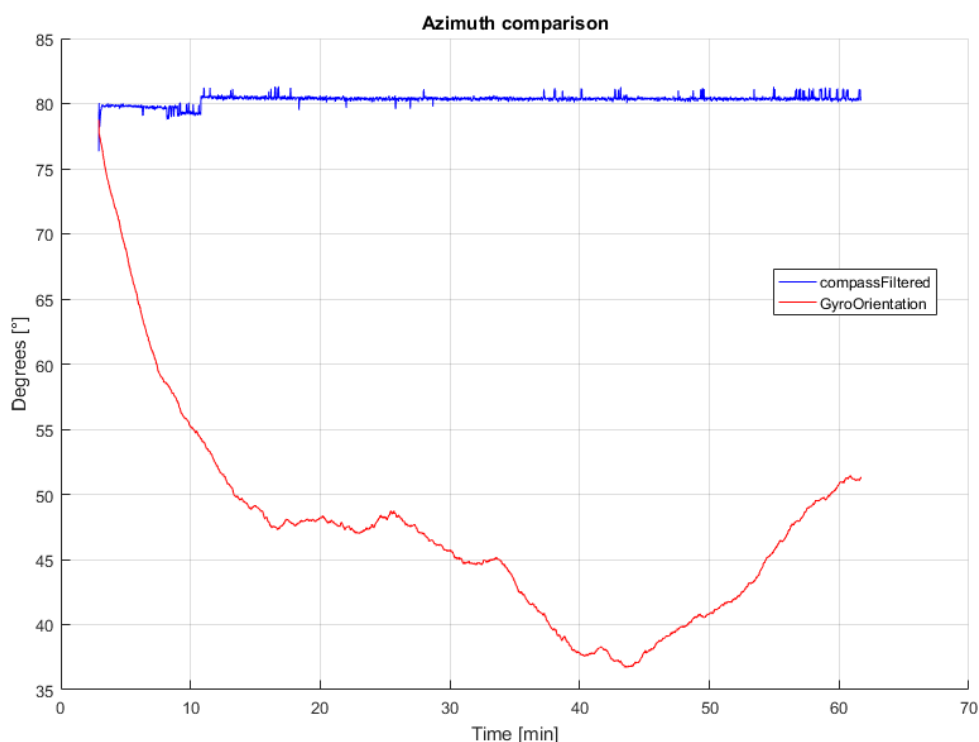
Tabulka 10: Analýza střední hodnoty výstupu z gyroskopu na ose Y

Gyroskop - osa Z [rad/s <sup>1</sup> ]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	0,01092	-0,00580	0,02566	0,00413
2.	0,00879	-0,02810	0,02596	0,00424
3.	0,00798	-0,01008	0,02413	0,00447
4.	0,00695	-0,01038	0,02505	0,00451
<b>Průměr</b>	<b>0,00866</b>	<b>-0,01359</b>	<b>0,02520</b>	<b>0,00433</b>

Tabulka 11: Analýza střední hodnoty výstupu z gyroskopu na ose Z

Střední hodnota by v případě ideálního a přesného gyroskopu měla v klidovém režimu vykázat nulovou hodnotu. Jak je z výsledků patrné, na každé ose je patrný vliv stejnosměrné složky a i přesto, že zařízení nepodléhá žádné rotaci, střední hodnota není nulová. Tento offset je nutný průběžně analyzovat a korigovat, jinak způsobí rychlou degradaci orientace určené na základě hodnot z gyroskopu.

Na každé ose se tedy během tohoto měření nachází *offset* v řádu jednotek tisícín  $\text{rads}^{-1}$ . Konkrétně střední hodnota na ose X se rovná  $0,00607 \pm 0,00568 \text{ rads}^{-1}$ , na ose Y se rovná  $-0,00861 \pm 0,00378 \text{ rads}^{-1}$  a na ose Z se rovná  $0,00866 \pm 0,00433 \text{ rads}^{-1}$ .



**Obrázek 16: Srovnání průběhu orientace při klidovém měření z gyroskopu a kompasu**

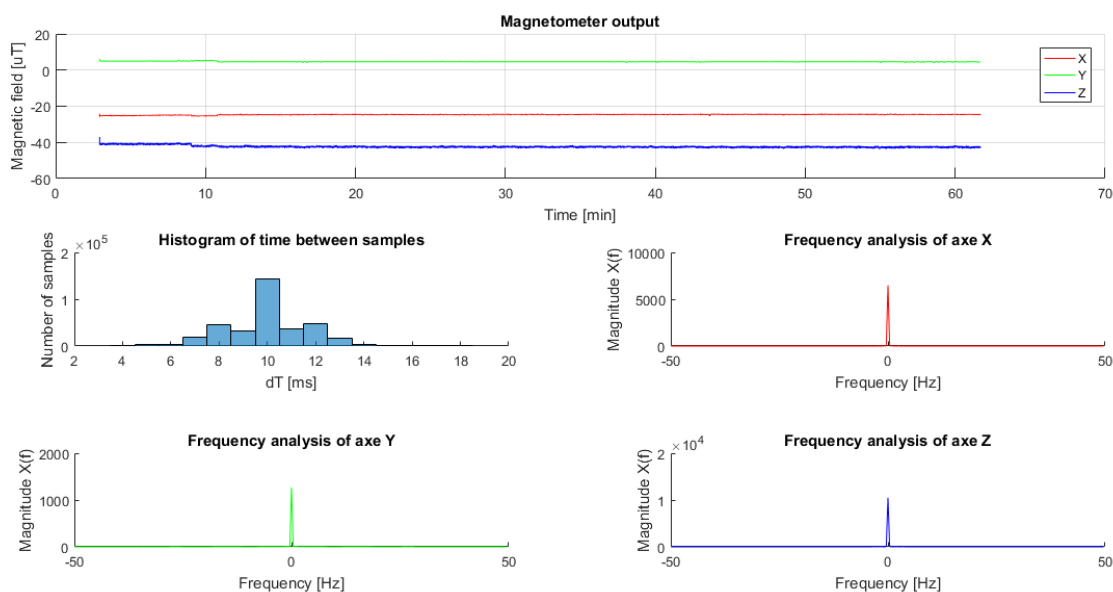
Tento offset má velký vliv na určení orientace, jelikož díky integraci úhlové rychlosti pro získání orientace způsobí lineární růst chyby v čase. Na grafu níže lze vidět degradaci orientace a tedy drift azimutu určeného pomocí gyroskopu ve srovnání s orientací z kompasu systému Android. Na průběhu orientace z gyroskopu v grafu níže lze vidět, že chyba není stabilní, nelze ji tudíž během inicializace vykompenzovat. Tato chyba se mění v čase a s teplotou čipu a teplotou okolí.

Z grafu je patrné, že v prvních 10 minutách má degradace orientace spíše lineární charakter, kdy chyba v určení úhlu činí  $-2,5 \text{ }^\circ/\text{min}$  neboli  $-0,0436 \text{ rad}/\text{min}$ . Pokud by tomu tak bylo i nadále, bylo by možné lineární degradaci jednoduše kompenzovat. Bohužel tomu tak není a z grafu je vidět, že tato chyba je v čase proměnlivá. Právě kvůli proměnné degradaci orientace z gyroskopu v čase se provádí sensorová fúze, která provede sloučení s orientací z magnetometru.



### 3.3.3 Magnetometr

Další trojosý MEMS senzor měří intenzitu magnetického pole. Měřicí rozsah má tento senzor  $1200 \mu T$ . Na záznamu níže se nachází průběh z jednoho klidového měření.



Obrázek 17: Analýza dat z magnetometru při měření v klidu

Výsledky měření opět odpovídají zařízení nevykonávajícím žádný pohyb. Spektrální analýza signálu odpovídá konstantnímu signálu s výraznou stejnosměrnou složkou. Vzorkování signálu je již s podobnou rychlostí jako u akcelerometru. Z analýzy četnosti výskytu intervalů mezi jednotlivými vzorky vznikla následující tabulka.

Magnetometr - vzorkovací perioda [ms]			
Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
10,01	4,00	18,00	1,67

Tabulka 12: Analýza vzorkovací periody magnetometru

Systém tedy vzorkuje data ze senzoru s hodnotou periody  $10,01 \pm 1,67 \text{ ms}$ , což se rovná vzorkovací frekvenci  $100 \text{ Hz}$ . Počet vzorků s nižší nebo naopak vyšší vzorkovací periodou je nižší než v případě akcelerometru, avšak stále výrazný. Z naměřených period opět vyplývá, že se Android snaží získávat data co nejrychleji.

Následující čtyři tabulky obsahují data z klidových měření pro čtyři různé orientace. V tomto případě nelze brát průměr střední hodnoty ze všech čtyř směrů za informačně hodnotný, neboť vektor intenzity magnetického pole míří k magnetickému severu pod určitým úhlem.

Vektor intenzity magnetického pole obsahuje dvě složky. Horizontální ve směru osy Y a vertikální ve směru osy Z. Výsledný vektor tedy nemíří vodorovně k magnetickému severu, ale pod určitým úhlem. Tento úhel od horizontální roviny se nazývá inklinace a v podmínkách Prahy jde o úhel cca  $63^\circ$ . Odchylka magnetického severu od skutečného severu se nazývá deklinace a v Praze je zhruba  $3^\circ$ .

Z tohoto důvodu naměříme při každém pootočení na určité ose jinou složku vektoru. Proto za vypovídající hodnotu platnou pro provedené čtyři měření můžeme považovat průměrnou směrodatnou odchylku.

Magnetometr - osa X [uT]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	-0,91	-1,82	-0,49	0,17
2.	-24,64	-25,63	-24,11	0,24
3.	10,21	9,10	10,73	0,16
4.	21,36	20,61	21,89	0,13
<b>Průměr</b>	<b>1,50</b>	<b>0,57</b>	<b>2,01</b>	<b>0,18</b>

Tabulka 13: Analýza střední hodnoty výstupu z magnetometru na ose X

Magnetometr - osa Y [uT]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	24,91	24,59	25,20	0,21
2.	4,63	4,25	5,26	0,17
3.	-111,58	-113,46	-111,21	0,28
4.	5,41	5,10	5,73	0,09
<b>Průměr</b>	<b>-19,16</b>	<b>-19,88</b>	<b>-18,76</b>	<b>0,18</b>

Tabulka 14: Analýza střední hodnoty výstupu z magnetometru na ose Y

Magnetometr - osa Z [uT]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	-36,27	-37,27	-35,37	0,39
2.	-42,25	-43,61	-39,99	0,61
3.	14,40	13,19	16,24	0,43
4.	-39,51	-40,62	-38,40	0,36
<b>Průměr</b>	<b>-25,91</b>	<b>-27,08</b>	<b>-24,38</b>	<b>0,45</b>

Tabulka 15: Analýza střední hodnoty výstupu z magnetometru na ose Z

Magnetometr - výsledný vektor [uT]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	44,01	43,10	45,08	0,38
2.	49,14	44,61	50,55	0,45
3.	112,97	112,47	115,04	0,30
4.	45,24	44,10	46,30	0,34
<b>Průměr</b>	<b>62,84</b>	<b>61,07</b>	<b>64,24</b>	<b>0,37</b>

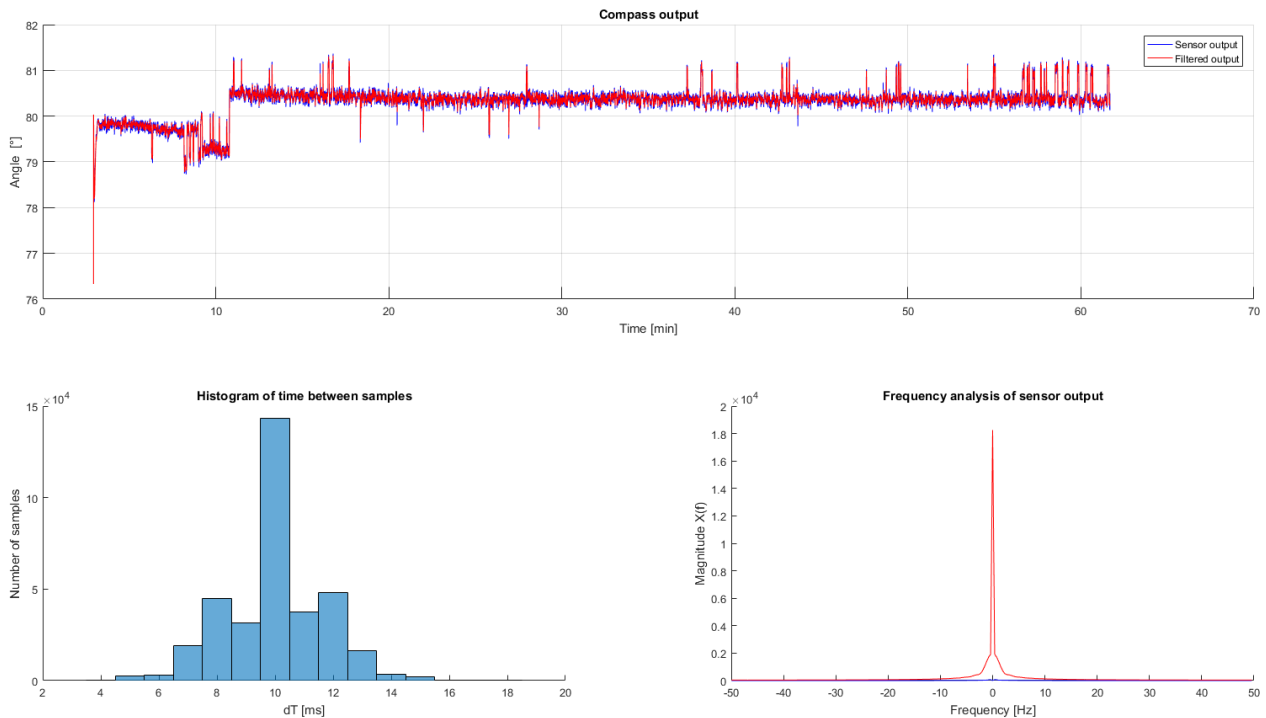
Tabulka 16: Analýza střední hodnoty výstupu z magnetometru výsledný vektor

Z výsledků je patrné, že pro měření horizontální složky magnetického pole platí směrodatná odchylka na osách X a Y  $\pm 0,18 \mu T$ . Pro vertikální složku je naměřená odchylka větší,  $\pm 0,45 \mu T$  z důvodu výraznější složky intenzity magnetického pole. Měření výsledného vektoru ve třech případech vykazuje konzistentní pole o intenzitě  $46,13 \pm 0,39 \mu T$ . Avšak v jednom případě pole vykazovalo velkou změnu na střední hodnotu intenzity  $112,97 \pm 0,30 \mu T$ . Vysvětlením může být zvýšená intenzita magnetického pole způsobená magnetickým pozadím budovy, ve které měření probíhalo.

### 3.3.4 Kompas

Softwarový kompas v systému Android vychází ze softwarového senzoru orientace. Ke konkrétní implementaci lze jen těžko dohledat zdrojové soubory, neboť potřebné algoritmy implementuje buď výrobce, nebo samotný Google. Tento typ senzoru byl od verze systému Android 2.2 označen jako zastaralý, avšak pro zachování kompatibility je implementace stále přítomna.

Výstup senzoru udává úhel v horizontální rovině mezi osou Y měřicího zařízení a magnetickým severem. Tento úhel se nazývá azimut. Hodnoty, kterých může výstup nabývat, pocházejí z intervalu  $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$ . Na obrázku níže se opět nachází jeden průběh z měření v klidu.



Obrázek 18: Analýza dat z kompasu při měření v klidu

Časový průběh signálu obsahuje původní nevyfiltrovaný signál (modrá barva) a filtrovaný signál (červená barva). Filtrem je FIR dolní propust 50. řádu vyrobená pomocí metody nejmenších čtverců, neboli *Lowpass FIR 50th order Least-squares Filter*. Tato dolní propust navržená pomocí nástroje *fdatool* umožňuje potlačit vysokofrekvenční složky a ruchy signálu při zachování dostatečné odezvy filtru. Na výše uvedeném průběhu signálu účinnost dolní propusti není tak patrná z důvodu velmi dlouhého záznamu. V části se spektrální analýzou je však jasně patrné zvýraznění stejnosměrné složky.

V prvních cca 10 minutách je vidět, že kompas měří zhruba o  $1^\circ$  jiný azimut než v pozdějším záznamu. Stejnou anomálii lze vidět v průběhu grafu intenzity magnetického pole. Pravděpodobně během prvních 10 minut měření byl v okolí měřicího zařízení přítomen ještě jiný zdroj magnetického pole.

Opět byla také provedena analýza vzorkovací periody a výsledky lze nalézt v tabulce níže.

Kompas - vzorkovací perioda [ms]			
Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
10,01	4,00	18,00	1,67

Tabulka 17: Analýza vzorkovací periody kompasu

Naměřená perioda je identická s periodou magnetometru a akcelerometru. Systém tedy znovu vzorkuje data ze senzoru s hodnotou periody  $10,01 \pm 1,67 \text{ ms}$ , což se rovná vzorkovací frekvenci  $100 \text{ Hz}$ . Rozložení četnosti výskytů doby mezi vzorky kopíruje rozložení z magnetometru. Lze tedy usoudit, že algoritmy provádějící zpracování a odhad orientace bez vzájemného zpoždění

vzorků. Níže se v tabulkách nacházejí analýzy samotného určení orientace nefiltrovaného a filtrovaného průběhu.

