

Metody a systémy navigace ve vnitřních prostorách

Methods and systems for interior navigation

Karel Koplík



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel Koplík**
Osobní číslo: **A11401**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Metody a systémy navigace ve vnitřních prostorech**

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte známé metody navigace ve vnitřních prostorech.
2. Zaměřte se na inerciální navigaci s využitím senzorů polohy, zrychlení, magnetického pole s inicializací pomocí GPS.
3. Prostudujte metody filtrace chybných hodnot senzorů, jejichž použití je při inerciální navigaci nezbytné.
4. Implementujte prototyp aplikace s inerciální navigací pro OS Android.
5. Zvažte možnost zpřesnění určení polohy pomocí geolokačního API OS Android, které využívá mapy síly signálů GSM a wifi sítě.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. GREWAL, Mohinder S, Lawrence R WEILL a Angus P ANDREWS. Global positioning systems, inertial navigation, and integration. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007, xxvi, 525 p. ISBN 978-047-0041-901.
2. GROVES, Paul D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Boston: Artech House, 2008, xvi, 518 p. GNSS technology and applications series. ISBN 978-1-58053-255-6.
3. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on. 2010. ISBN 978-142-4458-622.
4. MILETTE, Greg. Professional Android sensor programming. Indianapolis: Wiley, 2012, xxxiii, 517 s. ISBN 978-1-118-18348-9.
5. Proceedings of the 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services. New York, NY: ACM. ISBN 978-145-0307-840.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Dulík, Ph.D.

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání diplomové práce:

22. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

22. května 2013

Ve Zlíně dne 22. února 2013



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Co dělat, když je potřebné znát svou polohu v místě, které není přístupné signálu GPS? Jaké jsou možnosti? Jaké jsou stávající metody a jak je můžeme využít? Předně je potřeba znát způsoby, jak alternativně určovat svou polohu zejména ve vnitřních prostorech a jaké výhody či nevýhody tato řešení mají. Cílem je učinit porovnání mezi nimi a metodou inerciální navigace, která se nabízí zejména kvůli své nezávislosti na doplňkových vysílačích a nízké spotřebě energie. Součástí je aplikace pro operační systém Android, která inerciální navigaci využívá k odhadování uživatelské polohy, již odesílá na vzdálený server.

Klíčová slova: Inerciální navigace, Android OS, akcelerometr, magnetometr, gyroskop

SUMMARY

What if we need to know our position at location, where there's no signal of GPS? What options we have? What are the existing methods and how can we use them? Firstly, we need to know all alternatives of positioning in such situations and what are their pros and cons. The goal is to compare them with method of inertial navigation, which is special for no need of external transmitters and low energy consumption. Part of this is an application for Android operating system, which uses inertial navigation to estimate position of pedestrians and sends it to a remote server.

Keywords: Inertial Navigation, Android OS, accelerometer, magnetometer, gyroscope

MOTTO

„Možná jsem nedošel, kam jsem jít chtěl, ale myslím, že jsem skončil tam, kde jsem chtěl být.“

Douglas Adams

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Tomáši Dulíkovi, Ph.D. za věnovaný čas a odborné vedení mé diplomové práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1 OBECNÝ POPIS NAVIGACE VE VNITŘNÍCH PROSTORÁCH	13
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY	13
1.1.1 Lokalizace	13
1.1.2 Zjišťování pozice	13
1.1.3 Sledování polohy	13
1.2 SROVNÁNÍ S NAVIGACÍ VE VNĚJŠÍCH PROSTORÁCH	13
1.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ	14
1.3.1 Navigace ve specializovaných budovách	14
1.3.2 Navigace slabozrakých a nevidomých	14
1.3.3 Sledování polohy osob v neznámém prostředí	14
1.3.4 Rozšířená realita	15
2 RŮZNÉ KONCEPTY NAVIGACE VE VNITŘNÍCH PROSTORÁCH	16
2.1 KONCEPT ZÚŽENÝCH BODŮ	16
2.2 KONCEPT MŘÍŽKY	16
2.3 KONCEPT SENZORŮ S VĚTŠÍM ROZSAHEM	16
2.4 KONCEPT PŘÍCHOZÍHO ÚHLU	16
2.5 KONCEPT ČASU PŘÍCHODU	16
2.6 KONCEPT SÍLY SIGNÁLU	16
2.7 INERCIÁLNÍ NAVIGACE	17
3 PŘÍKLADY SOUČASNÝCH TECHNOLOGIÍ	18
3.1 HIGH SENSITIVITY GPS	18
3.2 GOOGLE MAPS	18
3.3 SYSTÉM GLOPOS	19
4 INERCIÁLNÍ NAVIGACE	20
4.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP	20
4.2 AKCELEROMETR	20
4.2.1 Teorie relativity	20
4.2.2 Volný pád	21
4.2.3 Vlastní zrychlení	21
4.2.4 Princip akcelerometru	22
4.2.5 Provedení akcelerometru	22
4.3 GYROSKOP	23
4.3.1 Moment síly	23
4.3.2 Dvojice sil	23

4.3.3	Precese.....	23
4.3.4	Moment setrvačnosti.....	24
4.3.5	Moment hybnosti.....	24
4.3.6	Princip gyroskopu.....	24
4.3.7	Provedení gyroskopu.....	25
4.4	MAGNETOMETR.....	26
4.4.1	Magnetické pole.....	26
4.4.2	Magnetické pole planet.....	27
4.4.3	Magnetické pole Země.....	27
4.4.4	Magnetometr jako kompas.....	27
4.4.5	Provedení magnetometru.....	28
4.5	ZPRACOVÁNÍ DAT.....	28
4.5.1	Určení orientace.....	28
4.5.2	Určení směru pohybu.....	29
4.6	ZPŘESŇOVÁNÍ POLOHY.....	29
5	FILTRAČNÍ METODY	31
5.1	DOLNÍ PROPUST.....	31
5.2	HORNÍ PROPUST.....	31
5.3	KOMPLEMENTÁRNÍ FILTR.....	31
5.4	PRŮMĚROVÁNÍ DAT.....	32
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	34
6	APLIKAČNÍ ROZHRANÍ SYSTÉMU ANDROID	35
6.1	PRÁCE SE SENZORY.....	35
6.1.1	Celkové zrychlení.....	36
6.1.2	Gravitační zrychlení.....	36
6.1.3	Lineární zrychlení.....	36
6.1.4	Okamžitá úhlová rychlost.....	37
6.1.5	Magnetické pole.....	37
6.1.6	Orientace.....	38
7	POUŽITÉ ALGORITMY	39
7.1	KROKOMĚR.....	39
7.2	URČENÍ AZIMUTU.....	40
7.3	ODESÍLÁNÍ POLOHY.....	43
8	POPIS SOFTWARE	45
8.1	APLIKAČNÍ MENU.....	45
8.1.1	Dostupné senzory.....	45
8.1.2	Poskytovatelé polohy.....	46
8.1.3	Data senzorů.....	47
8.1.4	Ciferníky.....	47

8.1.5	Kalibrace.....	48
8.1.6	Kalkulátor.....	49
8.1.7	Lokální mapa.....	49
8.1.8	Služba Odesílání polohy.....	50
8.1.9	Seznam uživatelů.....	50
8.1.10	Seznam poloh.....	51
8.2	WIDGET.....	51
8.3	NASTAVENÍ.....	52
9	PRAKTICKÉ UKÁZKY	54
9.1	DEMONSTRACE FUNKCE KROKOMĚRU.....	54
9.2	DEMONSTRACE SPOLEHLIVOSTI KROKOMĚRU A AZIMUTU.....	55
9.3	INERCIÁLNÍ NAVIGACE.....	56
	ZÁVĚR	57
	CONCLUSION	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	63
	SEZNAM ILUSTRACÍ	64
	SEZNAM TABULEK	65
	SEZNAM PŘÍLOH	66

ÚVOD

S rozvojem chytrých mobilních zařízení přicházejí nové možnosti a také nové požadavky. V době, kdy je běžným spotřebitelům dostupná možnost využívat satelitních signálů k určování polohy a navigaci, si lidé stále více zvykají na možnost nechat se někam dovést podle mapy, kterou si stáhnou z internetu až v momentě, kdy ji potřebují. Tento komfort má však své hranice: Ne vždy jsou externí zdroje těchto informací dostupné. Zatímco však internetové připojení se dá získat prakticky kdekoli, kde je signál mobilní sítě (a mapu můžeme mít i předem připravenou), satelitní navigace se stává nemožnou třeba jen kvůli malému výkonu přijímače anebo slabému signálu, což je obecně spojováno se vstupem do budov (i když mnohdy signál slábne také proto, že se nemá k přijímači jak dostat přes vysoké překážky).

Řešení přitom již dávno existují. Navigační systémy, jež mají většinou původ v oblasti armádního výzkumu, se neomezují jen na signál ze vzdáleného vysílače. Především rakety a řízené střely se spoléhají na vnitřní senzory, podle kterých odhadují svou orientaci v prostoru, zrychlení, rychlost i uraženou vzdálenost.

Cílem této práce proto bude vyvinout podle známých principů co nejlepší řešení, které bude odpovídat potřebám běžných spotřebitelů, konkrétně uživatelům zařízení s operačním systémem Android. Práce je přitom součástí většího projektu, jehož cílem je odesílat a sledovat polohu jednotlivých členů zásahového týmu.

Hlavní pozornost budeme přitom věnovat navigaci inerciální, jež určuje polohu právě pomocí senzorů, avšak budeme se zabývat i jinými metodami a porovnávat jejich výhody a nevýhody. Již teď se hodí říct, že inerciální navigace je zajímavá kvůli menší spotřebě energie a nezávislosti na vnějších zdrojích, ale hodí se opravdu k tomu, aby jí využívaly profese, u kterých jde hlavně o bezpečnost?

Abychom mohli celou problematiku řádně obsáhnout, musíme se zabývat i fyzikální podstatou a vlastnostmi zmiňovaných senzorů, s ohledem na spolehlivost informací, které z nich můžeme vyčíst. Velká část jejich spolehlivosti přitom závisí na tom, jaké matematické nástroje a programovací algoritmy k tomu použijeme. Blíže se podíváme na filtraci dat a další práci s nimi.

Nakonec si ukážeme, jak to celé vypadá v praxi, kdy je aplikace hotová, jaké jsou principy její funkce, jak se s ní doporučuje pracovat a jakému použití se naopak vyhnout. V závěru si shrneme, v čem spočívají největší problémy, na které jsme v průběhu vývoje i následném testování narazili.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÝ POPIS NAVIGACE VE VNITŘNÍCH PROSTORÁCH

1.1 Základní pojmy

1.1.1 Lokalizace

Proces lokalizace si klade za cíl určit, zda se daný objekt nachází v omezeném prostoru.

1.1.2 Zjišťování pozice

Při zjišťování pozice nám jde o určení více či méně přesných souřadnic objektu, o jehož pozici dopředu nic nevíme.

1.1.3 Sledování polohy

Sledování polohy se používá tam, kde se pozice objektu může měnit v čase. Sem spadá i navigace.

1.2 Srovnání s navigací ve vnějších prostorách

Navigace ve vnitřních prostorách je vlastně věc současná, takže se nedá tak úplně hovořit o nějaké její historii. V této souvislosti vlastně můžeme mluvit pouze o tom, že navazuje na navigaci ve vnějším prostředí.

Zde potom platí, že ve vnějším prostředí se využívá satelitních signálů a navigační dotazy jsou mnohem jednodušeji formulovatelné. Například, chceme-li se dostat z bodu A do bodu B, zvolíme naše současné souřadnice (zjištěné přijímačem satelitního signálu) jako bod A, a jako bod B uvedeme například jiné souřadnice, adresu, nebo třeba jen název města či obchodního řetězce.

Pokud ale chceme formulovat dotaz pro systém určený k navigaci v určité budově, situace se zkomplikuje. V první řadě se může stát, že tento systém bude natolik specifický, že jej bude možné plně využít jen v jedné jediné budově. Existují sice i systémy univerzální, jako například Google Maps, ale proč si neulehčit život tím, že například dáme návštěvníkům knihovny možnost najít si knihu v katalogu podle zadaných parametrů a následně se nechat dovést až k příslušné polici, nebo umožníme studentům, aby byli podle svého aktuálního rozvrhu dovedeni do správné učebny, aniž by znali přesný název místnosti a předmětu?

1.3 Možnosti využití

1.3.1 Navigace ve specializovaných budovách

Je stále více žádaným doplňkem stávající satelitní navigace, která však v uzavřeném prostředí není možná kvůli slabému signálu. Poloha se dá zjišťovat pomocí signálů WiFi a pohybových a polohových senzorů v chytrých telefonech. Častým doplňkem bývají také RFID či NFC tagy, Bluetooth nebo QR-kódy rozmístěné po budově, což ovšem vyžaduje specializovaný systém navigace.

K hlavním oblastem využití patří

- školy
- obchodní domy a samostatné obchody
- letiště
- knihovny
- nemocnice
- skladiště

1.3.2 Navigace slabozrakých a nevidomých

Přestože klasická slepecká hůl se pro účel orientace v prostoru hodí stále nejlépe, vyvíjejí se v dnešní době také systémy, které slabozrakým a nevidomým mohou poskytovat další informace, jako například kde přesně se nacházejí, kudy mají jít, na co si dát pozor.

Cena přitom nemusí být hned velmi vysoká. Pro základní orientaci stačí senzory chytrých telefonů, u kterých se přesnost pohybuje kolem 1 až 2 metrů.¹ [8]

1.3.3 Sledování polohy osob v neznámém prostředí

Speciálním využitím je sledování polohy členů týmu určeného pro krizové situace, jako jsou hasiči, policie, armáda. Jde přitom hlavně o bezpečnost těchto osob, takže je nutné, aby byla poloha určena co nejpřesnější. Významným rozdílem je, že zařízení není možné držet v ruce v předepsané poloze, a tudíž se komplikuje určování směru pohybu relativně ke světovým souřadnicím.

¹ Týká se navigačních algoritmů, u kterých je předem známý start i cíl.

1.3.4 Rozšířená realita

Rozšířená realita nachází své uplatnění při zjišťování doplňkových informací o tom, co je snímáno kamerou. Můžeme tak nalézt poličku s knihou v knihovně nebo třeba přátele ze sociální sítě. Nejedná se přitom o počítačové vidění, ale o kombinaci obrazu reálného světa, znalosti polohy a natočení kamery a polohy věcí či osob v okolí.

2 RŮZNÉ KONCEPTY NAVIGACE VE VNITŘNÍCH PROSTORÁCH

2.1 Koncept zúžených bodů

V angličtině se používá pojem Choke Point, doslova škrtící body, tedy body, kterými je nutné projít, jako například když lidé procházejí chodbou při přesunu z jedné velké místnosti do druhé. Právě v těchto zúžených místech jsou pak umístěny pasivní systémy jako RFID, jejichž funkcí není měřit sílu signálu a dopočítávat souřadnice, ale jednoduše propojit identitu toho, kdo kolem nich prošel, s jejich napevno danou pozicí a aktuálním časem.

2.2 Koncept mřížky

Platí totéž, co v předchozím případě, jenom s rozdílem, že místo zúžených míst se stanice rozmísťují v pravidelných rozestupech, tedy v mřížce.

2.3 Koncept senzorů s větším rozsahem

Často stačí jeden senzor, který svou činností pokrývá celé patro, díky tomu, že může měřit úhel a vzdálenost objektů zjišťujících polohu. V případě, že umí vyhodnotit pouze vzdálenost, je potřeba více senzorů, podobně jako je u GPS potřeba více satelitů.

2.4 Koncept příchozího úhlu

Senzor obsahuje více antén umístěných v řadě, které přijímají stejný signál. Podle časového rozdílu na jednotlivých anténách se určí úhel.

2.5 Koncept času příchodu

Cílem je měřit vzdálenost pomocí doby, za kterou ji signál urazí. Stejný princip využívá GPS. Doba se vypočítává z informace obsažené v signálu a času příchodu na přijímač.

2.6 Koncept síly signálu

Zákon převrácených čtverců nám říká, že intenzita signálu klesá se čtvercem vzdálenosti přijímače od vysílače. Je tedy možné vzdálenost určit pouze z toho, že známe sílu signálu.

2.7 Inerciální navigace

U tohoto typu navigace jsou senzory umístěny pouze na pohybujícím se objektu. Příkladem může být krokoměr, který vyhodnocuje otřesy, nebo senzor umístěný v obuvi. Používané senzory jsou tyto tři: akcelerometr, magnetometr, gyroskop, ale je možné si vystačit pouze s prvními dvěma. Více podrobností bude uvedeno v kapitole 4 a dále.

3 PŘÍKLADY SOUČASNÝCH TECHNOLOGIÍ

3.1 High Sensitivity GPS

Technologie High Sensitivity GPS využívá přijímačů s vysokou citlivostí k tomu, že je schopna efektivněji pracovat jak se silným satelitním signálem, tak se slabým. V prvním případě se výrazně zkracuje $TTFF^2$, což je doba, za kterou dojde k prvnímu určení souřadnic od spuštění procesu hledání a přijímání satelitních dat. V druhém případě je možné určit polohu i ze signálu, který běžný přijímač není chopen ani zaměřit.

Základní princip GPS je přitom zjednodušeně takovýto: Na zemi se nacházejí stanice $GBAS^3$, jejichž poloha se nemění. Tyto stanice slouží jako referenční body pro satelity, které podle nich určují svoji polohu vůči světovým souřadnicím. Kromě toho satelity také disponují atomovými hodinami, takže pak mohou vysílat informaci jak o své pozici, tak o příslušném čase.

Komunikace je jednosměrná. Není tedy nutné se obávat, že používáním GPS někomu poskytneme informace o všech našich cestách, jak by se snad mohl domnívat někdo mající zálibu v konspiračních teoriích. Na druhou stranu, pokud se připojujeme s naším GPS přijímačem k internetu, abychom si například stáhli aktuální políčko na mapě, tyto informace o sobě poskytovat musíme. Zda si je poskytovatel map uchovává a nějak dále zpracovává už je věcí podmínek používání daného softwaru.

Dříve než se však můžeme začít obávat o naše soukromí potřebujeme data o naší poloze nějakým způsobem získat a zpracovat. Snad každý, kdo někdy používal GPS, ví, že doba $TTFF$ bývá podle podmínek někdy i velmi dlouhá. Je to způsobeno tím, že slabší signál je těžké vůbec zachytit a rozpoznat. Ve chvíli, kdy je signál ze satelitů přečten, je to už jenom otázka matematiky. Ze tří satelitů se dají určit zeměpisná šířka a délka, ze čtyř i nadmořská výška.

Vysoce citlivé vysílače jsou charakteristické tím, že mají lepší vybavení pro zpracování digitálních signálů a díky většímu výkonu mohou zachytit i signál 1000 slabší, než jaký zachytí běžný přijímač.

3.2 Google Maps

Od verze 6.0 je aplikaci Google Maps možné použít také pro navigaci v některých obchodních domech a na letištích. V době psaní této práce jsou dostupné mapy alespoň

² Z anglického „time to first fix“

³ Ground Based Augmentation Systems

některých vnitřních prostor na území celkem 7 zemí světa, celkově asi 10 000 míst, do budoucna by jich mělo přibývat.

Oproti předchozím verzím je po novu možné například najít kýžený letištní terminál či pult oblíbeného rychlého občerstvení. Procházet mapu se dá po patrech a každé důležité místo (včetně východů, toalet apod.) je v ní zaznačeno podobně jako jsou na klasické mapě značeny například budovy obchodů nebo úřadů. Funguje při tom jak vyhledávání, tak navigace.

Co se týká určování aktuální polohy, používají se bezdrátové sítě WiFi, v případě dostupnosti i GPS. Záleží to hlavně tom, co které zařízení s běžící aplikací podporuje, takže je klidně možné, že výše jmenované není jediným prostředkem.

3.3 Systém GloPos

je poměrně nové řešení určování polohy ve vnitřních prostorech, které využívá signálu mobilní sítě, protože ten je častěji dostupný, často i v podzemí. Jakýkoliv mobilní telefon tak může poslat speciální požadavek, který zpracuje operátor – operátor jej musí umět rozpoznat – a zbytek už je obyčejná triangulace. Tedy ne úplně. Zpracovat příslušná data je tou nejnáročnější částí (obsahuje i proces učení, pro zvýšení přesnosti) a společnost GloPos si svou technologii nechala patentovat na území EU a USA. Přesnost uvádí 7,7 až 12,5 metrů. [7]

4 INERCIÁLNÍ NAVIGACE

4.1 Základní princip

České slovo inerciální je odvozeno z anglického *inertial*, které bylo odvozeno ze slova *inertia*, jež si poprvé vypůjčil z latiny německý matematik, fyzik a astronom Johannes Kepler. V latině toto slovo znamená pasivní, nečinné. V přeneseném významu se používá pro setrvačnost, pomocí které se pohybují vesmírná tělesa (první Newtonův zákon).

Inerciální navigace využívá principu setrvačnosti k určování polohy pohybujícího se tělesa. K tomu jí slouží pohybové senzory. Kromě nich používá ještě také senzory polohy, jichž využívá k určení natočení tělesa a tedy i pohybových senzorů k němu připevněných.

Pozornému čtenáři jistě neujde, že aby tento způsob navigace byl vůbec možný, musíme na začátku nějakým způsobem zjistit, kde se dané těleso nachází. K tomu většinou slouží informace přijatá z GPS nebo ručně zadané souřadnice.

V následující části této kapitoly si podrobně probereme **technologické prostředky** (senzory), bez kterých by inerciální navigace nebyla možná, a vysvětlíme si, na jakých pracují principech.

4.2 Akcelerometr

Akcelerometr je senzor pohybu, který měří vlastní zrychlení tělesa. Abychom lépe pochopili, co se tím myslí, musíme si nejprve projít některé fyzikální pojmy.

4.2.1 Teorie relativity

Teorie relativity, jak asi většina lidí ví, hovoří o tom, že pohyb je potřeba brát relativně k pozorovateli, jelikož je možné, že například dvě tělesa jsou vůči sobě v klidu, zatímco vůči třetímu jsou v pohybu. To se dá ilustrovat lidmi, kteří se na sebe dívají z jednoho auta do druhého a mohou se třeba i dorozumívat pomocí posunků, jelikož jim ten druhý nikam neujede (jsou vůči sobě v klidu), zatímco ve vztahu k vozovce se obě auta pohybují (v tomto případě stejnou rychlostí).