Kompas - azimut [°]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1	1,79	0,67	8,33	0,770
2	80,30	76,33	81,37	0,327
3	185,01	184,15	185,30	0,093
4	284,38	283,33	288,17	0,345
<b>Průměr</b>	<b>137,87</b>	<b>136,12</b>	<b>140,79</b>	<b>0,384</b>

Tabulka 18: Analýza stejnosměrné odchylky kompasu při měření v klidu

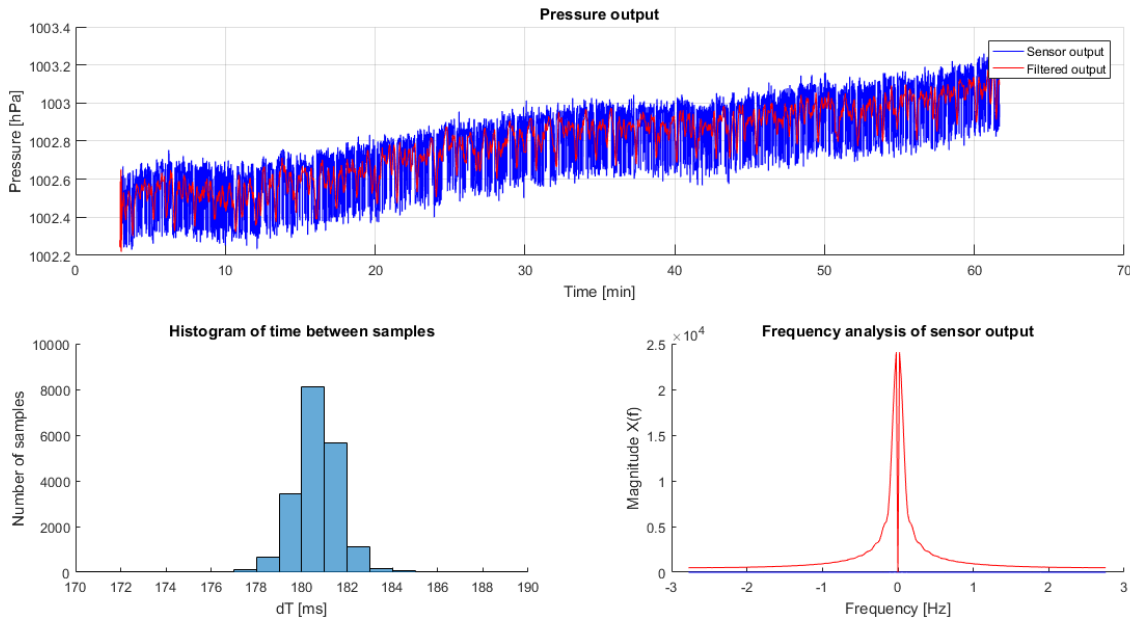
Filtrovaný kompas - azimut [°]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1	1,79	0,73	8,33	0,756
2	80,30	76,33	81,32	0,324
3	185,01	184,15	185,27	0,087
4	284,38	283,46	288,08	0,339
<b>Průměr</b>	<b>137,87</b>	<b>136,17</b>	<b>140,75</b>	<b>0,376</b>

Tabulka 19: Analýza stejnosměrné odchylky filtrovaného kompasu při měření v klidu

Z výsledků je patrné, že filtrovaný kompas má o několik setin stupně nižší směrodatnou odchylku ve srovnání s nefiltrovaným signálem. Opět z podstaty měření orientace ve čtyřech směrech vyplývá, že zde není podstatná průměrná střední hodnota, ale spíše průměrná směrodatná odchylka. Ta je i přes určitý šum signálu poměrně nízká, pouze  $\pm 0,384^\circ$  v případě nefiltrovaného signálu a  $\pm 0,376^\circ$  v případě filtrovaného.

### 3.3.5 Tlakoměr

Tento již opět hardwarový MEMS senzor snímá hodnotu okolního statického atmosférického tlaku. Měřicí rozsah má senzor v intervalu  $\langle 0 \text{ hPa}, 1013,25 \text{ hPa} \rangle$ . Následující graf ukazuje průběh změřeného tlaku v průběhu 60 minut.



Obrázek 19: Analýza dat z tlakoměru při měření v klidu

Pozvolný nárůst změřených hodnot v průběhu času není zapříčiněn chybou senzoru, ale skutečnou pozvolnou změnou okolního atmosférického tlaku. Graf zobrazuje měření číslo 2, které probíhalo po 60 minut. Z grafu je patrné, že tlak se během hodiny změnil celkem o  $0,4 \text{ hPa}$ , což po přepočtu pomocí barického stupně značí výškovou změnu o  $3,2 \text{ m}$ . Z tohoto faktu vyplývá, že pro dlouhodobější nasazení algoritmu bude nutné implementovat korekční mechanismus. Avšak pro potřeby této práce, kdy se testoval záznam pohybu v kratších časových intervalech, řádově jednotky minut, tento jev nebylo nutné korigovat.

Časový průběh obsahuje opět původní nevyfiltrovaný signál v modré barvě a filtrovaný signál v barvě červené. Filtrem je stejná FIR dolní propust jako v případě kompasu.

Histogram četnosti výskytů intervalů mezi vzorky udává rozdílnou vzorkovací periodu oproti ostatním sensorům. Změřená střední hodnota odpovídá hodnotě zjištěné ze specifikace.

Tlakoměr - vzorkovací perioda [ms]			
Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
180,18	166,00	194,00	1,27

Tabulka 20: Analýza vzorkovací periody tlakoměru

Střední hodnota vzorkovací periody je  $180,18 \pm 1,27 \text{ ms}$ , což se rovná vzorkovací frekvenci  $5,5 \text{ Hz}$ . Z podrobnější analýzy měřených dat však vyšlo najevo, že ačkoliv systém vzorkuje signál přibližně každých  $180 \text{ ms}$ , změřená hodnota se v 95 % případů mění pouze jednou vteřinu. Tedy s frekvencí  $1 \text{ Hz}$ . Převzorkování na nižší frekvenci by v tomto případě nepřineslo žádné benefity, proto dále bylo pracováno s hodnotami vzorkovanými  $5,5 \text{ Hz}$ .

Následující tabulky obsahuje průběhy ze všech čtyř klidových měření filtrovaného a nefiltrovaného signálu.

Tlakoměr [hPa]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	1002,38	1002,13	1002,62	0,15
2.	1002,78	1002,22	1003,26	0,23
3.	1003,17	1002,82	1003,40	0,15
4.	1003,27	1002,96	1003,49	0,15
<b>Průměr</b>	<b>1002,90</b>	<b>1002,53</b>	<b>1003,19</b>	<b>0,17</b>

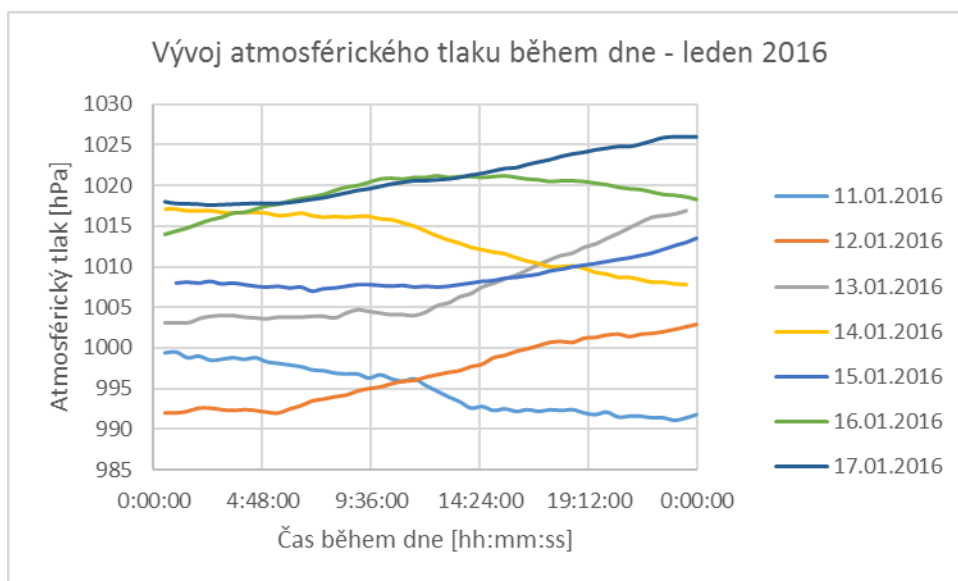
Tabulka 21: Analýza střední hodnoty tlakoměru při klidovém měření

Filtrovaný tlakoměr [hPa]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1.	1002,37	1002,21	1002,54	0,07
2.	1002,78	1002,22	1003,19	0,19
3.	1003,16	1002,82	1003,34	0,08
4.	1003,27	1002,96	1003,42	0,07
<b>Průměr</b>	<b>1002,90</b>	<b>1002,55</b>	<b>1003,12</b>	<b>0,10</b>

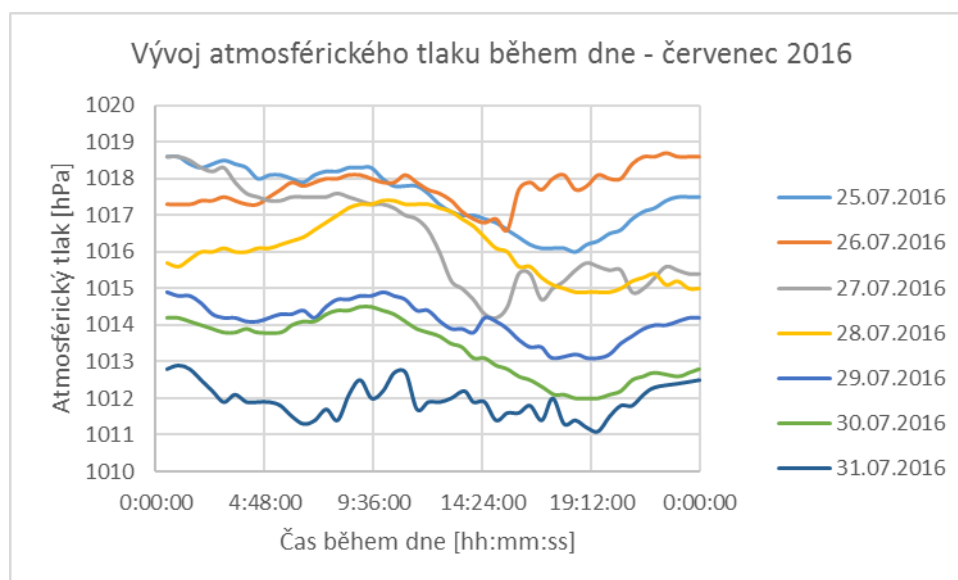
Tabulka 22: Analýza střední hodnoty tlakoměru při klidovém měření

V tomto případě opět není příliš relevantní průměr střední hodnoty tlaků, jelikož tlak během celého měření lehce soustavně roste. Rozdíl atmosférického tlaku mezi začátkem a koncem měření byl 1,11 hPa. Průměrná směrodatná odchylka nefiltrovaného tlakoměru je 0,17 hPa, což po přepočtu znamená výšku 1,36 m. Odchylka filtrovaného signálu je však nižší a rovna 0,10 hPa, což přepočteno znamená výšku 0,8 m. Díky filtraci se tak sníží směrodatná odchylka o 41,18 %.

Již zmiňovaný vliv změny atmosférického tlaku v průběhu dne a noci je ilustrován na následujících grafech. První graf reprezentuje průběh atmosférického tlaku v závislosti na denní době během jednoho lednového týdne. Druhý graf ukazuje průběh atmosférického tlaku během jednoho červencového týdne. Každá barevná křivka reprezentuje jeden den v týdnu.



Obrázek 20: Vývoj atmosférického tlaku během lednového týdne 2016 ze stanice Praha 6, Strahov. Data z [65]



Obrázek 21: Vývoj atmosférického tlaku během červencového týdne 2016 ze stanice Praha 6, Strahov. Data z [65]

Z archivních dat je patrné, že atmosférický tlak se během 24 hodin může výrazně změnit. Rozdíl může činit i 13 *hPa*, což je ekvivalentem změny výšky o 104 *m*. Proto lze nekorigované určení výšky na základě měření změn atmosférického tlaku využít pouze pro krátkodobé měření. Dlouhodobý záznam již vyžaduje nějaký korektivní algoritmus.



### 3.4 Určení orientace zařízení vůči referenčnímu rámci

Tato část rozebírá implementaci určení orientace pro správné určení uživatelské pozice pomocí DR. Jelikož tato práce testuje dvě implementace, Systém A a Systém B, je v této kapitole popsána implementace určení azimutu pomocí fúze kompasu a gyroskopu systému Android a určení orientace pomocí Madgwickova orientačního filtru.

Dále je přítomno srovnání funkčnosti a přesnosti obou algoritmů v následujících třech situacích – chůze v interiéru, chůze v exteriéru a kombinace chůze v exteriéru a interiéru.

#### 3.4.1 Orientace systému A

Tento kompas vznikl senzorem fúzí pomocí komplementárního filtru z implementace kompasu ze systému Android a orientace pomocí gyroskopu. Fúzovaný kompas, neboli určení azimutu je základním kamenem pro techniku DR.

Výstupní hodnotou kompasu je azimut, tedy úhel mezi magnetickým severem a osou Y zařízení.

#### Charakteristika kompasu ze systému Android

Softwarový kompas systému Android počítá své výstupy z vlastní sensorové fúze vstupních senzorů. Tuto implementaci může vytvořit výrobce vlastní, nebo využije standardní implementaci od firmy Google. Avšak ani ze specifikací v API se nepodařilo zjistit druh a implementaci použité fúze.

Z kapitoly 2.3.4 je známá vzorkovací frekvence kompasu, která se rovná 100 Hz. Pro potlačení vysokofrekvenčních složek byl na data aplikován FIR filtr chovající se jako dolní propust 50. řádu vyrobená pomocí metody nejmenších čtverců.

Pokud je zařízení v klidu a nepůsobí na něj žádné vnější síly měřené akcelerometrem, je přesnost a stabilita určení azimutu velmi dobrá. Měření v klidovém stavu ukázalo průměrnou směrodatnou odchylku od stejnosměrné složky pouze  $\pm 0,384^\circ$  a ještě o pár tisícín stupně lepší v případě filtrovaného signálu. Avšak v případě, kdy zařízení podléhá i jinému než gravitačnímu zrychlení, rozptyl měřených hodnot dramaticky roste. Na rovném venkovním úseku při chůzi bez rušivých vlivů magnetických anomálií činí směrodatná odchylka více než  $\pm 10^\circ$ . Filtrovaný signál na téměř úseku snižuje odchylku na  $\pm 6^\circ$ . Jde o přibližné zaokrouhlené hodnoty, jelikož v závislosti na uživateli a jeho momentálním stavu se chůze může diametrálně lišit.

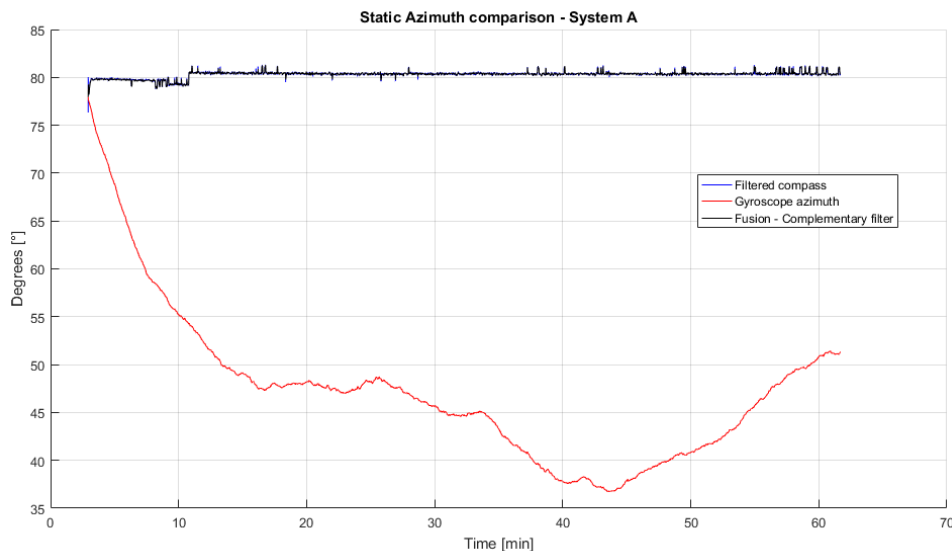
Důvodem zvýšení rozptylu měřených hodnot kompasu při chůzi v přímce je právě sensorová fúze s daty z akcelerometru. Působící zrychlení se projeví na změřených hodnotách a měření gravitačního zrychlení již není tak přesné. Dolní propust se snaží tyto rychlé změny v orientaci zachytit a odfiltrovat. Druhým důvodem zvyšujícím nepřesnost měření azimutu, mohou být magnetické pozadí objektů a budov v okolí. Tyto anomálie způsobují středně rychlé změny v orientaci a nejsou filtrovány dolní propustí.

#### Charakteristika orientace pomocí gyroskopu

Určení absolutní orientace pomocí gyroskopu vyžaduje známé počáteční podmínky. Bez nich integrovaný výstup gyroskopu bude poskytovat pouze relativní orientaci vůči neznámým počátečním podmínkám.

Počáteční podmínky se v tomto případě určí průměrem hodnot z kompasu během prvních 5 vteřin. Tento odhad poslouží pro zajištění absolutní orientace v prostoru.

Data z gyroskopu jsou vhodná pro pohyby v krátkém časovém horizontu, avšak kvůli nutné integraci pro určení orientace podléhají degradaci v čase. Každá možná chyba ve měření úhlové rychlosti se zaznamená a způsobuje chybu v určení výsledného úhlu. V čase dochází k takzvanému driftu výsledné orientace. Tento jev lze pozorovat v následujícím grafu.



Obrázek 22: Graf určeného azimutu zařízení pomocí gyroskopu, kompasu a sensorové fúze

Výsledný azimut se v čase kvůli driftu mění i přesto, že zařízení nepodléhá žádné fyzické rotaci. Z tohoto důvodu je nutné zavést vzájemnou kompenzaci senzorů měřící orientace pomocí sensorové fúze.

### 3.4.2 Orientace systému B

Využitá sensorová fúze kombinuje data z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru pro určení absolutní orientace zařízení v referenčním rámci. Typem použité fúze je Madgwickův orientační filtr. Podrobné vysvětlení filtru lze nalézt v kapitole 2.6.3.

#### Charakteristika orientace pomocí Madgwickova filtru

Tento filtr umožňuje pomocí quaternionů sledovat orientaci zařízení v prostoru během pohybu. Data z akcelerometru se použijí pro odhadnutí směru gravitační síly, tedy k určení vertikální osy Z, data z magnetometru se poté použijí pro odhad směru intenzity magnetického pole pro určení os Y a X. Tento odhad se provádí při každém zpracování vzorků.

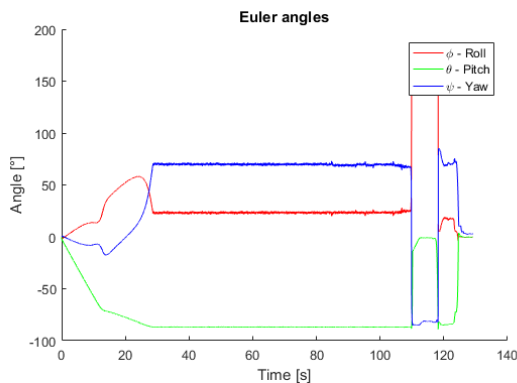
Pro správnou funkčnost algoritmů s měřícím zařízením bylo nutné provést několik úprav. Předně původní algoritmy počítají s jinou orientací os měřícího zařízení než systém Android. Madgwickova implementace určuje úhel v horizontální rovině vůči ose X zařízení. Tedy mezi magnetickým severem a osou X zařízení. Toto nastavení způsobovalo při testování nežádoucí rotaci měřící soustavy o  $+90^\circ$  a také způsobovalo občasnou nestabilitu určení orientace.