Teorie relativity se pak dále dělí na dvě: obecnou a speciální. Ta speciální říká, že dva pozorovatelé, kteří se vůči sobě pohybují rovnoměrným, přímočarým pohybem, jsou si rovnocenní, tedy že oba mohou klidně říct: „Já jsem v klidu, to ty se pohybuješ.“ Obecná teorie relativity říká vlastně totéž, jen se už neomezuje na rovnoměrný, přímočarý pohyb.

Pro naše účely je důležité si z teorie relativity odnést hlavně to, jak se staví ke gravitaci. Gravitační a setrvačné síly jsou si ekvivalentní (popisují se stejnými zákony). Protože však setrvačnost je stav, ve kterém na těleso nepůsobí žádná síla a ono se přesto pohybuje, vyplývá z toho, že i těleso, na které působí gravitace, se ve skutečnosti pohybuje bez vlivu vnějších sil. Tento pohyb je pak popsán jako pohyb podél geodetické křivky, což je vlastně přímka, která je ohnutá v zakřiveném časoprostoru, přičemž ono zakřivení odpovídá jeho rozložení energie a hybnosti. Zní to celkem složitě (a taky to složitě je), ale když si člověk uvědomí, že energie (E) je podle známého vzorce $E = mc^2$ vlastně jenom trochu jiný pohled na hmotu (m) a hmota je to, co si obvykle člověk spojuje s gravitací, začne se obraz asi trochu dokreslovat.

4.2.2 Volný pád

Volný pád je podle Newtonovské fyziky stav, ve kterém na těleso působí jenom jedna síla, a to ta, jež odpovídá jeho hmotnosti. Protože však z obecné teorie relativity víme, že takové těleso vlastně nepadá, ale pohybuje se setrvačně podél geodetické křivky, můžeme si představit, že padající míč je na tom vlastně úplně stejně, jako meteorit letící vesmírem mimo dosah jakýchkoli gravitačních sil. Meteorit se v tomto případě pohybuje v souladu s prvním Newtonovým zákonem, který říká, že pokud na těleso nepůsobí žádná síla, setrvává buď v klidu, nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Tyto dva stavy jsou přitom v kontextu teorie relativity jeden a tentýž.

4.2.3 Vlastní zrychlení

Vlastní zrychlení je něco, co si můžeme představit jako pocit, že se pohybujeme. Tedy ne konkrétně počitek v našem mozku, ale spíš to, co ten počitek způsobuje. Vlastní zrychlení totiž není vztaženo k žádné soustavě, ale definuje se jako relativní k volnému pádu, jenž, jak jsme si výše uvedli, je stavem relativního klidu, ve kterém na těleso nepůsobí žádná síla. Jinými slovy: vlastní zrychlení můžeme popsat jako změnu z nulového působení sil na nenulové, přičemž není podstatné, zda se těleso vůči nějakému pozorovateli pohybuje a nebo ne.

Vlastní zrychlení tedy těleso může mít, když jen leží na stole (nepohybuje se, ale působí na něj gravitace), ale nebude je mít, pokud je upustíme (nikoli vyhodíme) z okna (volný pád).

Jinak je vlastní zrychlení samozřejmě měřitelné vždycky, když s tělesem nějak manipuluje-me. Jediný problém je, že když vlastní zrychlení měříme, musíme počítat s tím, že v něm bude započítáno i to gravitační. To je zároveň pozitivní i negativní. Negativní v tom, že

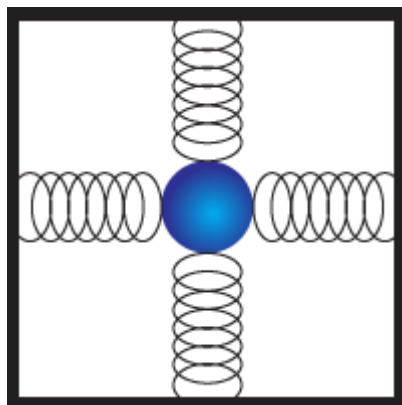
musíme pomocí filtru toto zrychlení odečíst, abychom s ním mohli pracovat, a pozitivní v tom, že směr gravitace nám vlastně udává zároveň směr „dolů“, což je nápomocné při určování orientace tělesa.

4.2.4 Princip akcelerometru

se nejčastěji znázorňuje pomocí kuličky upevněné pomocí pružinek dovnitř krychle. Pružinky jsou všechny stejné, je jich šest a kuličku spojují nejkratší cestou se středem každé stěny. Pro ilustraci to můžeme ve 2D zobrazit jako na obrázku 4.1.

Pokud se takovýto myšlený akcelerometr bude nacházet v gravitačním poli, bude kulička tlačit na spodní pružinu a zároveň tahat za tu horní. Pokud s krychlí zatřepeme, protáhnou či stlačí se všechny pružinky najednou podle toho, jakým směrem na kuličku působí vlastní zrychlení. Míra deformace každé dvojice protějších pružinek je pak úměrná vlastnímu zrychlení akcelerometru v každé ze tří os jeho souřadnicového systému.

Všechno to však funguje tak hezky a jednoduše jenom do chvíle, než začneme brát v úvahu setrvačnost, rezonanci a vlastní otřesy zařízení, které s akcelerometrem pracuje. [5] Data z reálného akcelerometru jsou tedy vždy podstatně zkreslená šumem, který je potřeba odfiltrout.



Obr. 4.1: Znázornění akcelerometru

4.2.5 Provedení akcelerometru

Jak takový skutečný akcelerometr vypadá, může být různé. Celkem existuje asi na dvacet různých typů. Nejčastější z nich je asi **piezoelektrický akcelerometr**, jenž využívá piezoelektrického jevu, což je schopnost osově souměrného krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci.

4.3 Gyroskop

Gyroskop je senzor pohybu, který měří úhlovou rychlost vlastního setrvačníku ve třech osách. Pro bližší pochopení jeho funkce je opět nutné na chvíli zabrousit do fyziky:

4.3.1 Moment síly

vyjadřuje míru otáčivého účinku síly. Z učebnic základní školy si jistě vybavíme páku znázorněnou úsečkou, jež je v jednom bodě k něčemu upevněná a síla působí kolmo na ni. Podle toho, jak je síla vzdálená od pevného bodu, mění se velikost momentu síly (se vzdáleností roste).

4.3.2 Dvojice sil

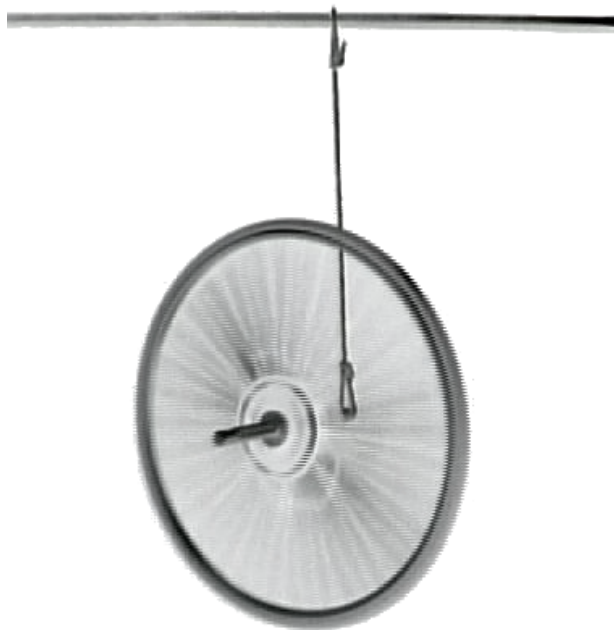
Dvojicí sil označujeme současné působení dvou sil na jedno těleso. Síly jsou přitom stejně velké, mají opačný směr a neleží na přímce. Výslednice sil je pak sice nulová a na těleso tedy dvojice sil nepůsobí posuvným účinkem, ale protože se nevyruší momenty síly, účinek bude otáčivý.

4.3.3 Precese

je fyzikální jev, při kterém dvojice sil působí na rotující setrvačník. Pokud například setrvačník roztočíme a postavíme jej osou na podložku, může být dvojicí sil tíha setrvačníku (vycházející z jeho těžiště) a odpor podložky (vycházející z bodu, ve kterém se osa dotýká podložky). Jestliže bude setrvačník nakloněný, bude osa při rotaci přibližně opisovat kužel – a to je právě to, co nazýváme precesí. (Precesi můžeme charakterizovat její úhlovou rychlostí, kterou měříme na libovolné kružnici kolmé na osu zmiňovaného kuželu.)

Zvláštní na precesi je, že ten samý princip je možné uplatnit i v případě, že setrvačník roztočíme okolo vodorovné osy, jíž jeden konec zavěsíme na provázek. Výsledkem bude, že setrvačník zůstane ve svislé poloze (obrázek 4.2).

S precesí se můžeme v reálném světě setkat různě. Jedna z těch, které jistě stojí za zmínku, je precese zemské osy. Země v tomto jevu hraje roli obrovského setrvačníku, který je střídavě vykláněn ze své osy rotace Sluncem a Měsícem.



Obr. 4.2: Precese zavěšeného kola

4.3.4 Moment setrvačnosti

vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém účinku. Jeho velikost závisí na rozložení hmoty v tělese. Body tělesa, které mají větší hmotnost a jsou dál od osy (nebo bodu) otáčení, mají větší moment setrvačnosti.

4.3.5 Moment hybnosti

Hybnost vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa (počítá se jako součin hmotnosti a rychlosti). Moment hybnosti popisuje otáčivý pohyb tělesa v jeho jednotlivých bodech jako součin hybnosti těchto bodů a jejich vzdálenosti od osy (resp. bodu) otáčení.

Moment hybnosti má jednu zvláštní vlastnost. Dává věcem větší stabilitu. Když postavíme kolo z obrázku 4.2 kolmo na podložku, spadne, ale kdybychom to samé kolo roztočili a zanedbali tření, zůstalo by stát do nekonečna. [6]

4.3.6 Princip gyroskopu

Na obrázku 4.3 můžeme vidět stolní verzi gyroskopu. Jedná se o setrvačnick ve tvaru koule upevněný ve třech rámech, které mu umožňují libovolné natočení okolo tří os. Pokud bychom jej uchopili do ruky a zkusili změnit orientaci, viděli by jsme, že vnitřní část se natáčí v souladu s momentem setrvačnosti vyvolaným momentem síly způsobeným ohybem našeho zápěstí.



Obr. 4.3: Stolní gyroskop

Tyto momenty se však dají z podstatně větší části vyrušit mnohonásobně větším momentem hybnosti, když roztočíme setrvačnick šubnutím provázku omotaného kolem jeho osy. Co tedy uvidíme? Osa rychle rotujícího setrvačnicku zůstane ve stejné orientaci, nehledě na to, jak natočíme vnější rámy gyroskopu!

A to není všechno. Gyroskop má ještě další zajímavé schopnosti. Ve verzi s jedním rámem jej můžeme roztočit a nechat stát na provázku jako provazochodce, nebo opakovat trik s precesí, jako je na obrázku 4.2.