Pro opravu bylo potřeba nahradit zjednodušené rovnice *gradient-descent* algoritmu a souvisejícího Jakobiánu vlastním zjednodušením na základě uspořádání měřících os systému

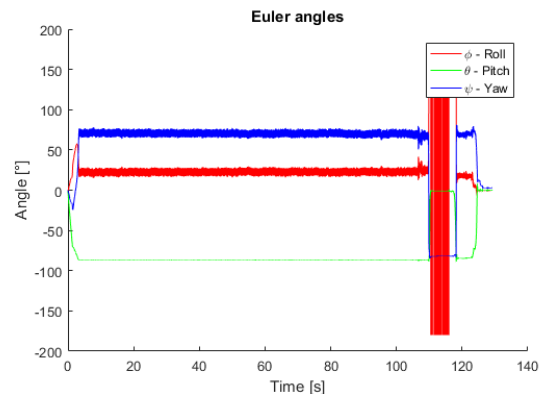
Android. Po této úpravě již algoritmy určovaly správnou orientaci zařízení v prostoru a také došlo ke zrychlení a stabilizaci určené orientace.

Další provedenou úpravou pro zrychlení inicializace bylo zavedení proměnného parametru zisku filtru  $\beta$ . V původní implementaci jde o konstantu, která funguje po proběhnutí inicializace korektně, avšak při aplikování algoritmů na MARG jednotku je nutné vyčkat, než dojde k určení počáteční inicializace. Nastavení parametru ovlivňuje nejen rychlost odezvy soustavy, ale také její odolnost proti vysokofrekvenčním rušivým vlivům. Příliš nízký parametr, např.  $\beta = 0.02$ , způsobí velkou odolnost proti těmto vlivům, avšak odezva a inicializace soustavy bude značně pomalá, může být řádově i desítky sekund. Naopak příliš vysoký parametr, např.  $\beta = 1$ , výrazně zrychlí odezvu a dobu inicializace, která je nyní řádově jednotky sekund, ale naopak soustava podléhá vysokofrekvenčním rušivým vlivům.

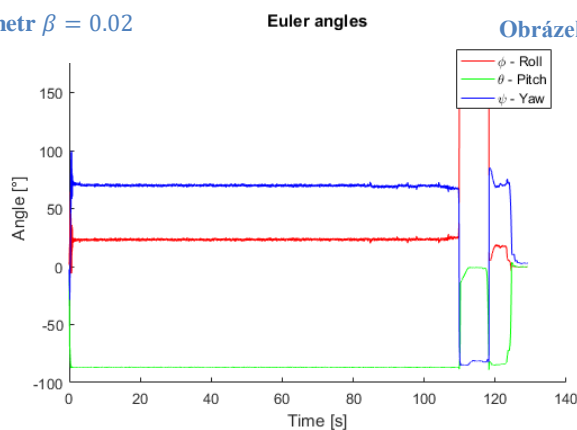
Spojení výhod nastavení vysokého a nízkého parametru vznikne soustava, které se velmi rychle inicializuje a je odolná vůči rušivým vlivům. Z tohoto důvodu byla zavedena funkce proměnného parametru  $\beta$ , která na začátku inicializace nastaví stokrát vyšší hodnotu  $\beta$  než je požadovaná hodnota a postupně ji snižuje až na nastavenou hranici. Ideálním nastavením parametru  $\beta = 0.05$  se dosáhne požadované stability a rychlosti inicializace, jelikož na začátku je parametr stokrát vyšší, tedy  $\beta = 5$ . S touto úpravou nyní trvá inicializace pouhou 1 vteřinu a odolnost a odezva systému je ideální.



Obrázek 23: Parametr  $\beta = 0.02$



Obrázek 24: Parametr  $\beta = 1$



Obrázek 25: Proměnný parametr, počáteční  $\beta = 5$ , po inicializaci  $\beta = 0.05$

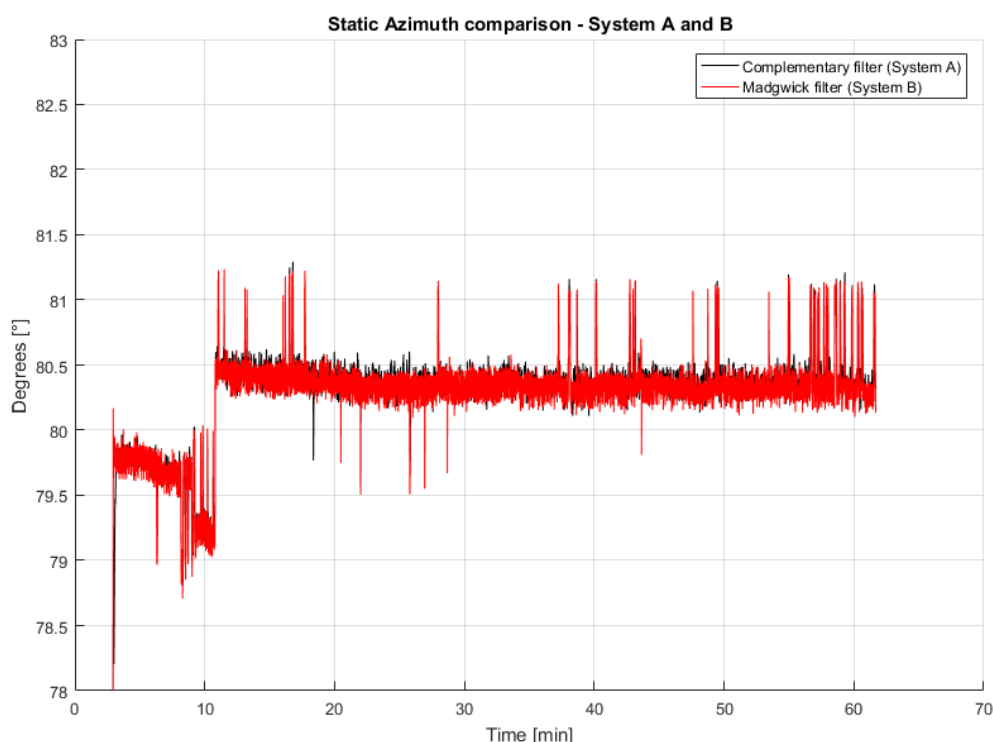
Provedené úpravy umožnily použití algoritmů se systémem Android a staly se tak účinným nástrojem v tomto výzkumu.

### 3.4.3 Porovnání systému A a B

Výkonnost a přesnost navržených systémů orientací je porovnávána ve dvou případech, v klidu a při pohybu. V případě klidového měření byla vyhodnocována střední hodnota, minimum, maximum a směrodatná odchylka od střední hodnoty. V případě pohybu v přímce byly vyhodnoceny stejné parametry.

#### Klidový stav

Měření probíhalo stejně jako v případě kapitoly 3.2. Zařízení leželo v klidu na zadním krytu na vodorovné podložce a každé ze čtyř absolvovaných měření bylo v jiném směru. Na grafu níže se nachází průběh změřené orientace v průběhu 1 hodiny, kdy zařízení bylo v klidu.



Obrázek 26: Srovnání určení azimutu v klidovém režimu

Senzorové fúze vykazují v klidovém měření velmi podobnou charakteristiku. Z takto dlouhého měření nelze vidět výrazné rozdíly. Tabulky níže srovnávají naměřené hodnoty.

Systém A - azimut [°]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1	1,73	0,79	5,57	0,736
2	80,30	78,21	81,29	0,324
3	185,03	184,07	185,29	0,096
4	284,43	283,57	287,98	0,334
<b>Průměr</b>				<b>0,372</b>

Tabulka 23: Analýza směrodatné odchylky systém A

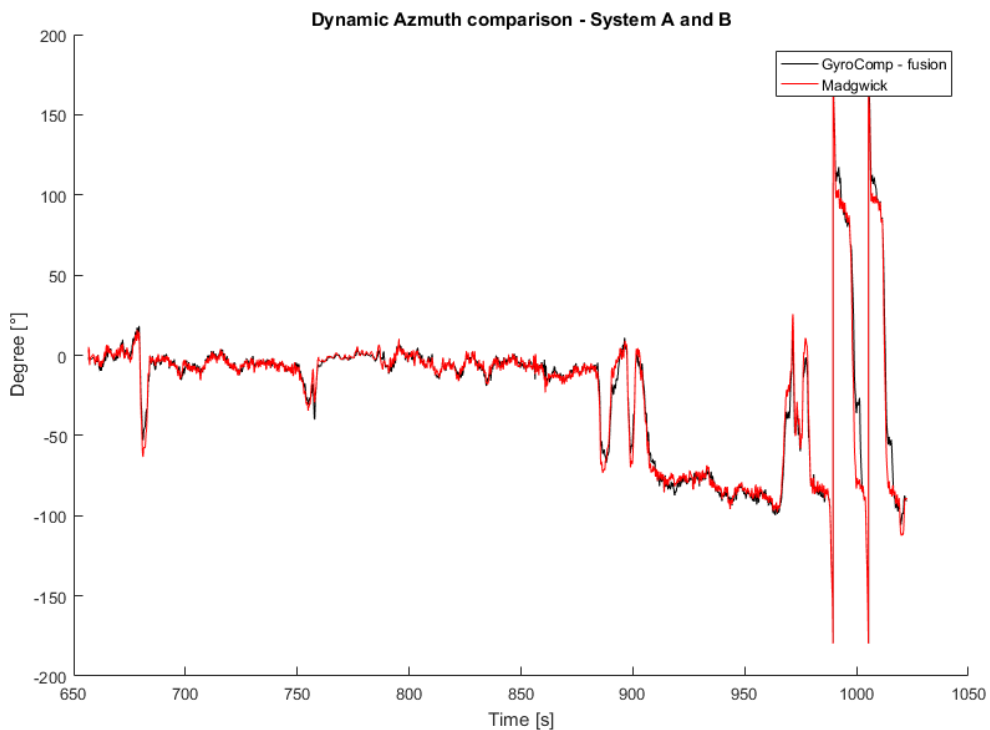
Systém B - azimut [°]				
Měření	Střední hodnota	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka
1	1,62	0,66	5,77	0,384
2	80,27	78,71	81,24	0,311
3	-174,88	-176,43	-1,65	0,553
4	-75,64	-76,59	-2,19	0,685
<b>Průměr</b>				<b>0,483</b>

Tabulka 24: Analýza směrodatné odchylky systém B

Střední hodnota obou systémů se vzájemně liší průměrně o 0.08°. Stejně tak směrodatné odchylky se liší minimálně. Při statickém měření tedy není výrazný rozdíl a lze říci, že oba systémy fungují téměř identicky.

### Dynamické měření – pohyb

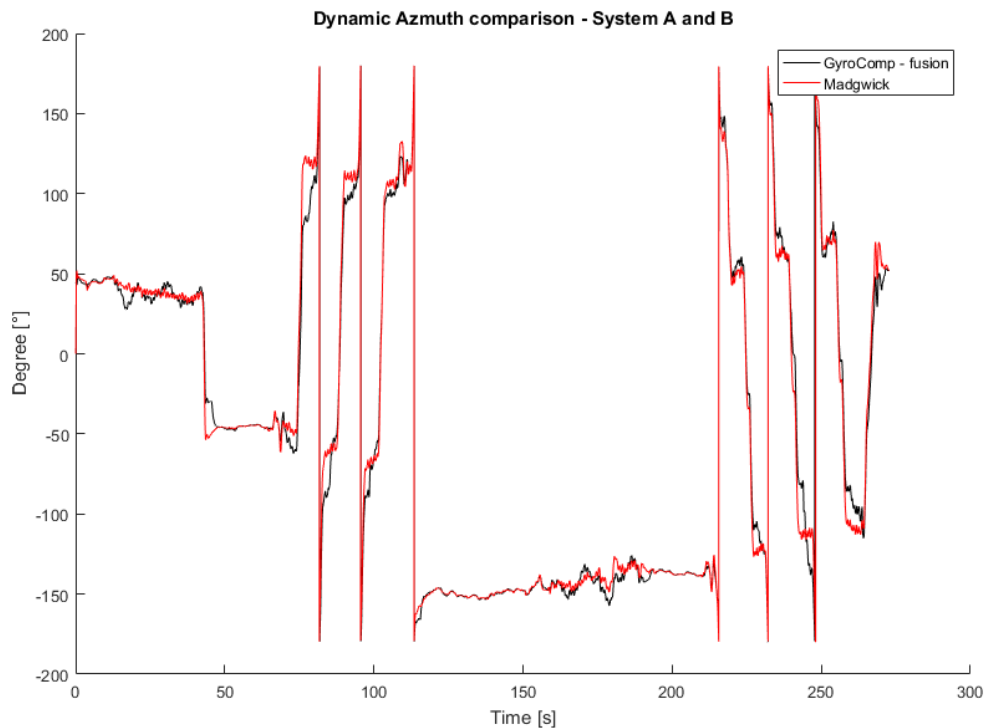
Měření bylo prováděno ve dvou různých prostředích. Jedno měření se odehrávalo venku ve městě a měřilo chodce při chůzi z místa A do místa B z velké části po přímce. Druhé měření představuje pohyb po měřicím polygonu v budově FEL ČVUT.



Obrázek 27: Srovnání určení azimutu při pohybu. Systém A a systém B

První úsek chůze v přímce se nachází zhruba v intervalu 700 – 750 s. V této části systém A projevil určení střední hodnoty se směrodatnou odchylkou  $\pm 3,5^\circ$ , zatímco systém B určil střední hodnotu se směrodatnou odchylkou  $\pm 2^\circ$ , což představuje v odchylce rozdíl 42 %.

Druhý úsek přímé chůze se nachází zhruba v intervalu 790 – 890 s. V této části naměřené odchylky činí pro systém A  $\pm 4,5^\circ$  a pro systém B  $\pm 2,9^\circ$ , což představuje v odchylce rozdíl 35 %.



Obrázek 28: Ukázka určení azimutu během chůze po měřícím polygonu

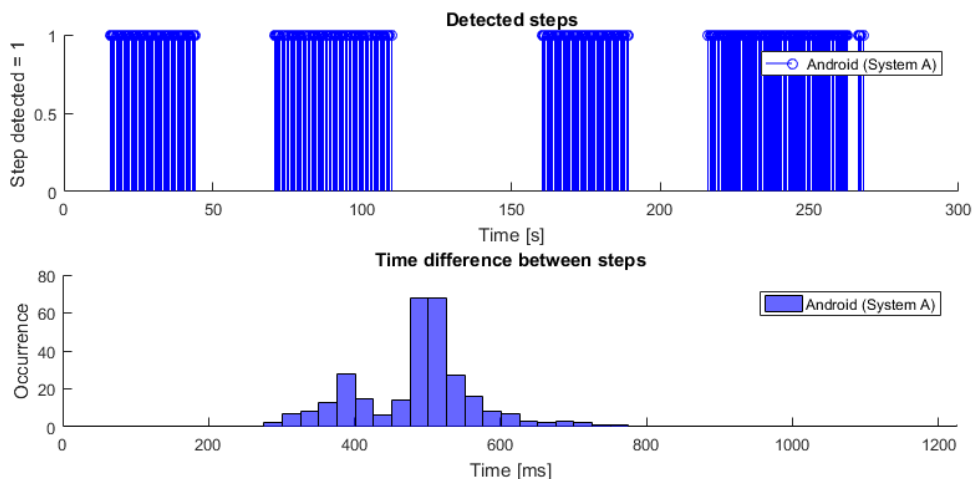
Druhý graf představuje chůzi po měřícím polygonu v budově FEL v Dejvicích. Změřený pohyb je chůze po třech patrech a zpět s kontrolními pauzami. V grafu lze vidět menší rozptyl hodnot u systému B než u systému A. V měření nebyla žádná dostatečně dlouhá rovná trasa, aby mohlo dojít k analýze odchylek jako v předchozím případě.

### 3.5 Detekce kroků

Technika lokalizace chodce založená na DR potřebuje pro správnou funkčnost odhadovat rychlost uživatele nebo uraženou vzdálenost. Jelikož lokalizační systém je navržený pro chodce, lze uraženou vzdálenost odvozovat z detekovaných kroků uživatele.

#### 3.5.1 Krokoměř systému A – implementace systému Android

Softwarový senzor detektor kroků je součástí systému Android od verze KitKat. Implementované algoritmy zpracovávají data z akcelerometru a v případě rozpoznání kroků vyše signál s časovou značkou a konstantou 1. Detekce kroků se tedy provádí v *onsite* fázi.

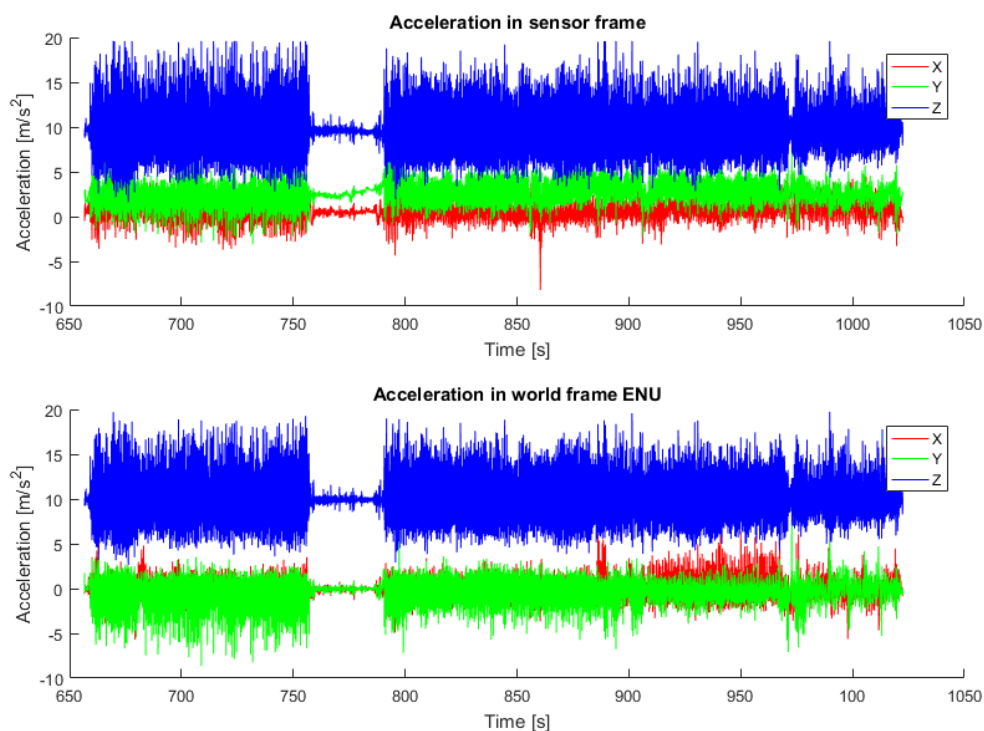


Obrázek 29: Ukázka fungování krokoměru systému A

Bližší dokumentace, jakým způsobem detekce funguje, není k dispozici.

### 3.5.2 Krokoměr systému B – vlastní implementace

Detekce kroků se v tomto případě provádí až v *offline* fázi. Rozpoznávání jednotlivých kroků se děje nad filtrovanými daty z akcelerometru. Jelikož jde o systém B, využívá se zde také transformace výstupu z akcelerometru na osy referenčního rámce ENU pomocí zjištěné orientace měřícího zařízení.

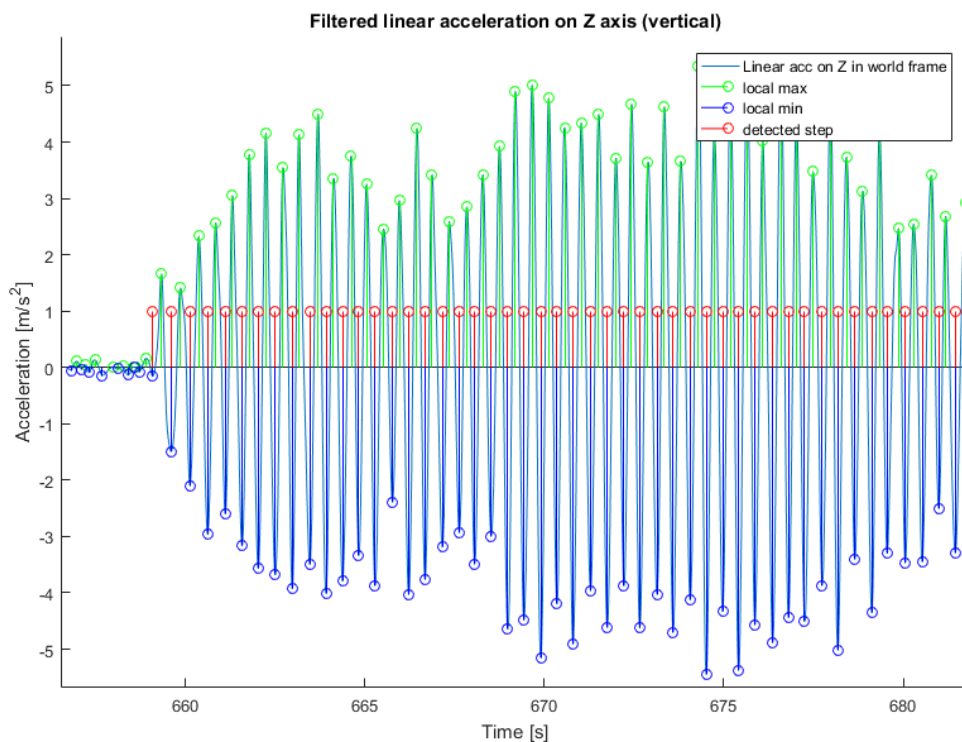


Obrázek 30: Transformované měření zrychlení z lokálního do referenčního rámce

Na předcházejícím obrázku (obr. 30) lze pozorovat vliv transformace akcelerace ze sensorového do referenčního rámce během chůze se zařízením v ruce. Na prvním grafu je patrná stejnosměrná složka zrychlení na ose Y. To je dané tím, že zařízení není drženo v dokonalé vodorovné poloze a proto tato stejnosměrná složka měří část gravitačního zrychlení. Po transformaci však tato složka již není přítomna, protože gravitační zrychlení je nyní pouze na ose Z.

Detekce kroků se nejlépe provádí na datech s vertikálním zrychlením senzoru, tedy v tomto případě transformovaném zrychlení na ose Z. Avšak před samotným filtrováním a analýzou je vhodné odstranit vliv gravitačního zrychlení a získat tak hodnoty lineárního zrychlení.

Jakmile jsou data bez stejnosměrné složky, aplikuje se IIR pásmová propust typu Butterworth 6. řádu. [58] Horní ořezová frekvence pásmové propusti 3 Hz a dolní ořezová frekvence je 0.1 Hz. Poté se analyzují lokální maxima a minima. Pokud splňuje po sobě jdoucí minimum a maximum hodnotící kritéria, dojde k detekci 1 kroku.



Obrázek 31: Analyzovaný signál zrychlení na vertikální ose Z transformovaného signálu z akcelerometru

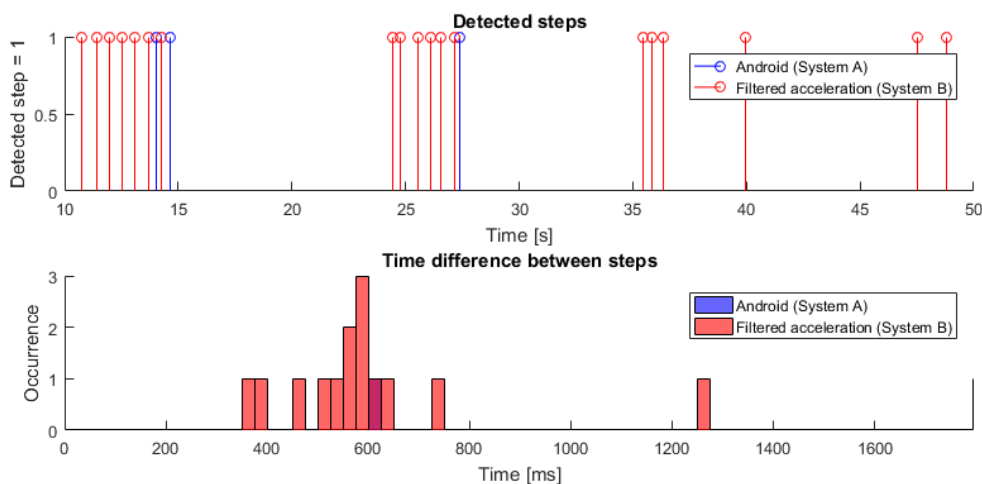
Na grafu výše značí modrá křivka filtrované lineární zrychlení na ose Z referenčního rámce. Zelený a modrý bod značí lokální maxima a minima. Červené body značí detekovaný krok.

Hodnotící kritéria pro dvojici maximum-minimum jsou tři následující: minimální rozdíl v hodnotě, minimální rozdíl v čase a maximální rozdíl v čase. Minimální rozdíl hodnoty zrychlení je  $a_{threshold} = 1,8 \text{ ms}^{-2}$  a jde o experimentálně zjištěnou hodnotu. Minimální rozdíl v čase je  $t_{min} = 100 \text{ ms}$  a jde o hodnotu vypočtenou z minimální frekvence kroků 1 Hz a po započtení 40% tolerance. Maximální rozdíl v čase je  $t_{max} = 714 \text{ ms}$  a opět jde o hodnotu určenou tentokrát z maximální frekvence kroků 3 Hz a po započtení tolerance.



### 3.5.3 Porovnání systémů

Porovnání systémů bylo prováděno v několika prostředích a stylech chůze. První test ukazuje data obsahující rychlé a krátké přesuny po laboratoři. Druhý test ukazuje záznam detekovaných kroků z velké části rovné chůze po městě a třetí test ukazuje detekované kroky na testovacím polygonu v budově FEL.



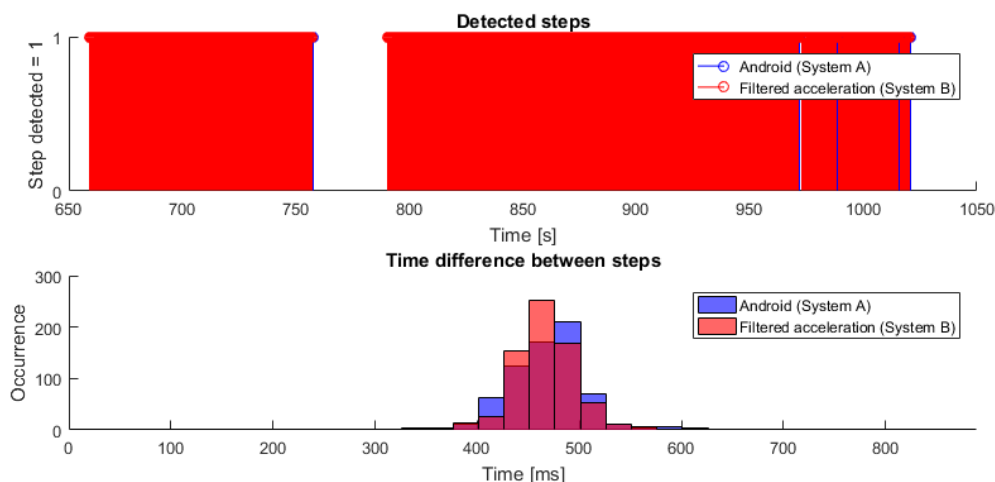
Obrázek 32: Chůze o několika krocích. Porovnání systému A a B

První test hned odhaluje slabinu integrovaného detektoru kroků systému Android. Detektor má zjevně nějakou dobu náběhu, jelikož senzor zahajuje detekování průměrně až po 3 s od počátku chůze. Tento jev způsobuje nedetekování několika prvních 3-8 kroků. Při pohybu, jaký byl testován v prvním případě, je tento jev velmi patrný. V tabulce níže lze nalézt porovnání se skutečným počtem kroků.

Test pomalé krátké chůze				
	Číslo měření			
	1	2	3	4
A	2	1	0	0
B	7	6	4	3
Skutečné kroky	8	8	3	3

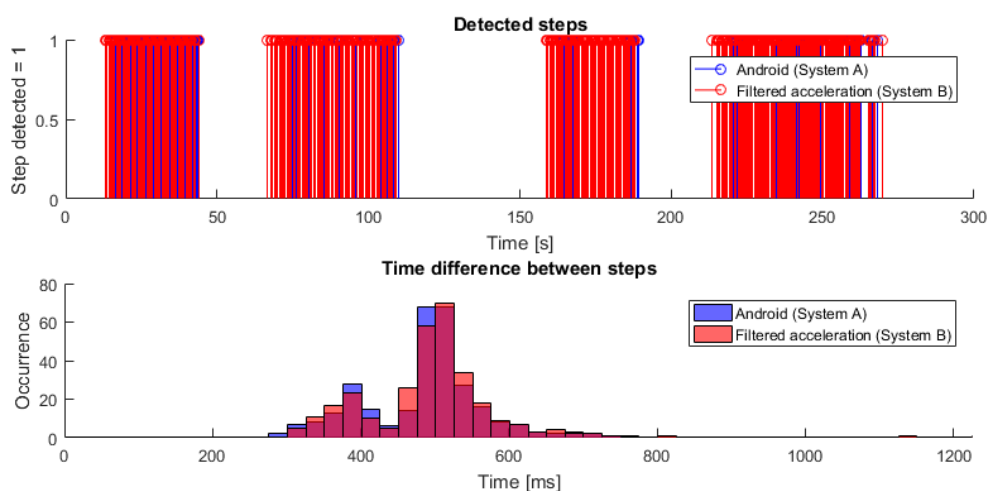
Tabulka 25: Detekované kroky během pomalé krátké chůze

Z tabulky je patrné násobně vyšší úspěšnost detektoru B v detekování kroků než v případě detektoru A.



Obrázek 33: Srovnání detektorů během chůze po městě

Druhý test představuje rovnou chůzi po městě. Opět zde lze pozorovat pozdější začátek detekce systému A. Avšak při takto dlouhé trase pozdější začátek o 3 s neznamená tak vysokou chybu jako v případě krátkých tras. V grafu také lze vidět rozložení intervalů mezi jednotlivými kroky. Rychlost chůze byla po celou dobu konstantní a rozložení intervalů tomuto faktu odpovídá. Nejvíce detekovaných kroků pomocí detektoru A bylo s průměrnou periodou 488 ms, zatímco u detektoru B byla průměrná perioda 462 ms.



Obrázek 34: Srovnání detektorů během chůze po měřicím polygonu

Třetí test reprezentuje chůzi po měřicím polygonu v budově FEL. Samotná chůze je rozdělena do čtyř sekcí. První a třetí sekce reprezentuje chůzi po rovné chodbě, zatímco druhá a čtvrtá sekce reprezentuje chůzi do a ze schodů. Detektor systému A zde opět na začátku má zpoždění cca 3 s. Histogram period mezi kroky se zde odlišuje od předchozích měření. Z tohoto histogramu je patrné, že chůze měla dva rozdílné charaktery, jednu rychlejší chůzi s průměrnou periodou 388 ms a druhou pomalejší chůzi s periodou 522 ms. Rychlejší chůze reprezentuje chůzi ze schodů, zatímco pomalejší chůzi po rovině a do schodů.

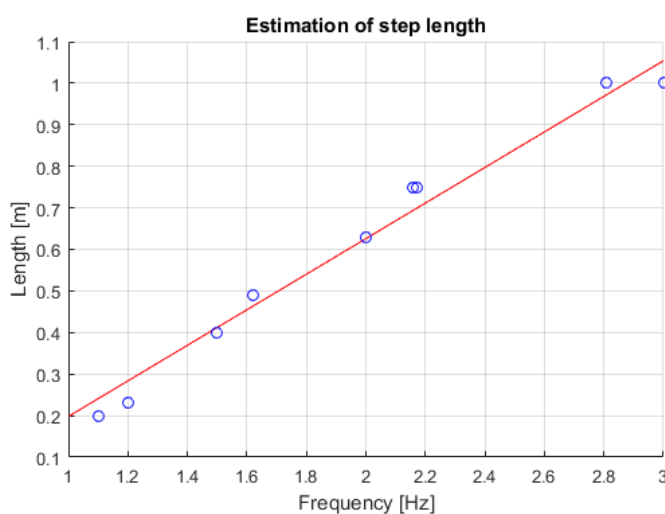
### 3.6 Vyhodnocení délky kroku

Funkce vyhodnocující délku kroku je společná pro systém A i B. Tento blok umožňuje nastavovat délku kroku na základě analýzy frekvence uživatelské chůze. Adaptabilita je důležitá, jelikož koresponduje s lidskou chůzí, kdy změna tempa má vliv na délku kroku. [58]

Výzkumy prokázaly, že závislost délky kroku na frekvenci kroků je lineární. [59] Délka kroku  $L_{step}$  lze zjistit jako funkci frekvence.

$$L_{step} = a + b * f_{step} \quad (34)$$

Konstanty  $a$  a  $b$  jsou individuální a určují se pro každého člověka individuálně. Určení spočívá v absolvování různých vzdáleností různou rychlostí chůze. Experimentální měření s osobou výzkumníka jsou zobrazeny v následujícím grafu. Osoba vždy absolvovala změřenou vzdálenost různou rychlostí.



Obrázek 35: Graf závislosti délky kroku na frekvenci

Modré body vyznačují jednotlivé experimenty. Červená linka vznikla lineární regresí těchto provedených měření. Z těchto dat lze získat konstanty  $a$  a  $b$  specifické pro testovanou osobu.

Délka každého jednotlivého kroku se vypočte dosazením do lineární rovnice (34) na základě frekvence, s jakou byl krok udělán.

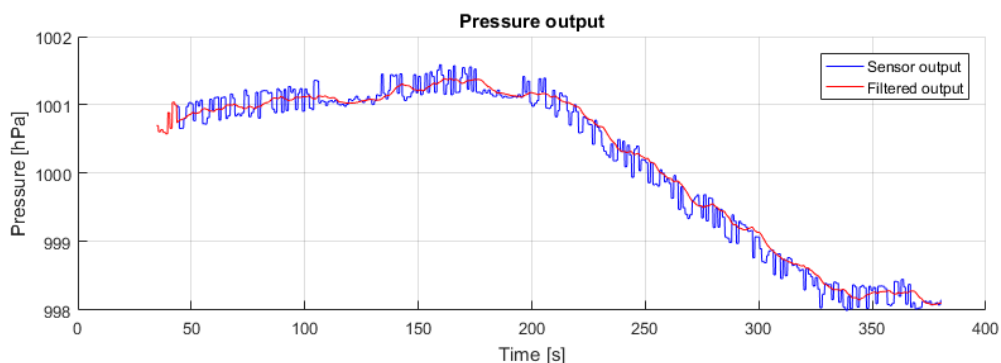
### 3.7 Výškoměr

Funkční část lokalizačního algoritmu Výškoměr umožňuje rozšířit sledovanou polohu uživatele o třetí dimenzi a z dvoudimenzionální lokalizace se stane třídimenzionální. Výškoměr je realizován pomocí dat ze senzoru atmosférické tlaku a jeho průběžného měření. Podrobná charakteristika tlakoměru a jeho měření se nachází v kapitole 3.3.5.

Funkce výškoměru je implementována na principu nastavení počátečního změřeného tlaku na výchozí výšku  $0$  m a průběžného sledování rozdílu tlaku oproti tomuto výchozímu tlaku.

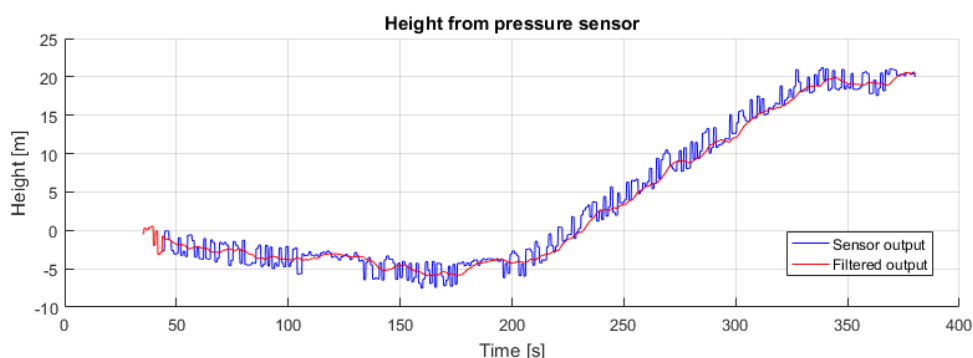
Počáteční hodnota tlaku se nastaví pomocí průměru z prvních 15 změřených hodnot. Každá následující změřená hodnota atmosférického tlaku se odečte od počátečního průměru a zjistí se změna tlaku od počáteční hodnoty. Tento záznam rozdílu tlaků lze poté převést na nadmořskou výšku vynásobením pomocí barického stupně.