Tyto fyzikální vlastnosti jsou velmi výhodné pro navigační účely, a také se pro ně hojně využívají například u letadel, raket, torpéd apod. Kromě toho se dají použít také v drobné

elektrotechnice, jako jsou mobilní telefony nebo ovladače pro herní konzoly.

4.3.7 Provedení gyroskopu

Stejně jako akcelerometr, i gyroskop coby elektrotechnická součástka může mít více typů provedení. Například je tu **piezoelektrický gyroskop**, ve kterém se krystal deformuje odstředivou silou. Tento gyroskop patří do skupiny tzv. gyroskopů s vibrující strukturou (označovaných také jako *VSG*), ve kterých vnitřní těleso nerotuje, ale místo toho vibruje. Využívá se toho, že vibrující objekty mají tendenci přenášet vibrace do stejné roviny, v jaké se otáčí jejich podpora. Vibrující tělísko tak vyvíjí tlak na krystaly, který při deformaci vyrábí elektrické napětí.

Jiným typem může být **gyroskop s optickými vlákny** (*FOG*), který využívá interference světla k rozpoznání mechanické rotace. [1]

4.4 Magnetometr

Je polohový senzor, který měří sílu a někdy také směr magnetického pole. V navigaci se používá k určování severu podle magnetického pole Země.

4.4.1 Magnetické pole

je matematický popis magnetického působení elektrického proudu a magnetických materiálů. Můžeme u něj určovat velikost a směr.

Vznik magnetické síly bývá vysvětlován jako průvodní jev pohybujícího se elektrického náboje. Jak tedy chápat, že některé látky (nazýváme je **permanентní magnety** a **zmagnetizované látky**) mají tytéž vlastnosti, i když jimi neprotéká proud? Příčinou je vlastnost elementárních částic, jež se v kvantové fyzice nazývá spin. Spin znamená, že některé částice mají svůj vlastní přirozený moment hybnosti, který způsobuje, že neustále rotují. Tyto rotace jsou něčím podobným, jako když v klasické elektrodynamice rotuje elektricky nabitý těleso. V případě elementárních částic pak hovoříme o **vázaném elektrickém proudu**, jelikož se nejedná o tzv. *volný* makroskopický pohyb částic, ale náboj *vázaný* na částice samotné.

Z pohledu teorie relativity však není možné magnetické pole považovat za produkt elektrického pole. Když v myšlenkovém experimentu Alberta Einsteina pohybujeme vodičem kolem magnetu, zadržujeme částice na místě, takže nevzniká elektrické pole, ale vyvolává se tím proud, jež má stejnou velikost, jako když stejným magnetem pohybujeme kolem téhož (tentokrát nehybného) vodiče, a vytváříme tak kolem něj elektrické pole. Z toho ply-

ne, že oba případy jsou si ekvivalentní, jelikož hodnota proudu nezáleží na tom, jestli se pohybuje magnet a nebo vodič. V tomto světle tedy nemůžeme tvrdit, že když pohyb proudu vytváří magnetické pole, je to něco jiného, než když pohyb magnetu kolem vodiče vytváří elektrické pole – a je-li jedno důsledkem druhého a druhé důsledkem prvního, nejedná se logicky o dva jevy, ale o jeden jev projevující se dvěma způsoby najednou. Hovoří se tedy o poli elektromagnetickém.

4.4.2 Magnetické pole planet

bývá vysvětlováno třemi způsoby. První z nich se nazývá **termální dynamo** a vzniká v raném období vývoje planety v důsledku velkého teplotního rozdílu jádra a pláště ve vodivém rozhraní mezi nimi. Tento mechanismus však není účinný v pozdějších stádiích vývoje a magnetické pole tak slábne. Pokud jsou však vhodné nejen teplotní podmínky, ale také tlakové a chemické, dochází ke vzniku **termo-chemického dynamu**, které má účinnost mnohem vyšší a trvanlivější. Třetí teorií o příčině magnetického pole je dynamo **termo-elektrické**, které vzniká v důsledku tvoření proudů mezi zvláštěm rozhraním pláště a jádra. Tato teorie vznikla při pokusu vysvětlit velmi slabé magnetické pole planety Merkur.

4.4.3 Magnetické pole Země

má příčinu v dynamu termo-chemickém. V praxi to vypadá tak, že se polotekutá vnější část jádra tře o pevnou vnitřní část. To má za důsledek jak proměnlivost síly magnetického pole, tak také polarity. V současné době nejnovější mapu náklonu magnetického pole máme k dispozici z roku 2010. Jde o produkt dvou výzkumných společností, *National Geophysical Data Center (NGDC, Boulder CO, USA)* a *British Geological Survey (BGS, Edinburgh, Scotland)*, a je možné si jej prohlédnout v Příloze I k této práci. Model se vytváří každých 5 let. [13]

4.4.4 Magnetometr jako kompas

Magnetometry rozlišujeme dvojí: skalární a vektorové. V prvním případě měříme pouze sílu magnetického pole, v tom druhém i směr, který je důležitý, pokud chceme magnetometr použít k navigaci.

Jak již bylo naznačeno výše, mezi vektorem mířícím k Severnímu pólu a vektorem mířícím k magnetickému severu Země je rozdíl. Tomuto rozdílu se říká **magnetická deklinace** a vyjadřuje se ve stupních, jako každý jiný úhel. Změnu magnetické deklinace v prostoru

zobrazuje Příloha I, změna v čase záleží na vzdálenosti od magnetických pólů země. Ve větší vzdálenosti je to přibližně 2 - 2,5° stupňů za 100 let, blíže pólům to bývá kolem 1° za tři roky.

Z toho plyne důležité poučení, že kompas by mělo být možné vyladit podle aktuální deklinace v daném místě, nebo používat kompas, který se vyladit nedá, zato však ukazuje vždy k magnetickému severu, takže si jeho uživatel musí deklinaci přičíst nebo odečíst (podle toho, jak s kompasem v danou chvíli pracuje).

Dalším problémem je, že magnetometr neukazuje vždy jen magnetický sever Země, ale je ovlivnitelný i jakýmkoliv jiným magnetickým polem v jeho okolí. Někdy se magnetometry používají také k hledání magnetických kovů, jelikož jsou v tomto směru výkonnější, než tradiční detektory kovů. Při použití jako kompas to ale není vůbec žádnou výhodou, naopak mohou způsobit nepříjemnosti následkem špatné navigace.

4.4.5 Provedení magnetometru

Pro účely této práce se nyní zaměříme pouze na provedení vektorových magnetometrů. Nejpoužívanější variantou je magnetometr využívající **Hallova jevu**. Takovýto senzor produkuje napětí úměrně k síle pole a natočení vůči jeho směru. Jeho využití je však možné jen u velmi silných magnetických polí. Pro navigaci se proto používají spíše **magnetorezistivní** magnetometry, obsahující magnetický NiFe film, jenž mění odpor podle náboje v magnetickém poli.

Třetí variantou je **gyroindukční magnetometr**, jenž se skládá ze dvou cívek se společným jádrem. Do první cívky se pustí střídavý proud, který v jádře vyvolává různé fáze cyklu magnetického nasycení (zmagnetizované, odmagnetizované, inverzně zmagnetizované, odmagnetizované, zmagnetizované, atd.). Pokud v okolí není žádné magnetické pole, bude proud na druhé cívce stejný jako u první cívky, v opačném případě bude možné rozpoznat směr přítomného magnetického pole podle toho, při jakém nasycení se naindukuje do druhé cívky větší proud.

4.5 Zpracování dat

Zpracování dat pro účely inerciální navigace není tak jednoduché, jak by se mohlo zdát. V zásadě půjde o dvě dílčí úlohy. Jednak musíme zjistit, kterým směrem se zařízení pohybuje v souřadnicové soustavě akcelerometru, a jednak jak je akcelerometr orientovaný vůči světu, protože nestačí pouze vědět, že se pohybuje „dopředu“ nebo „do strany“, ale musíme také být schopní říct, v jakém úhlu je tento směr vůči světovým stranám.

Poznámka: Při zpracování dat budeme hojně používat filtry podrobně popsané v kapitole 5.

4.5.1 Určení orientace

Ze všeho nejdřív musíme z akcelerometru dostat informaci o směru gravitace, abychom mohli určit orientaci zařízení. Druhou potřebnou informací budou data z magnetometru. Zařízení, které obsahuje gyroskop ještě využije jeho výstup, aby se zkrátilo zpoždění, jelikož gyroskop má rychlejší odezvu.

4.5.2 Určení směru pohybu

Jakmile jsme si jistí, že máme relativně spolehlivou informaci o orientaci zařízení, nastane mnohem závažnější problém. Jak určit, kterým směrem se zařízení pohybuje? První věc, která by nás mohla napadnout, je dvakrát zintegrovat zrychlení vyčtené z akcelerometru, abychom tak získali uraženou událost. Zádrhel je však v tom, že dvojitá integrace dat obsahujících velké množství šumu způsobí kriticky velké nepřesnosti. [4]

V praxi se proto používají jiné metody. Pokud máme co dočinění s vozidlem nebo létajícím dopravním prostředkem, bude pravděpodobně nejlepším řešením aplikovat **Kalmanův filtr**. Tato práce se ale věnuje navigaci chodců, takže nás bude spíše zajímat metoda zahrnující **krokoměr**.

Krokoměr nám vyšle signál vždy, když akcelerometr zaznamená otřes odpovídající kroku při lidské chůzi. Směr kroku se určí z hodnoty zrychlení při odlepení od podložky, neboť v tomto okamžiku je největší, i když je pravda, že míří proti směru chůze. Tato metoda je poměrně úspěšná, ale má svá úskalí hlavně v tom, že ne všechno, co akcelerometr zaznamená jako krok je skutečným krokem, a také v tom, že při určování směru kroku musíme počítat s vlivem šumu.

4.6 Zpřesňování polohy

Zpřesňování polohy je pro inerciální navigaci důležité už jenom proto, že bez informace, odkud navigace započala, bychom určovali polohu pouze relativně k blíže neurčenému počátku, což by znamenalo, že nemůžeme vůbec pracovat s mapou. Je tedy žádoucí, abychom inerciální navigaci spouštěli v místě, ve kterém jsme naposledy přijali informaci o své poloze ze zdroje jako je přijímač GPS signálu, případně kde jsme schopni svou polohu zadat ručně.

Otázkou zůstává, které prostředky jsou vhodné pro zpřesňování polohy? Vývojáři pro operační systém Android mají mezi svými zdroji kromě GPS přijímače také mocné zastání ve

společnosti Google Inc., která shromažďuje obrovské množství dat pro určování polohy podle WiFi a GSM signálů. Jsou však tato data použitelná pro navigaci ve vnitřních prostorech?

Každá poloha získaná od oficiálních poskytovatelů polohy zařízení s operačním systémem Android má ve svých parametrech uvedenu také přesnost. U GPS dat se přesnost uvádí maximálně 100m, přičemž prakticky tato hodnota málokdy přesáhne 20m. U tzv. hrubých poloh to může podle dokumentace být 100 - 1000m, i když v praxi bývá skutečná odchylka okolo 50m.

Tato čísla ukazují, že pro účely navigace ve vnitřních prostorech se hrubá poloha nehodí, a to ani přes nespornou výhodu v rychlosti a menší spotřebě baterie, neboť málokterá budova je podstatně širší než 50m.