Na grafu níže lze vidět průběh změřeného tlaku na trase s velkým výškovým rozdílem. Změřená trasa začíná na ulici a po vchodu do budovy dojde k vystoupení sedmi pater.



Obrázek 36: Průběh změřeného atmosférického tlaku při stoupaní o 7 pater

Na grafu se nachází nefiltrovaný signál (Sensor output, modrá barva) a filtrovaný signál z tlakoměru (Filtered output, červená barva). Lze pozorovat pokles tlaku při stoupaní v budově. Graf níže obsahuje přepočtený tlak na výšku vůči počátečnímu bodu.



Obrázek 37: Vypočtená relativní výška

Výškový rozdíl lze jasně pozorovat. První část chůze byla po ulici lehce z kopce a na grafu vidíme pokles. Při změně výšky při výstupu sedmi pater udává senzor rozdíl 23,97 m, a to od paty po vrchol schodiště. Skutečný rozdíl výšky přitom činí 25,2 m.

## Filtr

Pro filtrování hodnot byl použit FIR filtr dolní propust 50. řádu vyrobený pomocí metody nejmenších čtverců, neboli *Lowpass FIR 50th order Least-squares Filter*. Tento filtr umožňuje vyhladit signál při zachování dostatečně rychlé odezvy na výraznou změnu.

## Barický stupeň

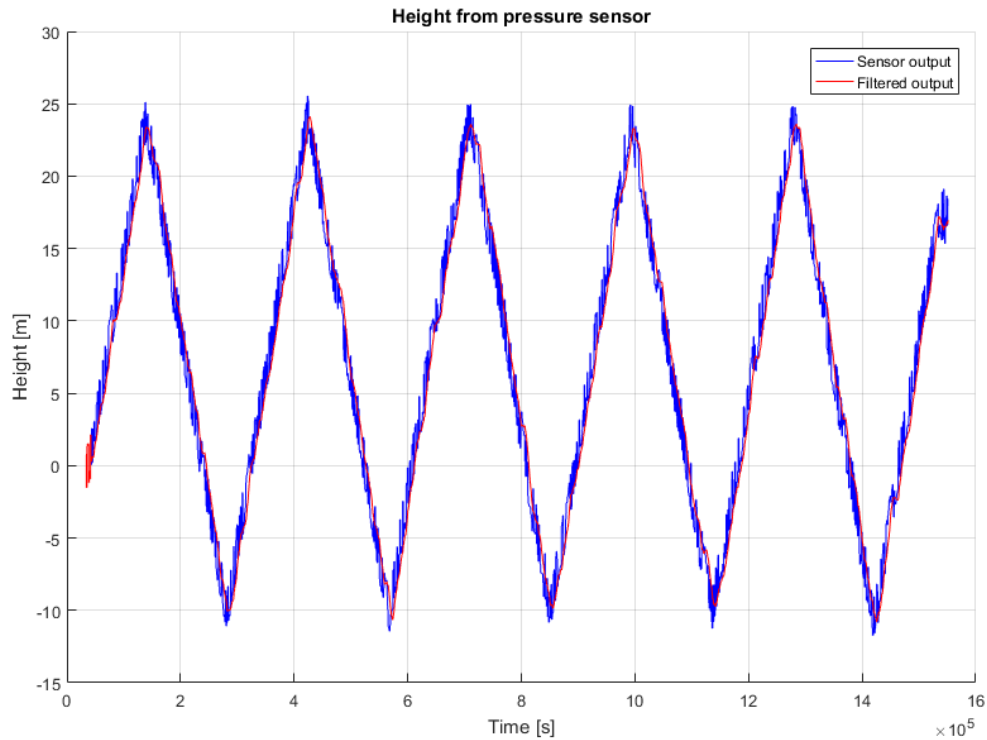
Barický stupeň je číslo, které udává výškový rozdíl na rozdíl tlaku o 1 hPa, neboli o kolik metrů musíme vystoupat, abychom naměřili pokles tlaku o 1 hPa. Barický stupeň je závislý na teplotě okolního vzduchu a jeho hustotě. Toto číslo je tím větší, čím vyšší je teplota a nižší tlak vzduchu. [60] V našich nadmořských výškách do 1000 m n. m. lze použít barický stupeň rovný 8 m/hPa.

Výpočet relativní výšky se provede následujícím způsobem.

$$h_i = (p_{\text{výchozí}} - p_i) * 8 \quad (35)$$

### Přesnost měření

Vyhodnocení přesnosti měření bylo provedeno pomocí záznamu hodnot při opakované jízdě výtahem mezi nejvyšším a nejnižším patrem budovy Elektrotechnické fakulty ČVUT v Dejvicích. Na následujícím grafu lze vidět průběh změřené výšky během tohoto záznamu.



Obrázek 38: Průběh změřené výšky během jízdy výtahem

Měření začínalo a končilo ve stejném patře na stejném místě. Avšak chvíli po začátku měření záznamová aplikace spadla, a proto začátek v tomto grafu chybí.

Následující tabulka obsahuje změřené nejvyšší a nejnižší body měření a také celkovou změřenou výšku.

Opakované měření výšky [m]			
Měření	Nejnižší bod	Nejvyšší bod	Celková výška
1	-10,08	23,42	33,50
2	-10,64	24,12	34,76
3	-9,86	23,59	33,45
4	-9,75	23,30	33,05
5	-10,78	23,60	34,39
<b>Průměr</b>	<b>-10,22</b>	<b>23,61</b>	<b>33,83</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,47</b>	<b>0,31</b>	<b>0,71</b>

Tabulka 26: Výsledky změřené výšky jízdy výtahem

Z tabulky lze vidět, že při opakovaném měření je střední hodnota celkové výšky 33,83 m a směrodatná odchylka 0,71 m, což znamená, že odchylka je 2,1 %.

### **3.8 Měřící polygon**

Pro otestování funkčnosti navrženého lokalizačního algoritmu byly definovány tři rozdílné trasy. Jedna kompletně v budově, druhá kompletně v exteriéru a třetí kombinace exteriér-interiér.

#### **3.8.1 Interiér – budova FEL ČVUT v Dejvicích**

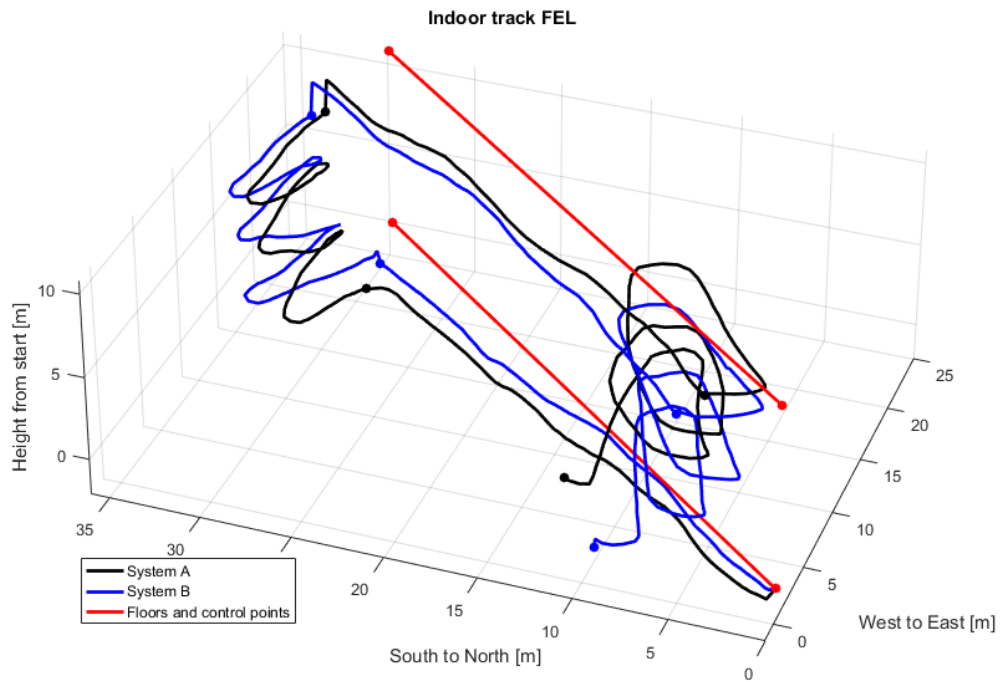
Prvním měřícím polygonem je interiér budovy Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze Dejvicích. Testovací okruh v budově byl zvolen tak, aby prověřil všechny aspekty chůze chodce po budově. Obsahuje rovné úseky, chůzi do schodů a chůzi ze schodů. Po trase jsou rozmístěny 3 kontrolní body, ve kterých se uživatel na chvíli zastaví. Celá trasa se skládá z přímé chůze po patře, z chůze do schodů o tři poschodí výše, chůze po patře na druhou stranu budovy a z chůze dolů ze schodů zpět na výchozí bod. Tato trasa byla změřena pětkrát po sobě v jeden den.

Výchozí bod se nachází za vstupem na katedru měření ve 4. patře, druhý kontrolní bod se nachází na druhém konci katedry měření před vstupem na boční schodiště. Třetí kontrolní bod se nachází o tři patra výše než bod druhý a čtvrtý bod je opět o tři patra výše nad výchozím bodem, před východem z katedry telekomunikací.

Cíle měření na této vybrané trase jsou ověření použitelnosti navržené techniky DR uvnitř budovy, porovnat implementace dvou různých systémů a ověřit přesnost lokalizace.

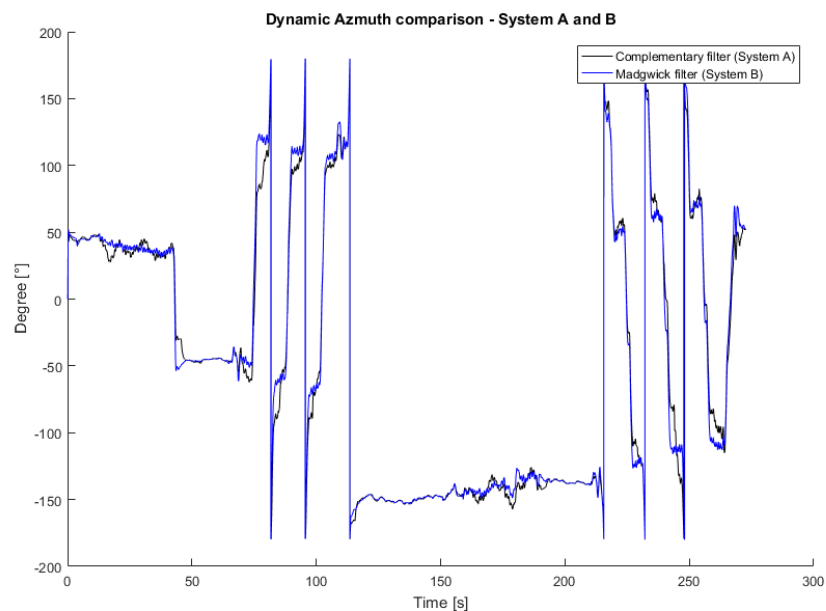
Měření na polygonu se opakovalo celkem pětkrát pro nasbírání většího množství dat. Uživatel prochází mezi kontrolními body tak, že se na nich vždy zastaví a chvíli počká. Sekvence navštívených kontrolních bodů vypadá takto – 1-2-3-4-1.

## Ukázka změřené trasy



Obrázek 39: Změřená trasa

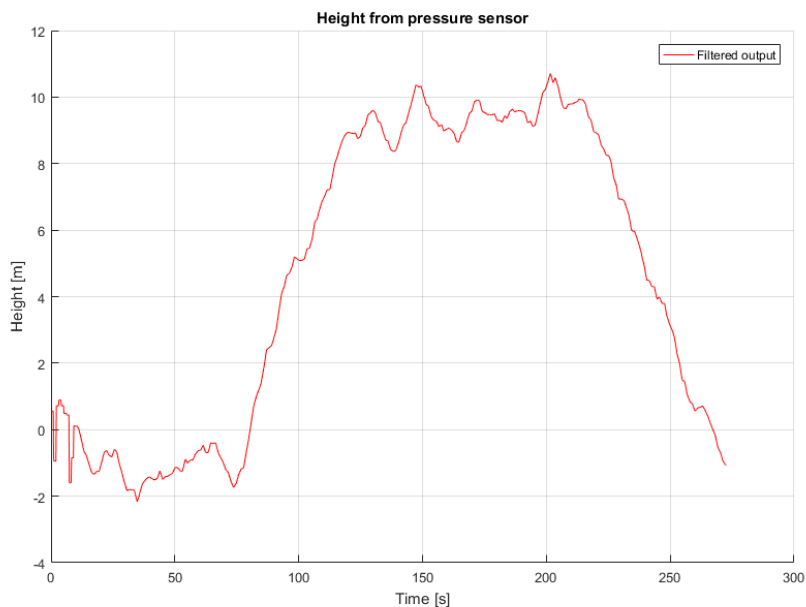
Obrázek výše zobrazuje změřenou trasu pomocí systému A (černá křivka) a systému B (modrá křivka). Červené značky jsou kontrolní body, přičemž každá dvojice leží na svém patře. Body na křivkách tras označují okamžik stání v kontrolním bodu.



Obrázek 40: Porovnání průběhu azimutů během chůze

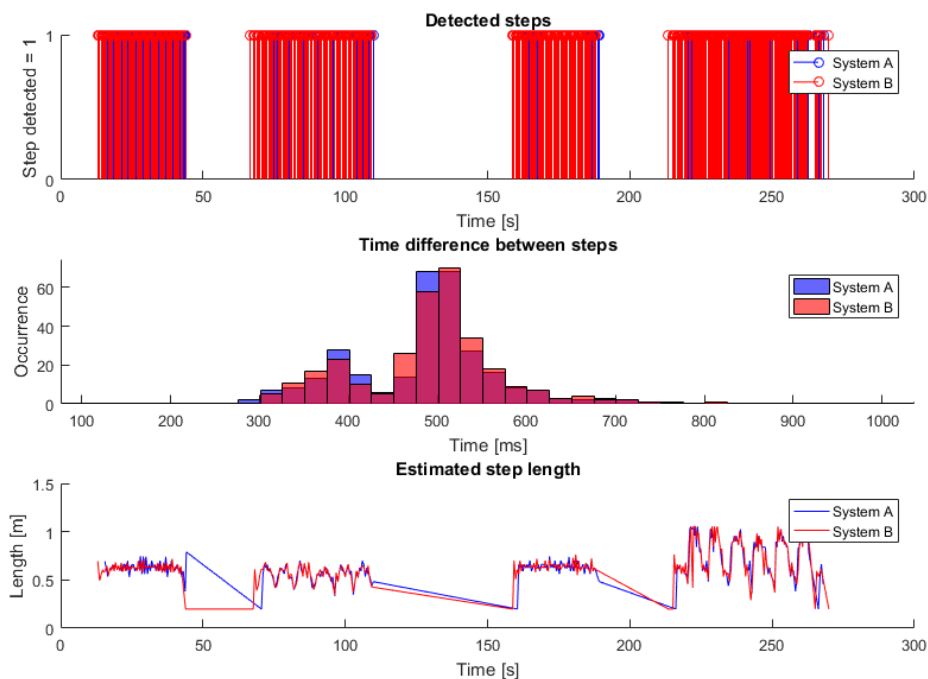
Graf výše ukazuje porovnání určené orientace během měření pomocí systému A (černá křivka) a systém B (modrá křivka). Systém B vykazuje přesnější průběh orientace než systém A, jelikož fúze systému B je odolnější proti rušivým vlivům magnetického pole než u systému A.

Následující graf zobrazuje záznam z výškoměru během celé trasy. V tomto případě bylo měření výšky velmi přesné. Počáteční srovnání výšky na zhruba  $-1\text{ m}$  trvalo trochu déle, avšak po absolvování trasy dojde k návratu na výchozí výšku.



Obrázek 41: Průběh změřené výšky v průběhu trasy

Na následujícím obrázku je srovnání obou detektorů kroků z hlediska počtu detekovaných kroků, času mezi kroky a odpovídající délky kroků.



Obrázek 42: Srovnání detektorů kroku



Tabulka níže obsahuje vyhodnocení všech proběhlých měření z pohledu celé trasy. Políčka A a B označují Systém A a B. Pole C označuje měřicí zařízení – fitness náramek *Xiaomi MiBand*. Pole D skrývá další měřicí zařízení – *Adidas miCoach Step Detector*. Jde o senzor připevňující se na botu a měřící kroky. Nakonec pole E označuje výškoměr SkyDrop od firmy SkyBean. Ten byl vždy na začátku trasy nastaven na 0 m a po absolvování trasy byla zaznamenána konečná hodnota výšky. Tato zařízení sloužila jako srovnávací komerční produkt.

Vyhodnocení trasy FEL								
		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka
		1	2	3	4	5		
Počet kroků	A	304	303	305	300	300	302,4	2,3
	B	315	321	324	307	320	317,4	6,7
	C	317	316	317	317	315	316,4	0,9
	D	230	220	198	234	208	218	15,0
Celková dráha [m]	A	203,63	207,68	215,47	213,45	211,51	210,35	4,7
	B	206,78	214,68	224,14	211,91	225,74	216,65	8,1
Chyba od počáteční hodnoty [m]	A	14,49	21,73	22,60	21,62	12,06	18,50	4,9
	B	10,55	15,11	13,38	14,44	8,65	12,42	2,7
Chyba od počáteční hodnoty [%]	A	<b>7,01</b>	<b>10,12</b>	<b>10,08</b>	<b>10,20</b>	<b>5,34</b>	<b>8,55</b>	<b>2,2</b>
	B	<b>5,18</b>	<b>7,27</b>	<b>6,21</b>	<b>6,76</b>	<b>4,09</b>	<b>5,90</b>	<b>1,3</b>
Chyba výšky [m]	A	0,12	1,95	0,04	1,29	1,26	0,93	0,8
	B	0,63	2,62	0,52	1,63	1,12	1,30	0,9
	E	2,00	1,00	2,00	1,00	0,00	1,20	0,8
Chyba výšky [%]	A	0,06	0,91	0,02	0,61	0,56	0,43	0,4
	B	0,31	1,26	0,24	0,76	0,53	0,62	0,4

Tabulka 27: Podrobné vyhodnocení měřicího polygonu FEL

Nejvíce konzistentní výsledky z hlediska počtu kroků má měřicí zařízení C – *Xiaomi MiBand*. Z pěti měření má směrodatnou odchylku střední hodnoty pouze 0,9 kroku. Naopak nejhorší výsledek mělo zařízení D – *Adidas Step Detector*. Pravděpodobným důvodem chyby bude problematický bezdrátový přenos ze senzoru do mobilního telefonu pomocí technologie ANT+. Použitý detektor kroků systému A vykazuje konzistentní výsledky se směrodatnou odchylkou 2,3 kroku. Vlastní detektor kroků systému B však vykazuje větší odchylku v detekovaných krocích, konkrétně 6,7 kroku. Tento jev je způsoben nepřesnou detekcí počtu kroků během pohybu ze schodů. Porovnání jednotlivých úseků trasy se nachází v další kapitole.