5 FILTRAČNÍ METODY

5.1 Dolní propust

Pro dolní propust existuje jednoduchý vzorec (5.1):

$$y[i] = (1 - \alpha) \cdot y[i-1] + \alpha \cdot x[i] \quad (5.1)$$

kde:

y ... filtrovaná data

x ... nefiltrovaná data

i ... aktuální index

α ... se vypočítá následovně (Vzorec 5.2):

$$\alpha = \frac{t}{(t + dT)} \quad (5.2)$$

kde

t ... čas události

dT ... vzorkovací perioda

Pomocí dolní propusti se dají vypočítat jednotlivé složky vektoru **gravitace** z vektoru akcelerace, získaného z výstupu akcelerometru.

5.2 Horní propust

Horní propust se vypočítá pomocí následujícího vzorce (5.3):

$$y[i] = \alpha \cdot y[i-1] + \alpha \cdot (x[i] - x[i-1]) \quad (5.3)$$

Horní propust se používá k odečtení gravitace z celkové akcelerace. Získáme tak **lineární zrychlení**.

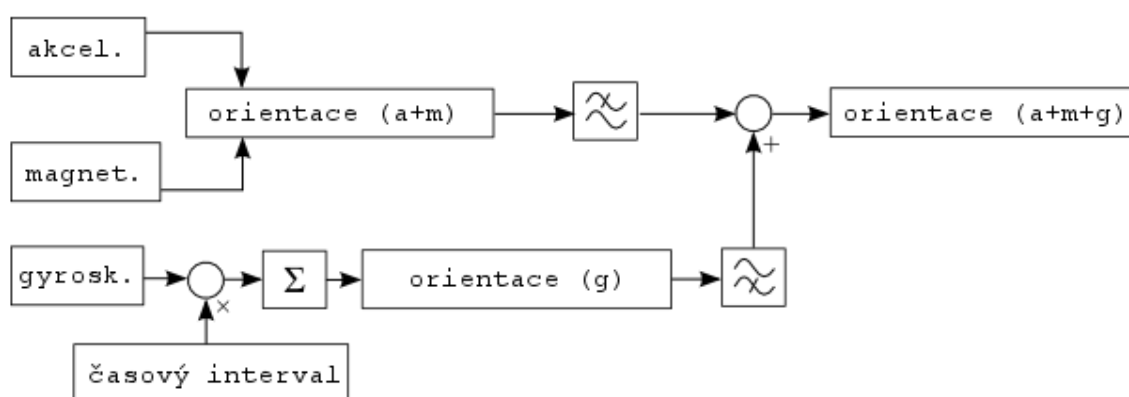
5.3 Komplementární filtr

Pro výpočet orientace zařízení nám stačí data z akcelerometru a magnetometru. Z magnetometru určíme směr severu a z akcelerometru získáme informaci o směru gravitace. Když tyto dva vektory dáme dohromady, získáme všechno co potřebujeme k určení úhlů, které zařízení svírá se světovými osami.⁴ Problém je v tom, že oba senzory poskytují poměrně nepřesná data, obzvlášť magnetometr obsahuje hodně šumu.

Naproti tomu data z gyroskopu jsou mnohem přesnější a mají velmi krátkou odezvu na to, co se se zařízením v danou chvíli děje. Na jeho výstupu si můžeme přechít úhlové rychlosti pro každou z jeho os. Když budeme tyto hodnoty integrovat v čase, získáme hodnoty úhlů, o kolik se zařízení otočilo mezi dvěma body v čase (obyčejně vzdálených od sebe o vzorkovací periodu). Těmto úhlům se říká *rotační přírůstek*. Suma rotačních přírůstků nám potom dá informaci o celkové orientaci zařízení. Avšak ani tato informace není zcela uspokojivá, jelikož gyroskop lehce ujíždí (driftuje).

Abychom se vyhnuli oběma problémům, driftu gyroskopu i zašuměným datům, budeme informaci o orientaci získanou z gyroskopu používat pouze v kratších intervalech, zatímco orientaci z akcelerometru a magnetometru využijeme jako podpůrnou informaci pro delší časový úsek. [3]

Prakticky tedy aplikujeme na jedny data horní propust a na druhé dolní propust. Výsledný tok dat bude vypadat takto (vizte obrázek 5.1):



Obr. 5.1: Komplementární filtr

4 Podrobnější informace o souřadnicových soustavách budou uvedeny v praktické části.

5.4 Průměrování dat

Poslední metoda, kterou je vhodné přidat k výše uvedeným, je průměrování dat. Tuto metodu využijeme ke zpracování dat, u nichž nezáleží na časovém zpoždění, ale přejeme si, aby data byla vyhlazená. Ze vzorce (5.4) vidíme, že vlastně nejde o nic jiného než udělení průměru z dat, která se nacházejí v intervalu zpoždění, které si sami dopředu zvolíme.

V praktické části byla tato metoda použita k implementaci krokoměru.

$$y[i] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x[i-j] \quad (5.4)$$

kde

N ... počet vzorků v intervalu zvoleného zpoždění

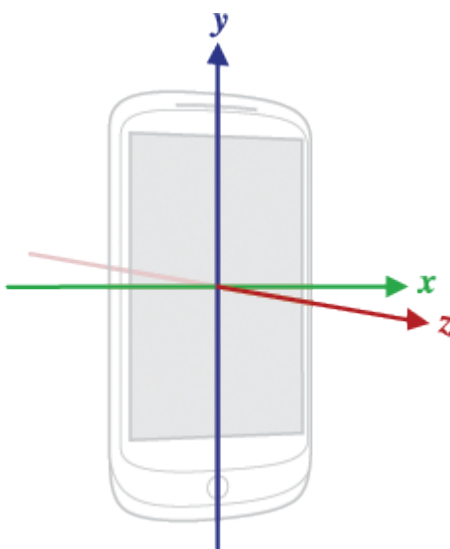
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 APLIKAČNÍ ROZHRAŇÍ SYSTÉMU ANDROID

Aplikace pro operační systém android je možné programovat v jazyce Java, rozšířeném o vlastní aplikační rozhraní (API), které se vyvíjí s každou novou verzí systému. Aplikace vyvíjená pro účely této práce je určena pro API verze 10 a vyšší.

6.1 Práce se senzory

Při práci se senzory se často používá souřadnicový systém zachycený na obrázku 6.1.⁵ Tento systém je dobré si uvést hned ze začátku, protože se na něj budeme dále často odkazovat.



Obr. 6.1: Standardní souřadnicový systém

K obrázku 6.1 je důležité zmínit také to, že uvedené platí i pro zařízení s výchozím natočením displeje v módu *krajina* (šířka je větší než výška), tzn. že osa *y* směřuje vždy odzdo-la nahoru. To samo o sobě není nijak matoucí, dokud k tomu nepřidáme také to, že pokud zařízení otočíme a přepneme se tak do jiného módu zobrazení, osy displeje se vůči zařízení změní, ale osy senzorů zůstávají vůči zařízení stejné.

K získání dat ze senzorů se používá objekt `android.hardware.SensorManager`. [10] Pomocí něho je možné získat data ze všech hardwarových a některých připravených softwarových senzorů. V následujících tabulkách si popíšeme vlastnosti těch z nich, které jsou pro naše účely důležité.

5 Informace z kapitoly o senzorech jsou převážně ze zdrojů [11] a [12]

6.1.1 Celkové zrychlení

Přímý výstup z akcelerometru. Vizte tabulku 6.1.

Požadavky	akcelerometr
Formát dat	vektor zrychlení zařízení včetně gravitace
Jednotky	$m \cdot s^{-2}$
Souřadnicový systém	standardní (vůči zařízení)
Způsob získání	z reálného senzoru

Tab. 6.1: Zrychlení - parametry

6.1.2 Gravitační zrychlení

Získává se za použití filtru *dolní propust* z celkového zrychlení zařízení. Od API 9 není nutné propust explicitně programovat. Vizte tabulku 6.2.

Požadavky	akcelerometr
Formát dat	vektor gravitačního zrychlení
Jednotky	$m \cdot s^{-2}$
Souřadnicový systém	standardní (vůči zařízení)
Způsob získání	z virtuálního senzoru (API 9 a vyšší) nebo dolní propustí z akcelerometru

Tab. 6.2: Gravitační zrychlení – parametry

6.1.3 Lineární zrychlení

Platí totéž co v předchozím případě, s tím rozdílem, že lineární zrychlení lze vypočítat horní propustí a nebo odečtením gravitace z celkového zrychlení. Vizte tabulku 6.3.

Požadavky	akcelerometr
Formát dat	vektor zrychlení zařízení bez gravitace
Jednotky	$m \cdot s^{-2}$
Souřadnicový systém	standardní (vůči zařízení)
Způsob získání	z virtuálního senzoru (API 9 a vyšší) nebo horní propustí z akcelometru

Tab. 6.3: Lineární zrychlení - parametry

6.1.4 Okamžitá úhlová rychlost

Přímý výstup z gyroskopu. Vyčísluje míru otáčení zařízení kolem každé ze tří os. Numerickou integrací se získá úhel otočení mezi jednotlivými měřeními, avšak je potřeba počítat z tzv. driftu gyroskopu. Vizte tabulku 6.4.

Požadavky	gyroskop
Formát dat	úhlové zrychlení kolem os x , y a z
Jednotky	$rad \cdot s^{-1}$
Souřadnicový systém	standardní (vůči zařízení)
Způsob získání	z reálného senzoru

Tab. 6.4: Úhlová rychlost – parametry

6.1.5 Magnetické pole

Udává složky vektoru směru magnetického pole v okolí. Pokud se správně seřídí a není v okolí žádná magnetická látka, ukazuje magnetický sever Země. Vizte tabulku 6.5.

Požadavky	magnetometr
Formát dat	vektor, který ukazuje ve směru magnetického pole
Jednotky	μT
Souřadnicový systém	standardní (vůči zařízení)
Způsob získání	z reálného senzoru

Tab. 6.5: Magnetické pole - parametry

6.1.6 Orientace

Udává natočení zařízení vůči světu. V kódu se získává pomocí metody *SensorManager.getOrientation()*, která si bere jako parametry data z magnetometru a vektor určující směr gravitačního zrychlení.

Alternativně, je-li k dispozici gyroskop, je možné použít zpřesnění pomocí komplementárního filtru (více v kapitole 5.3).

Orientace zařízení se uvádí ve vztahu k světovému souřadnicovému systému. Záporná část osy *z* směřuje ve směru gravitace, osa *y* k severu a osa *x* k východu. Data o orientaci jsou pak uváděna jako úhly natočení vůči tomuto souřadnicovému systému.

Prvním z nich je **azimuth** (česky *azimut*), který vyjadřuje odklon osy *y* zařízení od světového severu. Je-li zařízení otočeno na východ, bude azimuth 90° , když na jih, 180° , a když na západ, tak 270° . Velikost úhlu tedy stoupá ve směru hodinových ručiček.

Druhým úhlem je **pitch** (česky *stoupání*). Pitch je kladné, pokud kladná část osy *z* zařízení rotuje směrem ke kladné části osy *y* zařízení, a naopak záporné, pokud kladná část osy *z* zařízení rotuje směrem k záporné části osy *y* zařízení. Můžeme si to představit tak, že zařízením je naše hlava. Pokud ji nakláníme dopředu, pitch je kladné, zatímco pokud ji zakláníme dozadu, pitch je záporné.

Třetí úhel se nazývá **roll** (česky *rotace do strany*). Roll je kladné, pokud kladná část osy *z* zařízení rotuje ke kladné části osy *x* zařízení a naopak záporné, pokud pozitivní část osy *z* rotuje směrem k záporné části osy *x* zařízení. V analogii s hlavou to znamená, že náklon k pravému rameni je pozitivní roll, zatímco k levému negativní roll.

Vizte tabulku 6.6.

Požadavky	akcelerometr, magnetometr, [gyroskop]
Formát dat	natočení zařízení ve třech osách
Jednotky	°
Souřadnicový systém	nestandardní (vůči světu)
Způsob získání	výpočtem přes maticové operace a komplementární filtr

Tab. 6.6: Orientace - parametry

7 POUŽITÉ ALGORITMY

7.1 Krokoměr

Počítání kroků je vlastně velmi jednoduché, jelikož stačí jenom rozpoznávat otřesy akcelerometru, které odpovídají krokům nositele zařízení. Problém spočívá v tom, že ne každý takový otřes hned znamená skutečný krok. Řešením může být například to, že akcelerometr umístíme do obuvi. [2] To se ale v případě mobilního telefonu těžko realizuje, a tak jsem se rozhodl spoléhat se na to, že uživatel bude instruován, aby nedělal zbytečně prudké pohyby, a že poloha bude stejně vždycky do určité míry nepřesná, dokud nedojde k jejímu zpřesnění z externího zdroje.

Další drobnou komplikací při řešení krokoměru bylo, že některé otřesy jsou natolik jemné, že je není možné krokoměrem zaznamenávat, jelikož by tak došlo i k zaznamenávání falešných kroků s malou amplitudou odpovídající šumu.

Alespoň jednou je tedy nutné v aplikaci spustit kalibraci, která získá hodnotu gravitace⁶ a její největší odchylky, zatímco je zařízení drženo v jedné ruce. Přirozený drobný řas ruky totiž odpovídá tomu, jak se zařízení může pohybovat i když uživatel nedělá žádný krok.

Tato odchylka je pak lehce zvětšena konstantou o něco málo větší než 1 a je použita k odlišení skutečných kroků od kroků falešných. Dlužno poznamenat, že ne všechny kroky označené za falešné takovými skutečně jsou, ale na druhou stranu, tyto kroky s malou amplitudou zrychlení odpovídají krokům bez obuvi na měkké podložce, takže to aplikaci na funkčnosti ubírá jen minimálně. Navíc je stále lepší ignorovat drobné krůčky, než dovolit šumu, aby zneprůhledňoval výsledek.

Algoritmů na detekci kroků je nepřehledné množství a než je věrně přepisovat do vlastního kódu, je lepší pochopit jejich princip a navrhnout si vlastní verzi. Já jsem více méně empirickým způsobem dospěl k následujícímu postupu (vývojový diagram se nachází v příloze II):

0. Kalibrací získáme hodnoty gravitačního zrychlení a odchylky. Z odchylky získáme vynásobením konstantou hodnotu minimálního kroku.

⁶ Je dobré vědět, že každé zařízení má jiný akcelerometr, a hodnota gravitačního zrychlení může být naměřena úplně jinak. Kdyby tato hodnota byla napevno přednastavena, mohlo by to vést k nefunkčnosti krokoměru u některých zařízeních.

1. Hodnotu minima nastavíme na velikost gravitačního zrychlení a maxima na tutéž hodnotu zvětšenou o hodnotu minimálního kroku.
2. Načteme hodnoty z akcelerometru, vyhladíme je průměrováním s předchozími hodnotami a vypočítáme délku vektoru zrychlení.
3. Pokud existuje, porovnááme délku vektoru z předchozí hodnotou⁷ a uložíme si informaci o tom, jestli hodnota stoupá a nebo klesá.
4. Pokud hodnota stoupala, ale nyní klesá, došlo k lokálnímu maximu. Pokud hodnota klesá, ale nyní stoupá, došlo k lokálnímu minimu. Hodnotu extrému uložíme do fronty. Jsou-li některé hodnoty ve frontě déle než 10s, odstraníme je.
5. U lokálního maxima testujeme, zda je hodnota vektoru akcelerace bližší největšímu z maxim než nejmenšímu z minim, nebo je dokonce větší než největší maximum. Pokud ano, detekovali jsme krok a informujeme o něm všechny naslouchající instance.
6. Opakujeme krok 2.

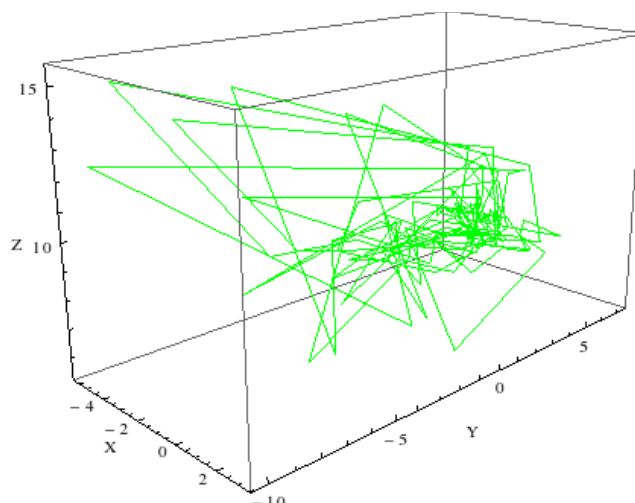
7.2 Určení azimutu

Azimut je úhel, který určuje odklon od geografického severu. Odkláňáme-li se napravo, je úhel kladný, když nalevo, tak záporný. Azimut můžeme vlastně získat dvěma způsoby. Buď se spokojíme s tím, že uživatel bude zařízení držet v ruce tak, aby jeho osa y ukazovala vždy ve směru pohybu, nebo přes maticové operace přepočítáme, kterým směrem se zařízení pohybuje vůči světu.

S první možností bychom se mohli spokojit, kdyby uživatel inerciální navigaci používal zároveň s mapou a musel se tedy neustále dívat na displej. Nesměl by však dělat kroky vzad ani do stran. Druhá možnost, kterou jsem byl nucen zvolit, funguje pro všechny směry pohybu i všechna natočení zařízení.

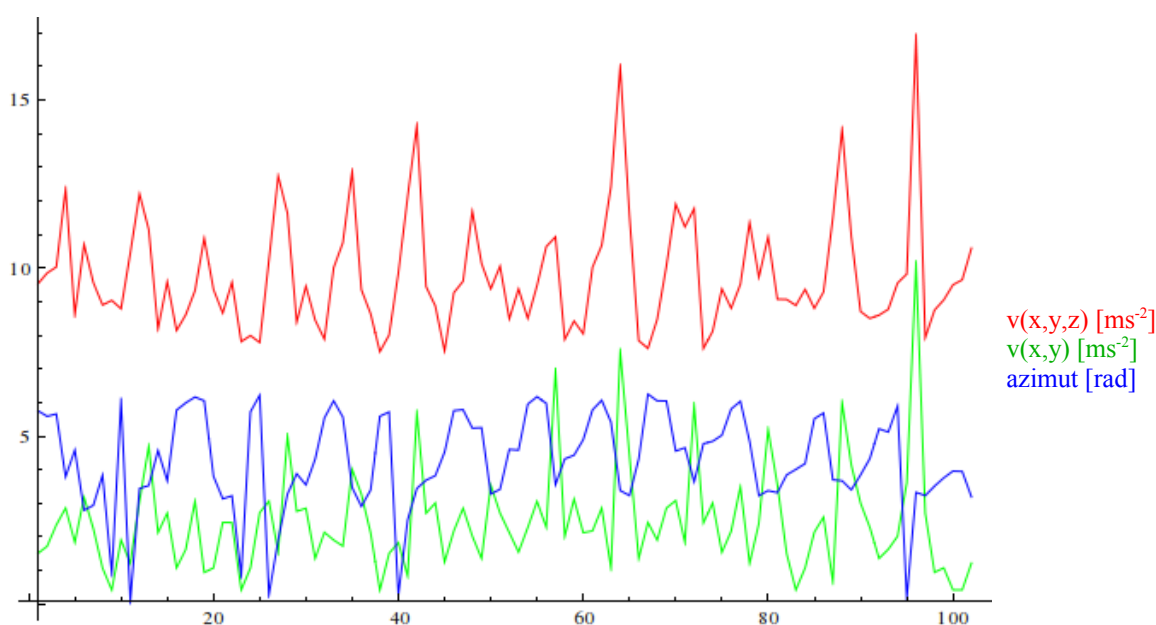
Její úskalí spočívá v tom, že při chůzi nevykonáváme pouze přímočarý pohyb, ale naše kroky vypadají na akcelerometru jako na obrázku 7.1. Je tedy potřeba vědět, kdy je vhodné okamžitý směr akcelerace měřit, a kdy ne.

⁷ Při porovnávání se používá hodnota minimálního rozdílu, který určuje, jestli bereme v potaz změnu směru (klesá/stoupá).



Obr. 7.1: Znázornění chůze na akcelerometru ve 3D prostoru

Jasnější hlavu nám udělá, když si data zobrazíme jako na obrázku 7.2. Tato data byla naměřena při chůzi na sever v lese, tedy bez rušivých vlivů. Z prvního vektoru, který znázorňuje míru akcelerace ve všech třech směrech, můžeme vyčíst, že došlo zhruba k deseti krokům. Druhý vektor je mírou akcelerace ve vodorovném směru. Třetí složkou grafu je azimut, vypočítaný ze složek akcelerace x a y .