Z obrázku (č. 39) celé trasy je patrné, že výsledky měření trasy nejsou bezchybné a je zde prostor pro vylepšení. Proto byl zaveden korekční mechanismus pozice, který provádí opravu pozice v kontrolních bodech. Rozbor takto korigované trasy se nachází dále.

## Srovnání jednotlivých úseků trasy

Následující čtyři tabulky obsahují vyhodnocení záznamu jednotlivých úseků trasy. Úseky jsou tvořeny vždy dvojicí kontrolních bodů. Úsek 1-2 a 3-4 popisují přímou chůzi po rovině ve 4. a 7. patře fakulty. Úsek 2-3 analyzuje stoupání po schodech o tři patra vzhůru a úsek 4-1 analyzuje naopak klesání o tři patra níže opět na výchozí pozici.

Úsek 1-2									
Vzdálenosti mezi kontrolními body [m]		39	Azimut trasy [°]			40	Výška [m]		0
		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka	
		1	2	3	4	5			
Počet kroků	A	58	58	56	55	55	<b>56,4</b>	1,5	
	B	61	61	61	58	58	<b>59,8</b>	1,6	
	C	x	x	60	58	58	<b>58,67</b>	1,2	
Změřená vzdálenost mezi kontrolními body [m]	A	35,70	36,18	36,21	36,28	36,04	<b>36,08</b>	0,23	
	B	37,49	38,38	39,08	37,92	38,42	<b>38,26</b>	0,60	
Chyba přímé vzdálenosti [%]	A	8,45	7,24	7,17	6,98	7,59	<b>7,48</b>	0,58	
	B	3,87	1,58	-0,22	2,78	1,49	<b>1,90</b>	1,53	
Změřený azimut [°]	A	34,40	33,38	33,01	34,58	34,72	<b>34,02</b>	0,77	
	B	37,24	37,06	36,91	38,39	38,43	<b>37,61</b>	0,74	
Chyba azimutu [%]	A	14,00	16,54	17,48	13,56	13,21	<b>14,96</b>	1,93	
	B	6,89	7,34	7,72	4,02	3,93	<b>5,98</b>	1,85	
Převýšení úseku [m]	A	-1,28	-2,02	-0,42	-1,63	-0,56	<b>-1,18</b>	0,69	
	B	-1,24	-2,03	-0,42	-1,64	-0,52	<b>-1,17</b>	0,70	
Změna výšky na trase [%]	A	-3,29	-5,18	-1,07	-4,18	-1,43	<b>-3,03</b>	1,76	
	B	-3,17	-5,20	-1,07	-4,19	-1,34	<b>-2,99</b>	1,79	

Úsek 3-4									
Vzdálenosti mezi kontrolními body [m]		39	Azimut trasy [°]			40	Výška [m]		0
		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka	
		1	2	3	4	5			
Počet kroků	A	59	57	56	55	56	<b>56,6</b>	1,5	
	B	60	60	60	59	60	<b>59,8</b>	0,4	
	C	x	x	59	59	59	<b>59,00</b>	0,0	
Změřená vzdálenost mezi kontrolními body [m]	A	36,74	35,13	35,36	35,31	36,00	<b>35,71</b>	0,66	
	B	37,54	36,92	37,88	37,95	38,50	<b>37,76</b>	0,58	
Chyba přímé vzdálenosti [%]	A	5,81	9,92	9,33	9,47	7,69	<b>8,44</b>	1,70	
	B	3,75	5,34	2,87	2,69	1,29	<b>3,19</b>	1,49	
Změřený azimut [°]	A	38,07	38,00	40,74	39,47	39,43	<b>39,14</b>	1,14	
	B	40,11	39,39	43,04	42,93	39,36	<b>40,97</b>	1,87	
Chyba azimutu [%]	A	4,81	5,00	-1,85	1,33	1,41	<b>2,14</b>	2,85	
	B	-0,27	1,53	-7,59	-7,33	1,60	<b>-2,41</b>	4,67	

Převýšení úseku [m]	A	2,65	1,54	2,41	1,81	1,71	<b>2,02</b>	0,48
	B	2,78	1,02	2,73	1,71	1,74	<b>2,00</b>	0,75
Změna výšky na trase [%]	A	-3,10	-6,49	-1,55	-2,75	-1,33	<b>-3,04</b>	2,07
	B	-3,12	-6,27	-1,55	-2,99	-1,45	<b>-3,08</b>	1,95

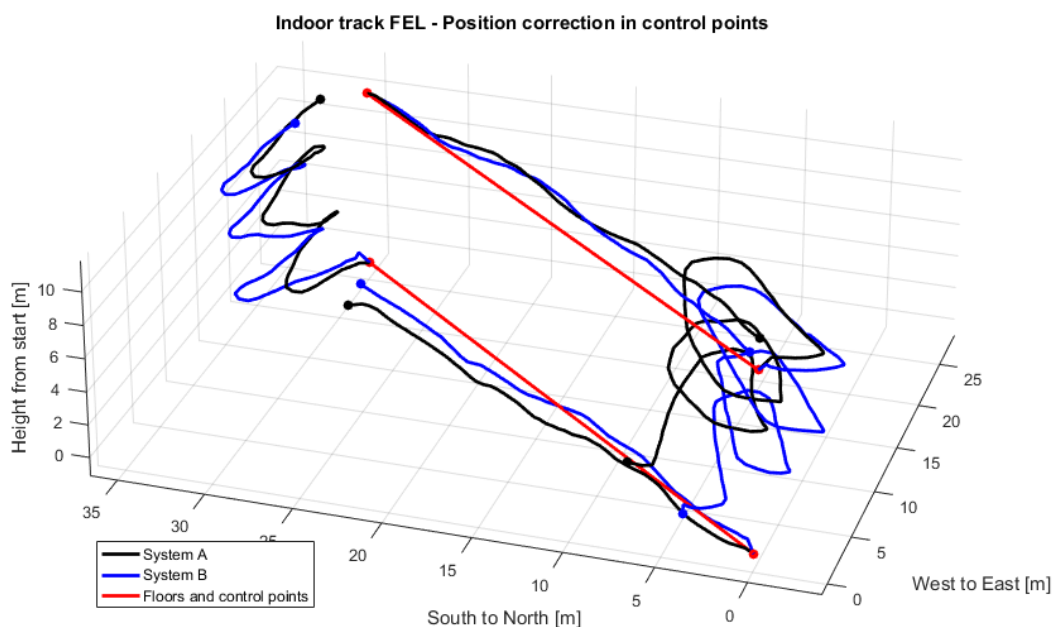
Úsek 2-3								
Vzdálenosti mezi body	x	Azimut trasy [°]			x	Převýšení [m]		10,8
		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka
		1	2	3	4	5		
Počet kroků	A	73	72	79	77	78	<b>75,8</b>	3,1
	B	78	81	84	81	82	<b>81,2</b>	2,2
	C	x	x	81	80	80	<b>80,33</b>	0,6
Celková dráha [m]	A	40,80	40,75	46,43	48,64	48,89	<b>45,10</b>	4,07
	B	42,97	45,09	49,47	50,44	51,03	<b>47,80</b>	3,57
Chyba pozice od konečného bodu [m]	A	3,65	5,35	5,19	2,68	0,45	<b>3,46</b>	2,02
	B	4,30	5,09	5,16	3,27	3,26	<b>4,22</b>	0,93
Chyba pozice od konečného bodu [%]	A	8,06	11,94	10,24	5,23	0,88	<b>7,27</b>	4,37
	B	9,12	10,22	9,67	6,18	6,00	<b>8,24</b>	2,00
Převýšení úseku [m]	A	8,22	8,74	8,20	9,55	9,13	<b>8,77</b>	0,58
	B	8,04	9,36	7,88	9,55	9,02	<b>8,77</b>	0,77
Změna výšky na trase [%]	A	-9,90	-10,44	-7,72	-7,39	-5,71	<b>-8,23</b>	1,94
	B	-10,25	-8,89	-8,55	-7,39	-5,91	<b>-8,20</b>	1,63

Úsek 4-1								
Vzdálenosti mezi body	x	Azimut trasy [°]			x	Převýšení [m]		-10,8
		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka
		1	2	3	4	5		
Počet kroků	A	114	116	114	113	111	<b>113,6</b>	1,8
	B	116	119	119	109	120	<b>116,6</b>	4,5
	C	x	x	117	120	118	<b>118,33</b>	1,5
Celková dráha [m]	A	126,39	130,37	132,66	128,36	126,17	<b>128,79</b>	2,75
	B	125,87	131,09	135,25	123,47	136,20	<b>130,38</b>	5,62
Chyba pozice od konečného bodu [m]	A	14,49	21,73	22,60	21,62	12,06	<b>18,50</b>	4,86
	B	10,55	15,11	13,38	14,44	8,65	<b>12,42</b>	2,74
Chyba pozice od konečného bodu [%]	A	21,22	31,04	31,60	29,16	16,57	<b>25,92</b>	6,68
	B	15,44	21,14	18,03	20,36	11,04	<b>17,20</b>	4,10
Převýšení úseku [m]	A	-0,12	-1,95	0,04	-1,29	-1,26	<b>-0,91</b>	0,85
	B	-0,63	-2,62	-0,52	-1,63	-1,12	<b>-1,30</b>	0,86
Změna výšky na trase [%]	A	-0,30	-5,00	0,10	-3,30	-3,24	<b>-2,35</b>	2,18
	B	-1,63	-6,71	-1,32	-4,17	-2,88	<b>-3,34</b>	2,19

Tabulka 28: Podrobné vyhodnocení jednotlivých úseků měřicího polygonu FEL

## Korekce trasy pomocí externího systému

Pro zvýšení přesnosti trasy a eliminaci v čase rostoucí chyby určení pozice byla zavedena korekce pozice pomocí externího systému. V tomto případě externí systém spočívá v předem nastavených kontrolních bodech, ve kterých dojde ke korekci pozice uživatele na pozici kontrolního bodu (viz. Obr. 43).



Obrázek 43: Změřená trasa po externí korekci určené pozice

V následující tabulce je celkové vyhodnocení trasy v případě průběžné korekce. Zatímco střední hodnota chyby konečné pozice od výchozího bodu činila v případě systému A bez korekce 8,55 %, po aplikování průběžné korekce byla chyba snížena na 5,95 %, tedy jde o zlepšení o 30,5 %. V případě systému B bez korekce byla střední hodnota chyby konečné pozice od výchozího bodu rovna 5,9 %, po aplikování externí korekce byla snížena na 3,24 %, jde tedy o zlepšení o 45,1 %.

Vyhodnocení trasy FEL - průběžná korekce								
		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka
		1	2	3	4	5		
Počet kroků	A	304	303	305	300	300	302,4	2,3
	B	315	321	324	307	320	317,4	6,7
	C	317	316	317	317	315	316,4	0,9
	D	230	220	198	234	208	218	15,0
Celková dráha [m]	A	203,63	207,68	215,47	213,45	211,51	210,35	4,7
	B	206,78	214,68	224,14	211,91	225,74	216,65	8,1
Chyba od výchozího bodu [m]	A	9,49	14,16	13,86	15,19	9,95	12,53	2,6
	B	4,87	8,49	7,51	9,08	5,07	7,00	1,9
Chyba od výchozího bodu [%]	A	<b>4,66</b>	<b>6,82</b>	<b>6,43</b>	<b>7,12</b>	<b>4,71</b>	<b>5,95</b>	<b>1,2</b>
	B	<b>2,35</b>	<b>3,95</b>	<b>3,35</b>	<b>4,29</b>	<b>2,25</b>	<b>3,24</b>	<b>0,9</b>
Chyba výšky [m]	A	0,12	1,95	0,04	1,29	1,26	0,93	0,8
	B	0,63	2,62	0,52	1,63	1,12	1,30	0,9
	E	2,00	1,00	2,00	1,00	0,00	1,20	0,8
Chyba výšky [%]	A	0,06	0,91	0,02	0,61	0,56	0,43	0,4
	B	0,31	1,26	0,24	0,76	0,53	0,62	0,4

Tabulka 29: Podrobné vyhodnocení pravidelně korigované trasy na měřicím polygonu FEL

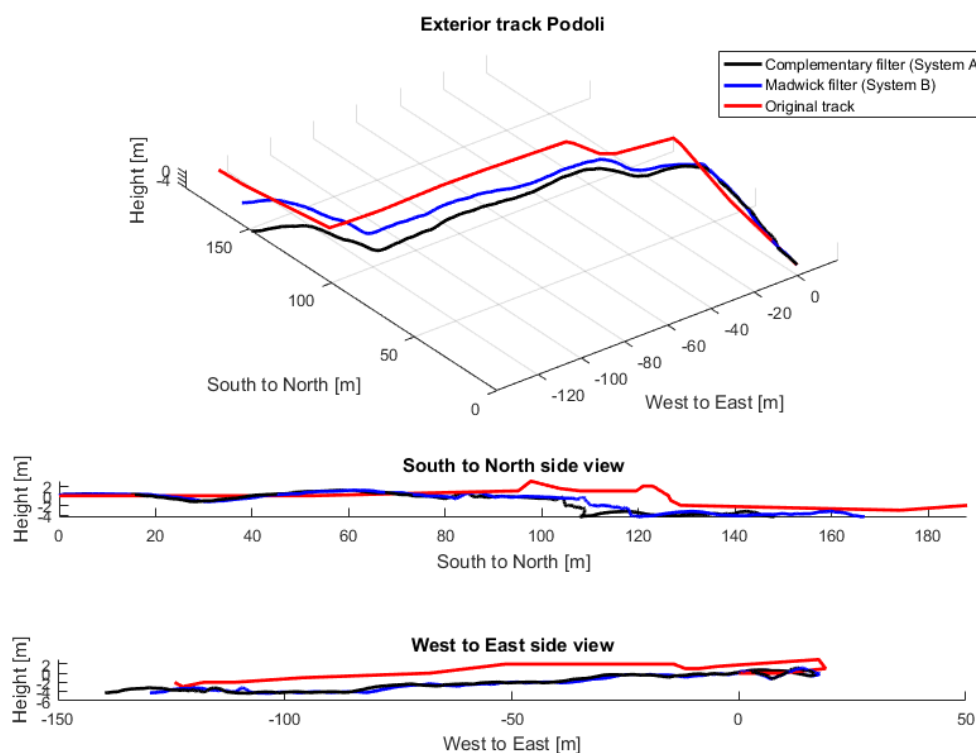
Aplikováním průběžné korekce lze lokalizační systém zpřesnit o minimálně 30 %. Externí zdroj korekce umožní kompenzovat rostoucí nepřesnost určení pozice pomocí odstranění kumulativní chyby v korekčních bodech.

### 3.8.2 Exteriér – Podolí

Trasa v exteriéru v pražském Podolí reprezentuje pohyb chodce městským prostředím po chodníku a mezi domy. Trasa se začíná v ulici Podolská a končí na tramvajové zastávce Podolská vodárna. Výchozí bod a konečný bod byl opět pro všech pět pokusů stejný, případné odchylky na trase byly zapříčiněny aktuální situací na chodníku. Trasa se nachází ve velmi mírném svahu, který se směrem na západ svažuje. Celá trasa byla absolvována pětkrát pro ověření opakovatelnosti měření. Každé měření však bylo provedeno v jiný den.

Cílem měření bylo otestovat funkčnost lokalizačního systému v městském prostředí na ulici a zda systém vrací vždy stejné hodnoty. Pro srovnání výstupu z různých přístrojů byla trasa absolvována i s přístrojem SkyDrop se záznamem trasy pomocí systému GPS.

## Ukázka změřené trasy



Obrázek 44: Změřená trasa

Obrázek výše zobrazuje změřenou trasu pomocí systému A (černá křivka) a systému B (modrá křivka). Červená trasa je rekonstrukce trasy na základě manuálního měření v mapě.

Celé měření bylo pětkrát opakováno a tabulka níže obsahuje podrobná data o změřené trase.

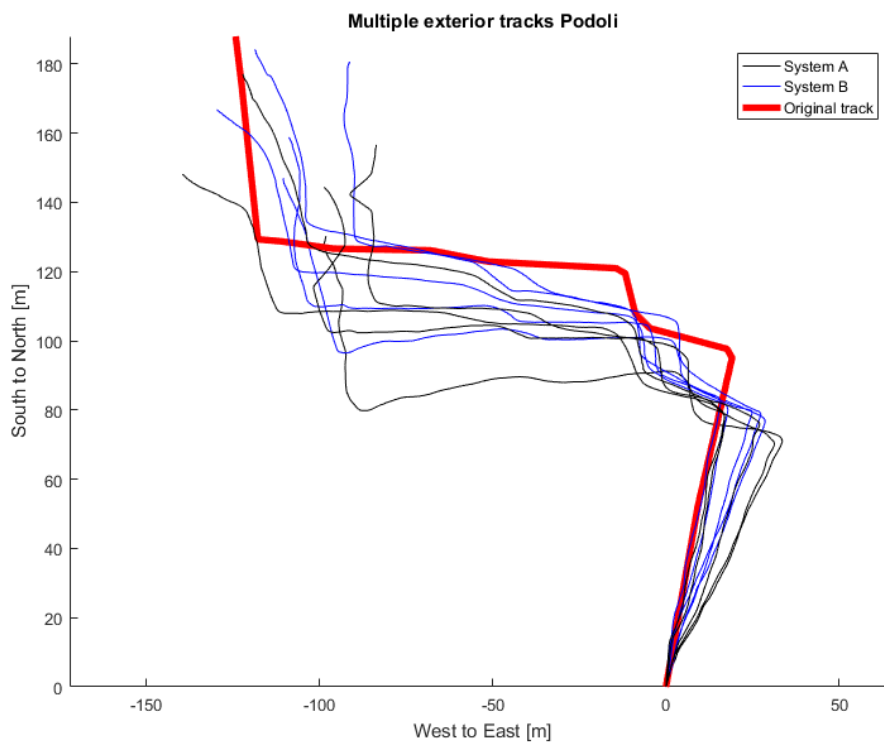
Vyhodnocení trasy Podolí									
Délka trasy [m]	305	Převýšení [m]			-2				
		číslo měření					Střední hodnota	Odchylka	
		1	2	3	4	5			
Počet kroků	A	415	395	394	409	392	401	10,3	
	B	418	407	405	413	398	408,2	7,7	
Celková dráha [m]	A	266,57	266,24	260,95	273,36	272,46	267,92	5,1	
	B	271,68	276,10	272,16	276,85	276,57	274,67	2,5	
Chyba od konečného bodu [m]	A	63,33	50,52	51,24	42,72	11,08	43,78	19,7	
	B	43,20	32,94	33,69	21,91	6,69	27,69	14,0	
Chyba od konečného bodu [%]	A	<b>23,76</b>	<b>18,98</b>	<b>19,64</b>	<b>15,63</b>	<b>4,07</b>	<b>16,41</b>	<b>7,5</b>	
	B	<b>15,90</b>	<b>11,93</b>	<b>12,38</b>	<b>7,91</b>	<b>2,42</b>	<b>10,11</b>	<b>5,1</b>	
Chyba výšky od konečného bodu [%]	A	-3,52	-2,80	-0,67	-2,38	-0,33	-1,94	1,4	
	B	-3,42	-2,84	-0,76	-2,34	-0,31	-1,93	1,3	
Převýšení [m]	A	-5,52	-4,80	-2,67	-4,38	-2,33	-3,94	1,4	
	B	-5,42	-4,84	-2,76	-4,34	-2,31	-3,93	1,3	

Tabulka 30: Podrobná analýza trasy

Za povšimnutí stojí střední hodnota změřené trasy, která se rovná pro systém A 267,92 m a 274,67 m v případě systému B. Tato střední hodnota se liší od skutečné absolvované trasy 305 m o 12,2 % v případě systému A a o 10 % pro systém B.