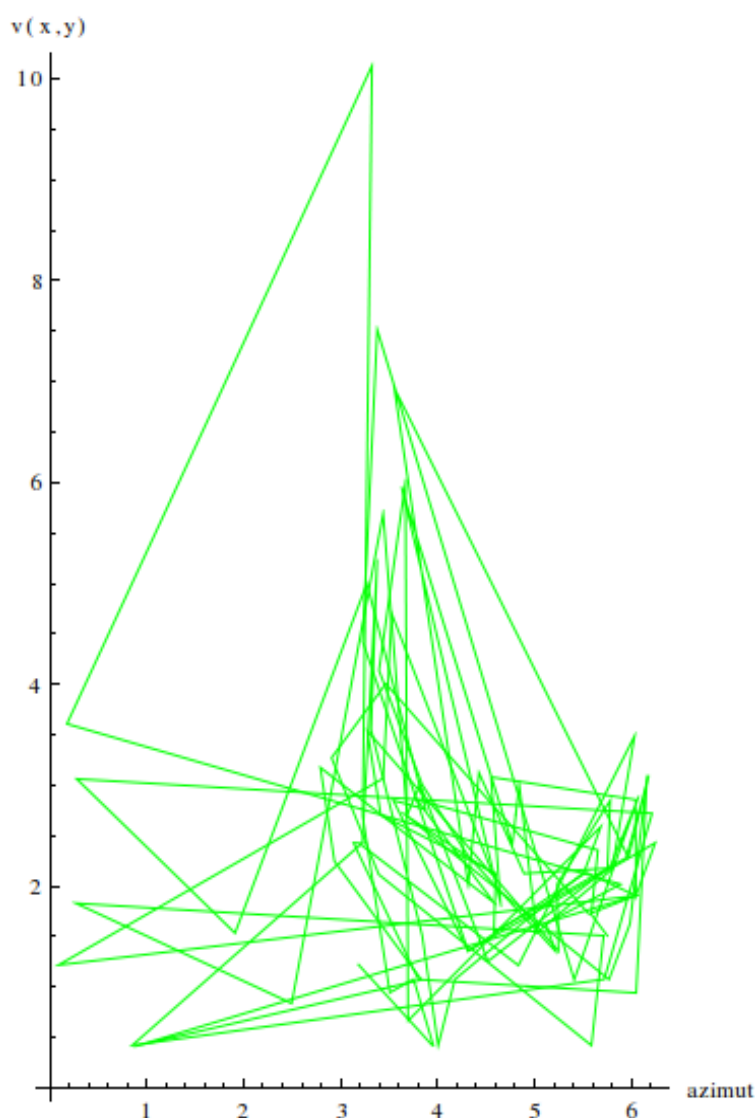


Obr. 7.2: Určování azimutu

Jak si lze všimnout, azimut se pohupuje mezi hodnotami 0 , π a 2π , což odpovídá směrům jih a sever. Je to proto, že při chůzi je zrychlení výraznější ve dvou chvílích: když se noha

odráží od podložky a když noha dopadá zpět na podložku. V prvním případě odpružení nohy vyvolává akceleraci proti směru pohybu a v tom druhém náraz do podložky vyvolává zrychlení ve směru pohybu.

Jak se však ukázalo z praktických měření (a je to vidět i v grafu na obrázku 7.3), při odpružení nohy zrychlení roste více. Jako nejvýhodnější strategie se tedy ukázalo průměrování hodnoty azimutu v době, kdy horizontální zrychlení stoupá (nezávisle na směru).



Obr. 7.3: Azimut vs. horizontální zrychlení při chůzi na sever

Můj algoritmus na určování směru kroků tedy vypadá takto (vývojový diagram se nachází v příloze III):

1. Získáme vektor orientace zařízení. Vytvoříme z něho rotační matici, kterou vynásobíme aktuální vektor celkového zrychlení.
2. Získaný vektor zrychlení vůči světu rozložíme na jednotlivé složky x , y , z . Vypočítáme velikost vektoru (x, y) . Pokud velikost oproti minulým hodnotám stoupá, uložíme jej.
3. Jakmile začne velikost klesat, zprůměrujeme všechny předchozí hodnoty x a y , načež z obou průměrů přes goniometrické funkce vypočítáme azimut. Přičteme k němu π , abychom obrátili směr. Azimut uložíme do fronty s pevnou délkou 5. Předchozích pět azimutů využijeme k zpřesnění vypočítané hodnoty.

Zpřesňování se děje podle vzorce (7.1):

$$A_{zp}[i] = \frac{4}{5} \cdot A[i] + \frac{1}{5} \cdot \sum_{j=i-6}^{i-1} A_{zp}[j] \quad (7.1)$$

kde

A ... azimut

A_{zp} ... zpřesněný azimut

U zpřesňování jde vlastně o to, že málokdo při chůzi neustále zatačí, takže se chůze srovnává podle předchozího směru. Při zatačení má sice toto zpřesňování opačný účinek, ale vzhledem k tomu, že zatačení je méně časté než chůze v před, je tento krok algoritmu na místě.

7.3 Odesílání polohy

Inerciální lokalizace je poměrně nepřesná a čím déle ji používáte, tím více se odchylujete od skutečné polohy. Po určitou dobu je však přesnější, než poloha určovaná podle vysílačů GSM a WiFi signálu, ze kterých nelze poznat, jestli se stále nacházíte ve stejné budově a nebo jste přešli přes ulici do druhé (více v kapitole 4.6). Pokud je dostupný signál GPS, je tedy vždy lepší zapomenout na polohu získanou ze všech ostatních zdrojů. Na druhou stranu čtení GPS signálu silně zatěžuje baterii, takže se vyplatí inerciální navigaci alespoň chvíli používat.

Algoritmus, který to zajišťuje, jsem navrhl takto (vývojový diagram se nachází v příloze IV):

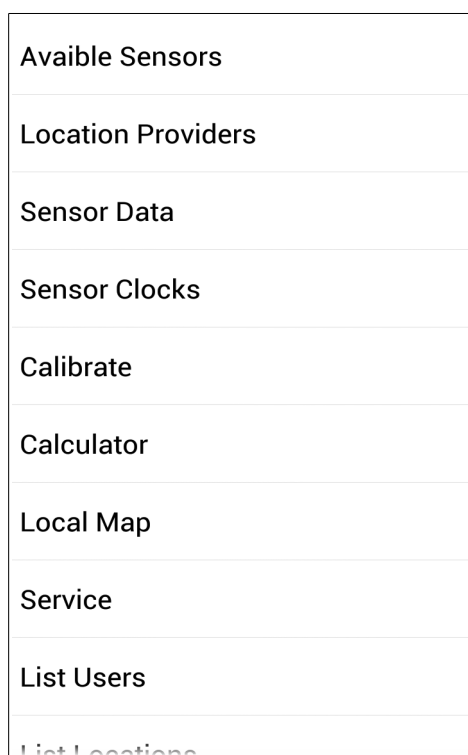
0. Získej počáteční polohu z GPS a odlož další čtení na přednastavenou dobu. Odešli polohu na server.
1. Při události krokoměru přičti k poslední poloze přednastavenou délku kroku v odhadovaném směru. Odešli polohu na server. Pokud neuplynula doba před dalším čtením z GPS, opakuj krok 1.
2. Přečti polohu z GPS, vymaž data inerciální lokalizace a založ nové se získanou polohou. Odešli polohu na server. Přejdi ke kroku 1.

8 POPIS SOFTWARE

Software pro operační systém Android, který je součástí této práce, se skládá ze tří hlavních částí: *Menu*, *Widget* a *Nastavení*. Nejprve se podíváme na jednotlivé části Menu.

8.1 Aplikační menu

Menu se dá otevřít dvěma způsoby. Jedním je spuštění aplikace a druhým kliknutí na ikonku menu na *Widgetu*. Menu obsahuje seznam všech dostupných funkcí aplikace (vizte obrázek 8.1):



Avaible Sensors
Location Providers
Sensor Data
Sensor Clocks
Calibrate
Calculator
Local Map
Service
List Users
List Locations

Obr. 8.1: Snímek displeje - Menu

8.1.1 Dostupné senzory

První položkou menu jsou dostupné senzory. Po jejím otevření si je možné přehledně informací o všech dostupných senzorech (vizte obrázek 8.2), včetně těch, které nejsou důležité pro navigaci, ale slouží třeba k měření okolní teploty, světelnosti apod. Tyto informace mohou být důležité pro uživatele aplikace, kteří mají od výrobce zařízení třeba jen málo informací, a nebo nejsou tyto informace dostatečně podrobné.

List of all available sensors
name = LSM330DLC 3-axis Accelerometer vendor = STMicroelectronics version = 1 type = accelerometer id = 1 range = 19.6133 delay = 10000 power = 0.23mA resolution = 0.009576807
name = AK8975C 3-axis Magnetic field sensor vendor = Asahi Kasei Microdevices version = 1 type = magnetic field id = 2 range = 2000.0 delay = 10000 power = 6.8mA resolution = 0.06
name = iNemoEngine Orientation sensor vendor = STMicroelectronics version = 1 type = orientation id = 3 range = 360.0 delay = 10000 power = 7.8mA resolution = 0.015625
name = CM36651 Light sensor vendor = Capella version = 1 type = light id = 5 range = 121240.0

Obr. 8.2: Snímek displeje - Dostupné senzory

8.1.2 Poskytovatelé polohy

O poskytovatelích polohy je toho možné zjistit jenom velmi málo (viz obrázek 8.3). Přitom by bylo určitě užitečné mít možnost porovnat GPS přijímače mezi sebou. Něco mi ale říká, že je to takto vymyšlené cíleně, jelikož některé GPS přijímače jsou opravdu hodně špatné. Při testování své aplikace jsem měl možnost pracovat se dvěma telefony. První z nich byl můj vlastní, který signál GPS často nezachytil vůbec, a to ani uprostřed města pod otevřeným nebem. Jediná možnost jak zjistit svou polohu bylo najít větší prostranství, jako třeba hřiště.

Druhý telefon, zapůjčený mi od vedoucího práce, chytal signál v několika vteřinách, a to jsem třeba jenom seděl v pokoji u otevřeného okna. Z toho soudím, že volba zařízení, na kterém má aplikace běžet, je velmi důležitá.

List of all location providers	
name = network	
accuracy = coarse	
power = low	
cell = yes	
network = yes	
satellite = no	
name = passive	
accuracy = unknown	
power = unknown	
cell = no	
network = no	
satellite = no	
name = gps	
accuracy = fine	
power = high	
cell = no	
network = yes	
satellite = yes	

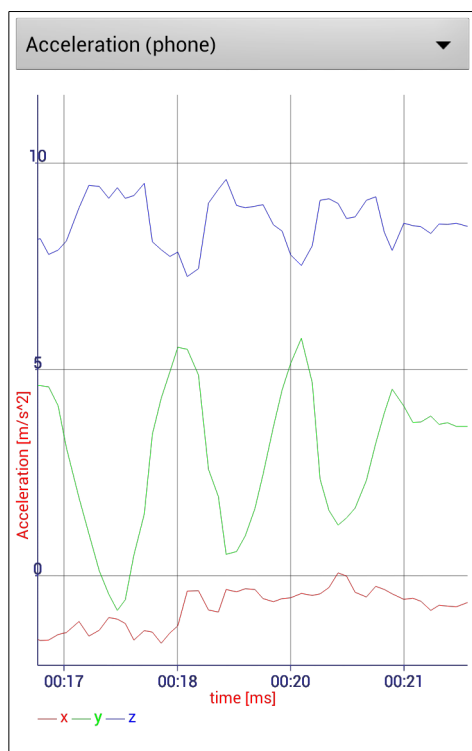
Obr. 8.3: Snímek displeje -
Poskytovatelé polohy

8.1.3 Data senzorů

slouží k zobrazování dat, která je možné v reálném čase získat přímo ze senzorů a nebo výpočtem (vizte obrázek 8.4). Zobrazování dat jsem využíval docela často při vyvíjení algoritmů pro krokoměr a určování azimutu. Je zde možné přehledně vidět, co se se senzory děje při různém natočení přístroje, jak má krokoměr aktuálně nastaveny hranice, nebo porovnávat různě řešené získávání dat o orientaci přístroje.

8.1.4 Ciferníky

jsou podobným zobrazením, jako *Data senzorů* (vizte obrázek 8.5), jenom jeho smyslem není zobrazovat grafy, ale úhly, které odpovídají natočení vůči různým souřadnicovým systémům. Je-li úhel roven nule, bude jeho ukazatel mířit svisle nahoru. Pokud úhel roste, ukazatel se otáčí ve směru hodinových ručiček, pokud klesá, proti hodinovým ručičkám. Můžeme tak třeba najít přesné natočení směru magnetického pole nebo gravitace.