Střední hodnota chyby konce změřené trasy od skutečného koncového bodu byla pro systém A  $43,78 \pm 19,7$  m, což představuje chybu vzhledem k délce trasy rovnou  $16,41 \pm 7,5$  %. Pro systém B byla střední hodnota chyby  $27,69 \pm 14,00$  m, což představuje chybu vzhledem k délce trasy  $10,11 \pm 5,1$  %.

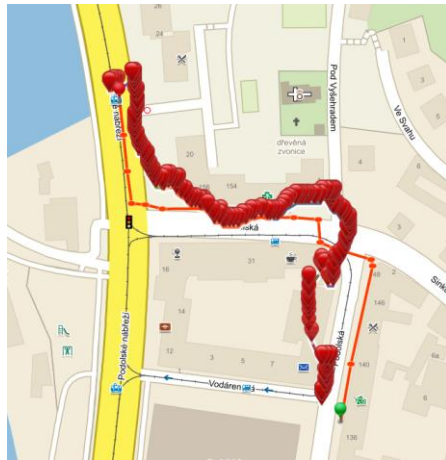
Následující graf reprezentuje všechna provedená měření obou systémů.



**Obrázek 45: Všechna provedená měření na polygonu Podolí**

Vzorová trasa je vykreslena vzhledem ke skutečnému severu, tedy není do ní započítán projev deklinace. Ostatní měřené trasy měří orientaci vzhledem k magnetickému severu, který se od skutečného liší právě deklinací, která se v Praze rovná přibližně  $+3^\circ$ . Odchylna měřených tras od skutečné trasy však stále existuje i po přičtení deklinace ke skutečné trase. V případě systému A jde o odchylku  $\pm 9^\circ$  a v případě systému B je odchylka rovna  $\pm 5^\circ$ .

Přestože rekonstruovaná trasa není dokonalá a přesnost lokalizace uživatele se časem snižuje, ukazuje se, že zaznamenaná trasa je stále přesnější než trasa zaznamenaná pomocí standardní GPS v městském prostředí. Na obrázku níže lze vidět srovnání trasy GPS změřené pomocí přístroje SkyDrop (tučná křivka) a skutečné absolvované trasy (tenká křivka).



**Obrázek 46: Ukázka změřené trasy GPS pomocí SkyDrop**

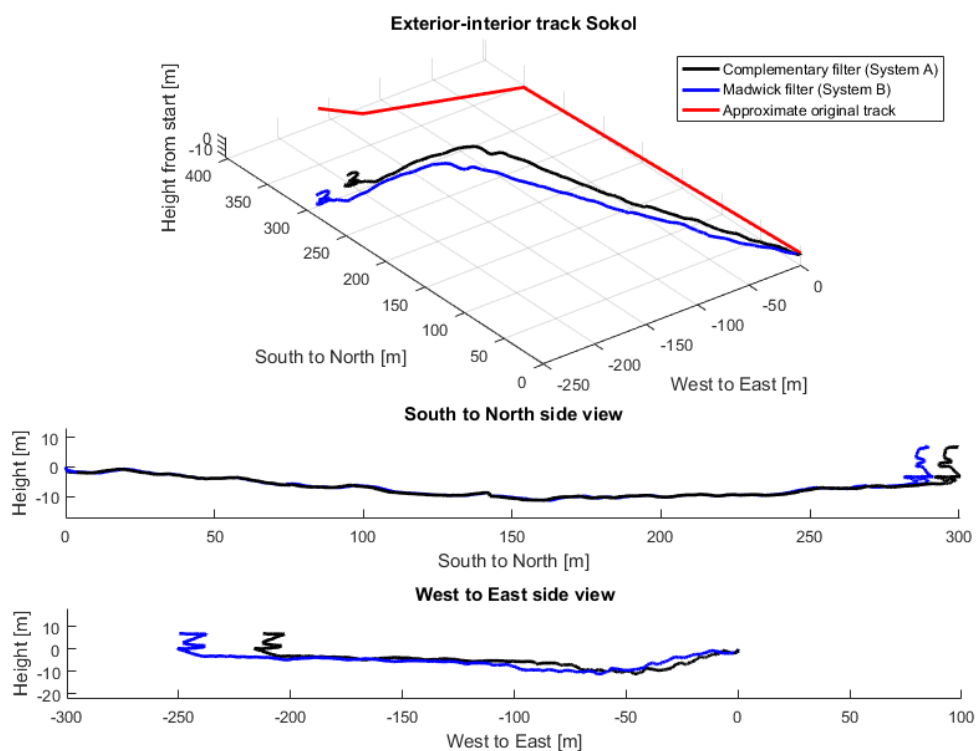
### 3.8.3 Exteriér–interiér – Sokol

Tato trasa měla za cíl demonstrovat funkčnost navrženého lokalizačního systému pro záznam trasy při chůzi městem a po vstupu do budovy. Snahou bylo opět zachovat ve všech případech stejný výchozí a konečný bod. Avšak ve dvou případech z pěti došlo k měření z jiného místa. Tento rozdíl činil zhruba 3 m.

Absolvovaná trasa se skládá z úseků přímé chůze městem a z úseku po vstupu do budovy a vystoupání o tři poschodí. Trasa se nachází na Vinohradech a začíná v okolí zastávky Šumavská a končí v budově vnohradského Sokola. Každé měření trasy bylo absolvováno v jiný den.



## Ukázka změřené trasy



Obrázek 47: Změřená trasa na polygonu Vinohrady

Obrázek výše zobrazuje změřenou trasu pomocí systému A (černá křivka) a systému B (modrá křivka). Červená trasa je rekonstrukce trasy na základě manuálního měření v mapě.

Z horizontálního severojižního průřezu trasy lze dobře pozorovat průběh výšky uživatele. Měřicí trasa se nenachází na dokonale rovné ploše, ale prochází přes malé údolí. Převýšení výchozího místa a dna údolí činí průměrně 10 m. Vystoupaná výška v budově z prvního do třetího podlaží je 12,6 m. Následující tabulka zobrazuje podrobnou analýzu všech pěti měření stejné trasy.

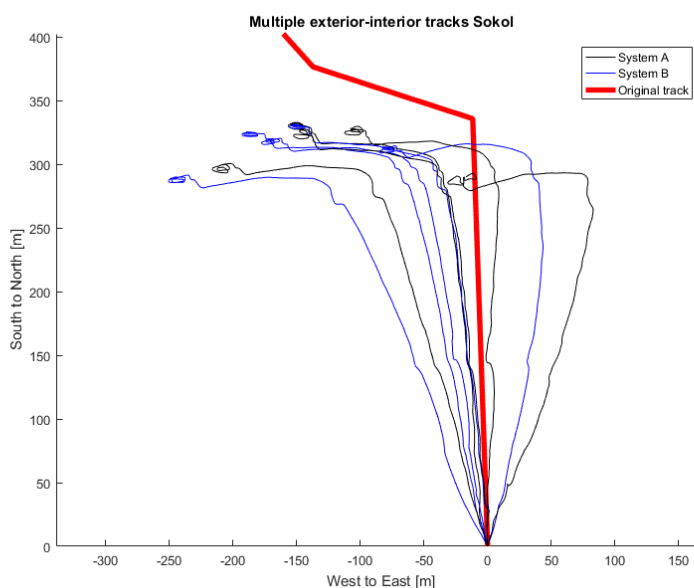
## Vyhodnocení trasy Sokol

		Číslo měření					Střední hodnota	Směrodatná odchylka
		1	2	3	4	5		
Počet kroků	A	708	700	689	689	717	700,6	12,2
	B	716	698	703	698	735	710	15,8
Celková dráha [m]	A	484,52	480,65	475,61	475,50	486,86	480,63	5,1
	B	490,41	480,92	485,26	479,97	499,41	487,19	8,0
Chyba od konečného bodu [m]	A	70,92	91,17	182,46	76,27	116,43	107,45	45,5
	B	83,42	84,81	117,64	72,35	144,66	100,57	29,9
Chyba od konečného bodu [%]	A	<b>14,64</b>	<b>18,97</b>	<b>38,36</b>	<b>16,04</b>	<b>23,91</b>	<b>22,38</b>	<b>9,6</b>
	B	<b>17,01</b>	<b>17,64</b>	<b>24,24</b>	<b>15,07</b>	<b>28,97</b>	<b>20,59</b>	<b>5,8</b>
Převýšení [m]	A	8,00	7,43	7,46	8,70	6,83	7,68	0,7
	B	7,82	7,42	7,53	8,38	6,94	7,62	0,5

Tabulka 31: Podrobná analýza trasy

Za povšimnutí stojí střední hodnota procentuální chyby v určení konečné pozice, která se rovná pro systém A 22,35 % a 20,59 % v případě systému B.

Následující graf reprezentuje všechna provedená měření obou systémů.



Obrázek 48: Všechny změřené trasy na polygonu Vinohrady

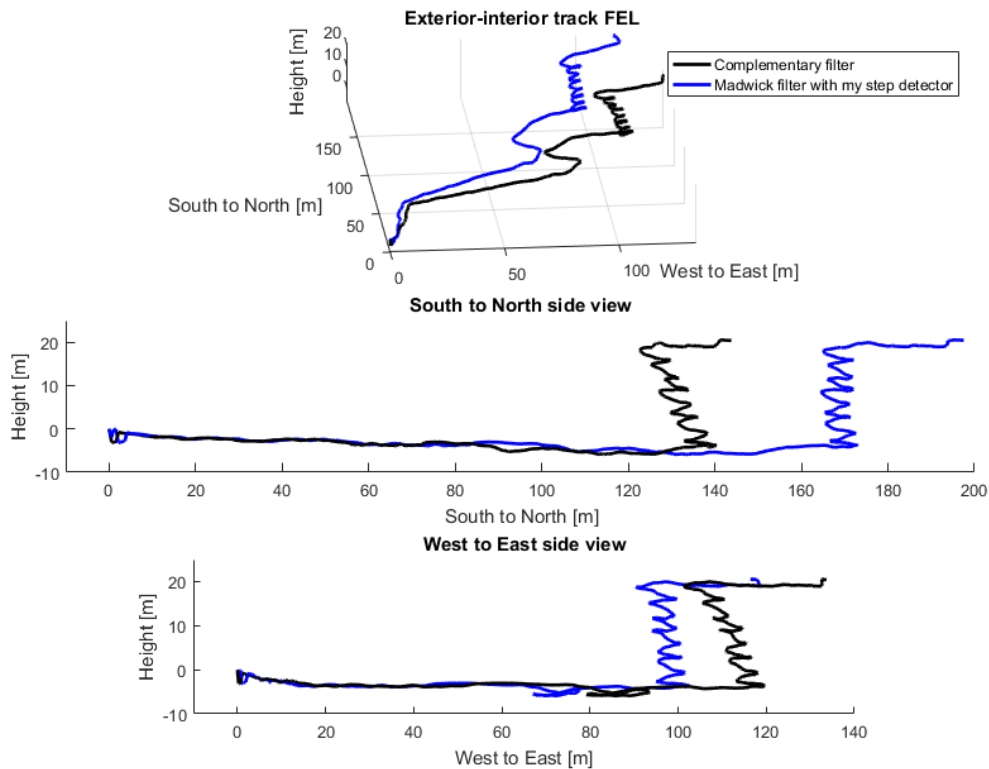
Červená trasa představuje ručně aproximovanou skutečnou trasu. Systém A je vyobrazen černou barvou a systém B modrou barvou. Deklinace magnetického pole od magnetického severu je v tomto případě stejná jako v předchozí trase, avšak rekonstruované trasy se nacházejí v rozsahu  $\pm 22^\circ$  od skutečné trasy.

Tento jev může mít příčinu v několika možných zdrojích. Předně chybu určení orientace a tedy i směru pohybu může zavést sám uživatel, jelikož pro odchylku v jednotkách stupňů stačí malý rozdíl v orientaci zařízení. Dalším možným zdrojem chyb je časová nestabilita magnetického pole na měřené trase. Z grafu lze pozorovat, že měřená přímá vzdálenost je změřena skutečně jako přímá, avšak chybným směrem. To také může být způsobeno nechtěným ovlivněním intenzity

magnetického pole pomocí něčeho, co měl měřící výzkumník u sebe, např. notebook, další mobilní zařízení apod.

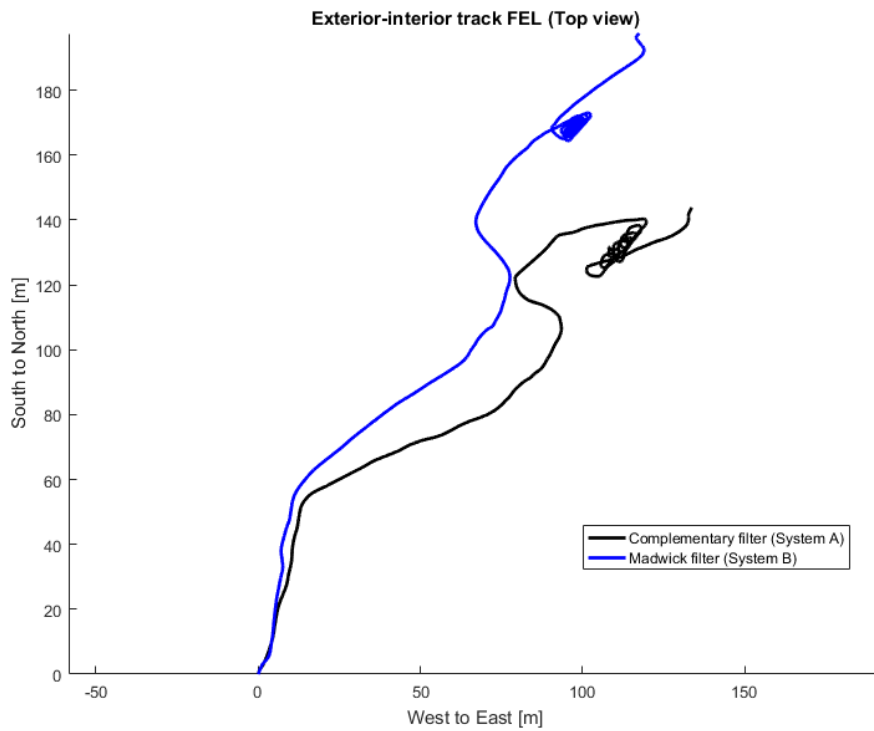
### Ukázka jiné trasy procházející exteriérem a interiérem

Tato trasa se nachází opět v pražských Dejvicích a reprezentuje pohyb uživatele začínající v exteriéru a končící v budově Elektrotechnické fakulty v sedmém patře na katedře telekomunikací.



Obrázek 49: Ukázka trasy exteriér- interiér budova FEL

Na obrázku výše lze dobře vidět trasu uživatele v prostoru při pohybu v exteriéru a poté po vstupu do budovy a absolvování sedmi pater. Po výstupu sedmi pater udává senzor rozdíl výšky  $23,97\text{ m}$  od paty po vrchol schodiště. Skutečný rozdíl výšky přitom činí  $25,2\text{ m}$ . Vliv chyby a magnetického pozadí budovy ovlivňující přesnost určení magnetického severu je patrný na zaznamenané trase pomocí systému A. Na obrázku výše lze spatřit drift hodnoty určení orientace systému A. Tento jev při chůzi po schodech způsobí vychýlení trasy z osy schodiště. Tento jev je také dobře patrný na obrázku níže zachycujícím zaznamenanou trasu z horního pohledu.



Obrázek 50: Ukázka změřené trasy při pohledu shora

### 3.9 Shrnutí výsledků měření

System pracoval s různou přesností a opakovatelností hodnot v závislosti na aktuálním okolním prostředí. Testování algoritmu proběhlo na třech různých lokacích z důvodu otestování různých možných prostředí. První test proběhl na Elektrotechnické fakultě v Dejvicích, kde se opakovaně měřila chůze mezi patry budovy. Druhý test se zaměřil na venkovní prostory, konkrétně ulice v Podolí. Třetí test kombinoval venkovní prostory s interiérem, konkrétně jde o ulice na Vinohradech a budovu Sokolu. Výsledky měření se v závislosti typu trasy liší.

System A funguje v exteriéru a v kontextu trasy v Podolí se střední hodnotou chyby rovnou 16,41 % od skutečné konečné pozice. V kontextu absolvované trasy exteriér-interiér na Vinohradech je tato chyba 22,38 %. Test trasy bez korekcí v interiéru budovy FEL ukázal hodnotu chybného určení konečné pozice 8,55 %.

Vyhodnocení systému B na venkovní trase v Podolí ukázalo střední hodnotu chyby konečné pozice od té skutečné rovnou 10,11 %. Na vinohradské trase procházející exteriérem a interiérem byla tato chyba 20,59 %. Test bez korekcí trasy v budově FEL vykázal hodnotu chybného určení konečné pozice 5,9 %.

Důvodů pro takový rozptyl přesnosti lokalizace systémů může být několik. Zásadní vliv bude mít pravděpodobně fakt, že měření v interiéru Fakulty elektrotechnické se odehrálo v rámci jedné hodiny v jeden den, zatímco měření v exteriérech bylo provedeno v různých dnech. Jelikož určení orientace probíhá u obou systémů na základě měření intenzity magnetického pole a měření kroků probíhá s velkou přesností do 2 %, lze označit původce chyby lokalizace označit časovou nestálost magnetického pole v dané venkovní lokaci. Tyto změny mohou způsobovat pohybující se kovové objekty jako tramvaje, automobily apod. S tímto jevem je nutné při lokalizaci počítat.

Zavedení externího korekčního systému vykázalo zlepšení přesnosti lokalizace v interiéru budovy FEL o několik desítek procent. Konkrétně systém A na trase v budově FEL po aplikaci průběžné korekce pozice přinesl zlepšení střední hodnoty chyby konečné pozice na 5,95 %, tedy zlepšení o 30,5 %. V případě systému B korekce přinesla zlepšení střední hodnoty chyby konečné pozice na 3,24 %, tedy zlepšení o 45,1 %.

## 4 Budoucí výzkum

V této práci navržený lokalizační systém je schopen sledovat pohyb chodce v budovách i exteriérech, avšak s rostoucí chybou v čase. Pro zlepšení a zvýšení přesnosti lokalizačního systému v budoucím použití bude vhodné využít existující externí lokalizační infrastrukturu (GPS, WiFi) umožňující průběžnou korekci určené pozice. Externí lokalizační systém by umožnil korigovat tuto časovou degradaci a zvýšit tak absolutní přesnost a stabilitu lokalizačního systému.

Příklad takového využití může být právě v kombinaci se systémem GPS pro pohyb chodce ve městě. V případě validního určení pozice pomocí systému GPS dojde ke korekci vypočtené pozice. V případě nekvalitního signálu se však použije záznam z lokalizačního algoritmu až do doby, než dojde k opětovnému validnímu určení pozice pomocí GPS.

Další oblastí pro možné zlepšení je vytvoření detekce směru pohybu uživatele v referenčním rámci. Systém vytvořený v rámci výzkumu používal určení orientace na základě orientace zařízení. Aby se však mohl chodec pohybovat i se zařízením v kapse nebo tašce, bude nutné zavést detekci směru pohybu nezávisle na orientaci zařízení. Tato funkce umožní zpřesnění trasy tím, že eliminuje vliv špatného držení zařízení v ruce, zaznamenávající jiný směr než směr pohybu.

Prostor ke zlepšení také poskytuje funkce odhadu délky kroku na základě periody kroku. Zlepšení odhadu délky kroku lze dosáhnout implementací algoritmu rozpoznávajícího chůzi do a z kopce a chůzi do a ze schodů. Toto rozpoznávání by mohlo významně snížit chybu lokalizace po absolvování takového úseku.

V neposlední řadě před nasazením systému do praxe je nutné provést implementaci lokalizačního systému do měřicího zařízení. Aplikace pak umožní v reálném čase sledovat pohyb uživatele a již nebude nutné provádět *offsite* fázi zpracování na PC.

## 5 Závěr

Předmětem této práce byl návrh lokalizačního systému pro určení polohy uživatele s využitím senzorové fúze. Navržený systém využívá čistě prostředky a zdroje mobilního terminálu, bez nutnosti instalace nové infrastruktury.

Po prostudování dostupných materiálů byl vytvořen návrh lokalizačního systému založený na technice *Dead reckoning* a inerciální navigace. Systém pozici chodce rozpoznává na základě určení orientace zařízení v prostoru, detekci kroků a relativního výškoměru.

V praktické části byla vytvořena záznamová aplikace pro testovací mobilní zařízení Samsung Galaxy S4. Tato aplikace provádí záznam dat ze senzorů pro pozdější zpracování. Dále pro implementaci lokalizační architektury byly navrženy dva nezávislé systémy. Systém A využívá určení orientace pomocí fúze gyroskopu s kompasem a také funkci detekce kroků implementovanou v operačním systému Android. Systém B využívá pro určení orientace senzorové fúze pomocí Madgwickova orientačního filtru výstup dat z následujících senzorů – akcelerometru, gyroskopu, a magnetometru. Detekci kroků má na starosti vlastní implementace zpracovávající výstup z akcelerometru. Výškoměr pro určení relativní výšky funguje na principu měření atmosférického tlaku pomocí barometru a je stejný pro systém A i B.

Navržené systémy A i B byly poté otestovány ve třech různých prostředích (interiér, exteriér, kombinace exteriér-interiér). První testovací trasa (interiér) se nacházela v budově Fakultě elektrotechnické. Druhá venkovní trasa (exteriér) se nacházela v Podolí a třetí testovací trasa (exteriér-interiér) se nacházela na Vinohradech a kombinovala chůzi městskými ulicemi a v budově. Podrobný rozbor tras lze nalézt v kapitole 3.8.

Jako efektivnější a přesnější řešení se ukázalo použití systému B, tedy vlastní zpracování dat ze senzorů pomocí Madgwickovo orientačního filtru. Systém B po absolvování trasy měřícího polygonu v budově FEL vykázal střední hodnotu chyby konečné pozice od té skutečné 5,9 %, zatímco systém A vykázal chybu 8,55 %. Po zavedení průběžných korekcí došlo ke zlepšení přesnosti systémů a systém B poté vykázal střední hodnotu chyby 3,24 %, což představuje zlepšení o 45,1 %. Systém A po zavedení korekcí vykázal zlepšení střední chyby na hodnotu 5,95 %, což je zlepšení o 30,5 %. I při vyhodnocení exteriérových tras vykázal systém B vyšší přesnost než systém A.

Pro budoucí výzkum a další zlepšení přesnosti lokalizace bude vhodné vytvořit detekci směru pohybu uživatele. Prostor pro zlepšení také poskytuje modifikace odhadu délky kroků pro případy, kdy uživatel jde z nebo do kopce nebo z či do schodů. Také zavedení externí pravidelné korekce pozice uživatele umožňuje korigovat rostoucí chybu lokalizace v čase a tak lze dosáhnout dlouhodobého sledování pozice uživatele.

## Zdroje

1. FARID, Zahid, NORDIN, Rosdiadee a ISMALL, Mahamod. Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques. *Journal of Computer Networks and Communications*. Volume 2013, 2013.
2. British History in Depth: A History of Navigation. *BBC - History*. [Online] BBC, 2014. [Citace: 1. září 2016.] Dostupné z: [http://www.bbc.co.uk/history/interactive/animations/navigation/index\\_embed.shtml](http://www.bbc.co.uk/history/interactive/animations/navigation/index_embed.shtml).
3. GREVAL, Mohinder S., WEILL, Lawrence R. a ANDREWS, Angus P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2001. ISBN 0-471-20071-9.
4. MAUTZ, Dr. Rainer. *Indoor Positioning Technologies*. Zurich : Institute of Geodesy and Photogrammetry, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zurich, 2013.
5. Tango. *Google Tango*. [Online] Google, 5. Červen 2014. [Citace: 28. srpen 2016.] <https://get.google.com/tango/>.
6. BARANSKI, Przemyslaw, BUJACZ, M. a STRUMILLO, Pawel. Dead reckoning navigation - supplementing pedestrian GPS with an accelerometer-based pedometer and an electronic compass. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2009, Sv. June 2009.
7. FLEISHMAN, Glenn. How the iPhone knows where you are | Macworld. *Macworld.com*. 28. duben 2011 [Online] [Citace: 26. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.macworld.com/article/1159528/smartphones/how-iphone-location-works.html>.
8. DING, Genming et al. Overview of Received Signal Strength based Overview of Received Signal Strength based LAN Environments. *5th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2013.
9. ICT Facts and Figures 2016. *ITU: Committed to connecting the world*. [Online] červen 2016. [Citace: 28. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2016.pdf>.
10. MAZÁNEK, Miloš, PECHAČ, Pavel a VRBA, Jan. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03997-7.
11. GIBBONS, Glen. GPS, GLONASS, Galileo, Compass: What GNSS Race? What Competition. [Online] 23. březen 2009. [Citace: 28. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.insidegnss.com/node/1389>.
12. MALIK, Yasir et al. Mobile Node Localization in Cellular Networks. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*. 2011, Sv. 3, 6.
13. LI, Binghao, DEMPSTER, Andrew D. a RIZOS, Chris. *How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning?* Sydney : International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013.



14. The Straight Dope: Is "dead reckoning" short for "deduced reckoning"? *TheStraightDope.com*. [Online] [Citace: 26. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.straightdope.com/columns/read/2053/is-dead-reckoning-short-for-deduced-reckoning>.
15. HOUSE, Samuel et al. *Indoor Localization Using Pedestrian Dead Reckoning Updated with*. Boston : 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2011.
16. BAKER, Alexi. Longitude Essays. *Cudl.lib.cam.ac.uk/*. [Online] Cambridge Digital Library. [Citace: 28. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/ES-LON-00005>.
17. SIMANEK, Donald. The Chinese South-Pointing Chariot. *lhup.edu*. [Online] Lock Haven University. [Citace: 28. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.lhup.edu/~dsimanek/make-chinese/southpointingcarriage.htm>.
18. Position Sensors | Android Developers. *Developer.Android.com*. [Online] [Citace: 26. prosinec 2016.] Dostupné z: [https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_position.html#sensors-pos-orient](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_position.html#sensors-pos-orient).
19. Technické - Cyklo - Jak seřadit tachometr. *www.pgnext.estranky.cz*. [Online] 12. květen 2010. [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.pgnext.estranky.cz/clanky/technicke/cyklo-jak-seridit-tachometr.html>.
20. LICHTENBERG, Petr. Rychloměry. *lichco.cz*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: [http://www.lichtco.cz/side\\_speed.htm](http://www.lichtco.cz/side_speed.htm).
21. Understanding Euler Angles | CH Robotics. *CHRobotics.com*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>.
22. ČSN 31 0001 (310001) *Letectví a kosmonautika - Terminologie*. 2005.
23. MADGWICK, Sebastian O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *x-io.co.uk*. [Online] 30. duben 2010. [Citace: 29. srpen 2016.] Dostupné z: [http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick\\_internal\\_report.pdf](http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf).
24. Aircraft Navigation Using Pilotage and Dead Reckoning. *ExperimentalAircraftInfo.com*. [Online] [Citace: 30. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.experimentalaircraft.info/flight-planning/pilotage-dead-reckoning.php>.
25. Obor ve filatelii, díl 6. – Staré navigační pomůcky . *Zeměměřič*. 1999, 1+2.
26. LICHTENBERG, Petr. Barometrické výškoměry. *lichtco.cz*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: [http://www.lichtco.cz/side\\_vysk.htm](http://www.lichtco.cz/side_vysk.htm).
27. SUŠÁNEK, Filip. *Určení polohy objektu pomocí kombinace sensorů mobilního telefonu*. Praha : České vysoké učení technické, 2014.
28. WOODMAN, Oliver J. An introduction to inertial navigation. *cl.cam.ac.uk*. [Online] srpen 2007. [Citace: 30. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>. 1476-2986.

29. TopAxyz Inertial Measurement Unit (IMU) | Thales Group. *ThalesGroup.com*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/topaxyz-inertial-measurement-unit-imu>.
30. IMU, what for: performance per application infographic | Thales Group. *ThalesGroup.com*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://www.thalesgroup.com/en/imu-what-performance-application-infographic>.
31. Tango. [Online] Google. [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://get.google.com/tango/>.
32. Motion Tracking | Tango | Google Developers. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://developers.google.com/tango/overview/motion-tracking>.
33. John Lee: Project Tango demo at GPU Technology Conference 2014. [Online] 26. březen 2014. [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iiM4X7wW5C0>.
34. Android Fragmentation Report August 2015 - Open Signal. *OpenSignal.com*. [Online] srpen 2015. [Citace: 27. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://opensignal.com/reports/2015/08/android-fragmentation/>.
35. Samsung I9506 Galaxy S IV - Full Phone Specification. *GSMarena*. [Online] [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: [http://www.gsmarena.com/samsung\\_i9506\\_galaxy\\_s4-5542.php](http://www.gsmarena.com/samsung_i9506_galaxy_s4-5542.php).
36. Samsung Galaxy S IV review - CNET. *CNET*. [Online] 23. duben 2013. [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.cnet.com/products/samsung-galaxy-s4/>.
37. Samsung Galaxy S7 vs Samsung Galaxy S4 - Phone specs comparison. *Phone Area*. [Online] [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.phonearena.com/phones/compare/Samsung-Galaxy-S7,Samsung-Galaxy-S4/phones/9817,7597>.
38. Samsung Galaxy S4 LTE I9506 - Heureka.cz. *Heureka.cz*. [Online] [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://mobilni-telefony.heureka.cz/samsung-galaxy-s4-lte-i9506/>.
39. KOVACH, Steve. History of Android - Business Insider. *Business Insider*. [Online] 13. srpen 2013. [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.businessinsider.com/history-of-android-2013-8>.
40. MYSLIVEČEK, David. Krátké ohlédnutí za historií Androidu - Svět Androida. *Svět Androida*. [Online] 11. květen 2013. [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.svetandroida.cz/kratke-ohlédnutí-za-historii-androidu-201305>.
41. SWINDER, Matt a PECKAM, James. Android Nougat release date: when you'll get it and everything you need to know. *techradar.com*. [Online] 28. srpen 2016. [Citace: 29. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.techradar.com/news/phone-and-communications/mobile-phones/android-7-what-we-want-to-see-1311290>.
42. Smartphone OS Market Share 2015, 2014, 2013 and 2012. *IDC*. [Online] srpen 2015. [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.idc.com/prodserv/smartphone-os-market-share.jsp>.

43. Android development with Android Studio - Tutorial. *Vogella*. [Online] 20. červen 2016. [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://www.vogella.com/tutorials/Android/article.html>.
44. Application Fundamentals | Android Developers. *Developer.Android.com*. [Online] [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <https://developer.android.com/guide/components/fundamentals.html>.
45. CHLUP, Vladimír. ART vs. Dalvik aneb bitva uvnitř Androidu - Mobilizujeme.cz. *Mobilizujeme*. [Online] 11. listopad 2103. [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: <http://mobilizujeme.cz/clanky/art-vs-dalvik-aneb-bitva-uvnitř-androidu/>.
46. Samsung I9500 Galaxy S4 - Full phone specification. *GSMarena*. [Online] [Citace: 1. srpen 2016.] Dostupné z: [http://www.gsmarena.com/samsung\\_i9500\\_galaxy\\_s4-5125.php](http://www.gsmarena.com/samsung_i9500_galaxy_s4-5125.php).
47. INNOVENTIONS, Inc. Sensor Kinetics. *Google Play*. [Online] Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.innoventions.sensorkinetics>.
48. Motion Sensors | Android Developers. *Developer.Android.com*. [Online] [Citace: 27. prosinec 2016.] Dostupné z: [https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_motion.html](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html).
49. Android: Gyroscope Basics. *KirchElectronics.com*. [Online] [Citace: 26. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.kircherelectronics.com/blog/index.php/11-android/sensors/15-android-gyroscope-basics>.
50. YAS532B MS-3R Magnetic Field Sensor Type 3R. *Download.Yamaha.com*. [Online] [Citace: 27. prosinec 2016.] Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj7-v3lsZXRAhXFPxoKHalHDfoQFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fdownload.yamaha.com%2Ffile%2F52799&usq=AFQjCNF3XUpXigGH6lOpnCK86EWiZjQ7Xg>.
51. Sensors Overview | Android Developers. *Developer.Android.com*. [Online] [Citace: 27. prosinec 2016.] Dostupné z: [https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_overview.html#sensors-intro](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html#sensors-intro).
52. Sensor | Android Developers. *Developer.Android.com*. [Online] [Citace: 26. prosinec 2016.] Dostupné z: [https://developer.android.com/reference/android/hardware/Sensor.html#TYPE\\_STEP\\_DETECTOR](https://developer.android.com/reference/android/hardware/Sensor.html#TYPE_STEP_DETECTOR).
53. SHALA, Ubejd a RODRIGUEZ, Angel. *Indoor Positioning using Sensor-fusion in Android Devices*. Kristianstad : School of Health and Society, Kristianstad University, 2011.
54. ELMENREICH, Wilfried. *Sensor Fusion in Time-Triggered Systems*. Vídeň : Vienna University of Technology, Department of Computer Engineering, 2002.
55. OlliW's Bastelseiten » IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter. *OlliW's Bastelseiten*. [Online] 17. září 2013. [Citace: 29. prosinec 2016.] Dostupné z: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/>.
56. WELCH, Greg a BISHOP, Gary. *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill : University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, 2006.

57. MathWorks. MATLAB & Simulink. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
58. PAI, Deepak et al. *Padati: A Robust Pedestrian Dead Reckoning system on smartphones*. místo neznámé : 2012 IEEE 11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, 2012.
59. LEVI, Robert W. a JUDD, Thomas. *Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts*. U.S. Patent Number 5,583,776 10. prosinec 1996.
60. DVOŘÁK, Petr. Složení atmosféry. Vodní pára. Tlak a hustota vzduchu. *AVIMET - Odbor letecké meteorologie Českého hydrometeorologického ústavu*. [Online] 20. prosinec 2008. [Citace: 29. prosinec 2016.] <http://www.avimet.cz/index.php?id=read&idd=1229740936>.
61. YOUSEFF, Moustafa a AGRAWALA, Ashok Kumar. The Horus WLAN location determination system. *Wireless Networks*. 2005.
62. FANG, Shih Hau a LIN, Tsung Nan. *Accurate WLAN Indoor Localization Based on RSS Fluctuations Modeling*. Budapešť : WISP 2009 • 6th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2009.
63. MEHMOOD, H. a TRIPATHI, N. K. *Hybrid Positioning Systems: A Review*. místo neznámé : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.
64. Sachs, David. Google Tech Talk: Sensor Fusion on Android Devices: A Revolution in Motion Processing. *YouTube.com*. [Online] 2. srpen 2010. [Citace: 20. srpen 2016.] <http://www.youtube.com/watch?v=C7JQ7Rpwn2k>.
65. Meteostanice - Praha 6, Strahov. *In-Pocasi.cz*. [Online] [Citace: 29. prosinec 2016.] <http://www.in-pocasi.cz/meteostanice/stanice-historie.php?stanice=praha&historie=01-17-2016>.