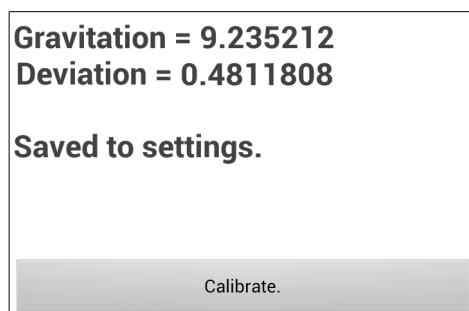
Obr. 8.4: Snímek displeje - Data senzorů



Obr. 8.5 Snímek displeje - Ciferníky

8.1.5 Kalibrace

Před prvním použitím krokoměru je nutné přístroj kalibrovat. Uživatel má opět dvě možnosti, jak kalibraci spustit. První je přímo z *Menu* a druhá z *Nastavení*. Kalibrace vlastně několik vteřin měří data získaná z akcelerometru (doporučuje se přístroj držet v ruce pro mírné zvýšení třasu). Nakonec vypočítá průměrnou hodnotu zrychlení, které by mělo odpovídat gravitaci. Z průměrné hodnoty se potom vychází při výpočtu maximální odchylky (vizte obrázek 8.6). Obě hodnoty se automaticky uloží do *Nastavení*.



Obr. 8.6: Snímek obrazovky - Kalibrace

8.1.6 Kalkulátor

slouží k připočítání vzdálenosti udávané délkou v metrech a azimutem zadaným v radiánech k poloze uváděné ve formátu zeměpisné délky a šířky (vizte obrázek 8.7). Jde si v něm ověřit, že připočítávání kroků k poloze zjištěné z GPS probíhá správně. Kromě toho se dá zjistit i skutečnost, že 1m se na GPS souřadnicích projeví na 8. desetinném místě.

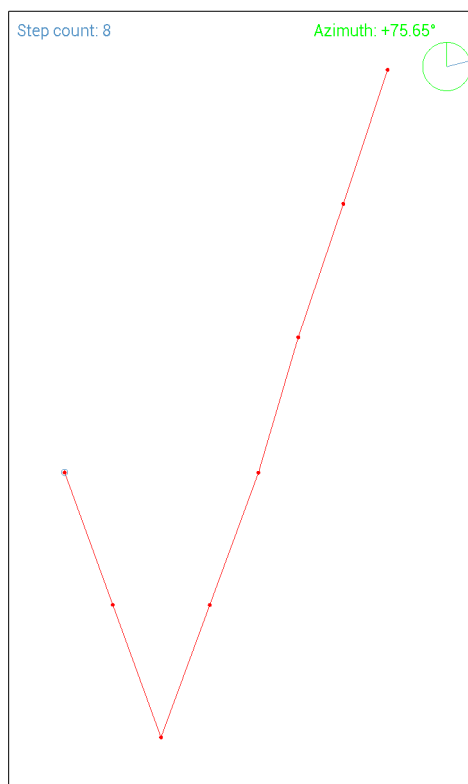
The screenshot shows a web-based calculator interface with the following elements:

- Latitude [°]:** A slider and a text input field containing the value 93.08570985360336.
- Longitude [°]:** A slider and a text input field containing the value 57.342855360984274.
- Distance [m]:** A slider and a text input field containing the value 39.42857088494514.
- Azimuth [rad]:** A slider and a text input field containing the value 1.9657394555225174.
- New Latitude [°]:** A text input field containing the value 93.08557357587578.
- New Longitude [°]:** A text input field containing the value 57.3367820193348.

Obr. 8.7: Snímek displeje - Kalkulátor

8.1.7 Lokální mapa

zobrazuje data získaná z krokoměru ve vztahu k neurčitému počátku (vizte obrázek 8.8). Uživatel si tak může sám vyzkoušet, nakolik je určování směru chůze přesné. V pravém horním rohu je k dispozici ciferník s azimutem. Podle něho je možné sledovat, jak je přístroj natočen vůči severu. Kráčí-li uživatel s osou y přístroje (vizte kapitolu 6.1) namířenou ve směru chůze, měl by směr detekovaných kroků být natočen ve stejném úhlu.



Obr. 8.8: Snímek displeje - Lokální mapa

8.1.8 Služba Odesílání polohy

je z funkčního hlediska tou nejdůležitější součástí aplikace. Při jejím spuštění dochází k odesílání polohy uživatele na server⁸, odkud je možné tuto informaci sledovat. Zároveň je k dispozici záznam o stavech služby (vizte obrázek 8.9). Záznamem se dá listovat a pokud je součástí stavu i poloha, po kliknutí na položku stavu se otevře externí aplikace, jež zobrazí danou polohu na mapě, případně se objeví seznam aplikací, které podporují tuto možnost.

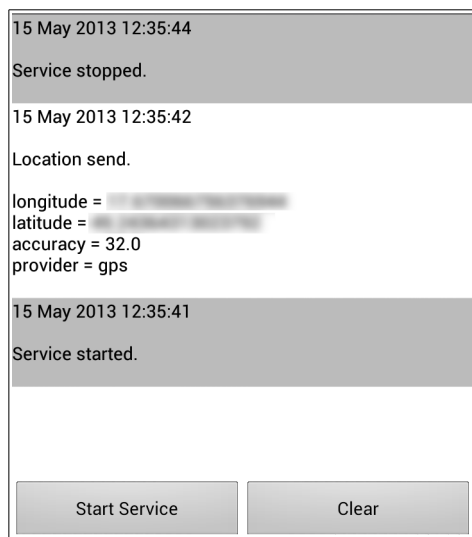
8.1.9 Seznam uživatelů

obsahuje všechny uživatele, kteří se připojují ke stejnému serveru. Tento seznam se vždy nejprve načte z paměti, ale je možné jej aktualizovat pomocí tlačítka (vizte obrázek 8.10). Opět je možné polohy zobrazit na mapě externí aplikace.

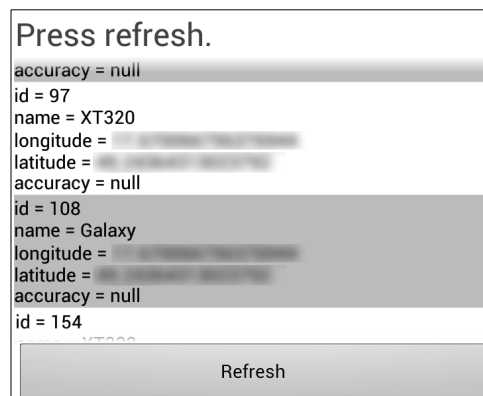
⁸ Zdrojové kódy serveru jsou součástí příložených dat, avšak jejich autorem je student téže fakulty, Daniel Pohuba, který se podílel na druhé části projektu.

8.1.10 Seznam poloh

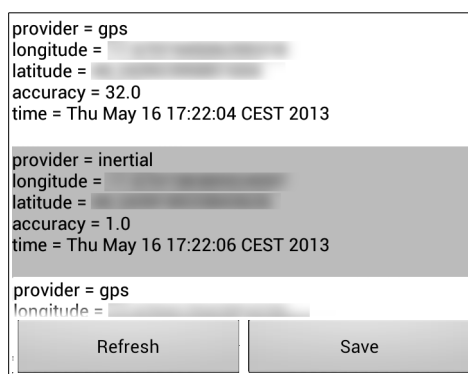
Alternativně lze ještě zobrazit posledních 100 poloh (vizte obrázek 8.11), kterými uživatel prošel při běžící službě *Odesílání polohy* a uložit je do externího souboru. Zde samozřejmě také můžeme otevírat externí mapu.



Obr. 8.9: Snímek displeje – Služba odesílání polohy



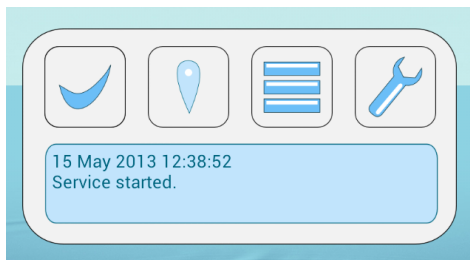
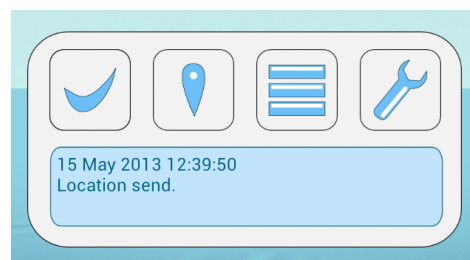
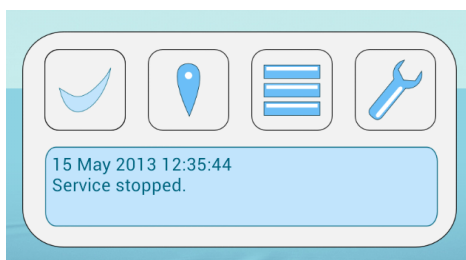
Obr. 8.10: Snímek displeje - Seznam uživatelů



Obr. 8.11: Snímek displeje - Seznam poloh

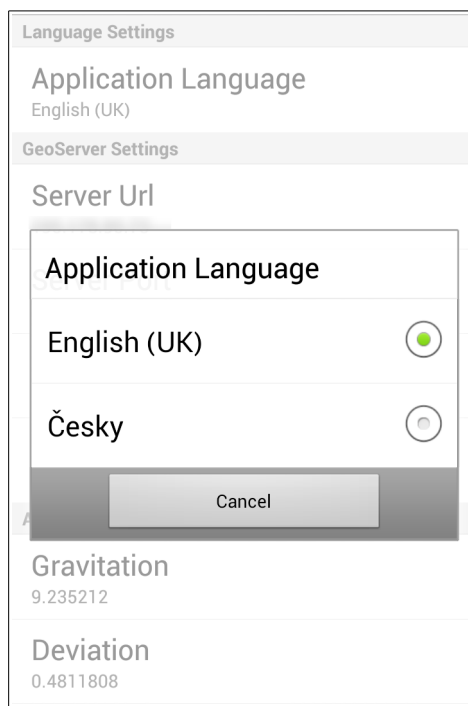
8.2 Widget

Slouží k pohodlnému ovládání aplikace. Skládá se z pěti prvků, na které je možné kliknout. První prvek spouští a zastavuje službu Odesílání polohy (vizte obrázky 8.12 a 8.14). Druhý umožňuje přepínání mezi stavy GPS přijímače (vizte obrázek 8.13). Třetí otevírá Menu a čtvrtý Nastavení. Pod těmito čtyřmi tlačítky je textové pole, které zobrazuje poslední zprávu ze záznamu služby Odesílání polohy. Dá se jím otevřít okno služby.

*Obr. 8.12: Widget - Služba spuštěna**Obr. 8.13: Widget - GPS zapnuto**Obr. 8.14: Widget - Služba zastavena*

8.3 Nastavení

je velmi důležitou částí aplikace, do které by se měl každý její uživatel před jejím prvním použitím podívat. Tabulka 8.1 shrnuje, k čemu jednotlivé části Nastavení slouží.

*Obr. 8.15: Snímek obrazovka - Nastavení*

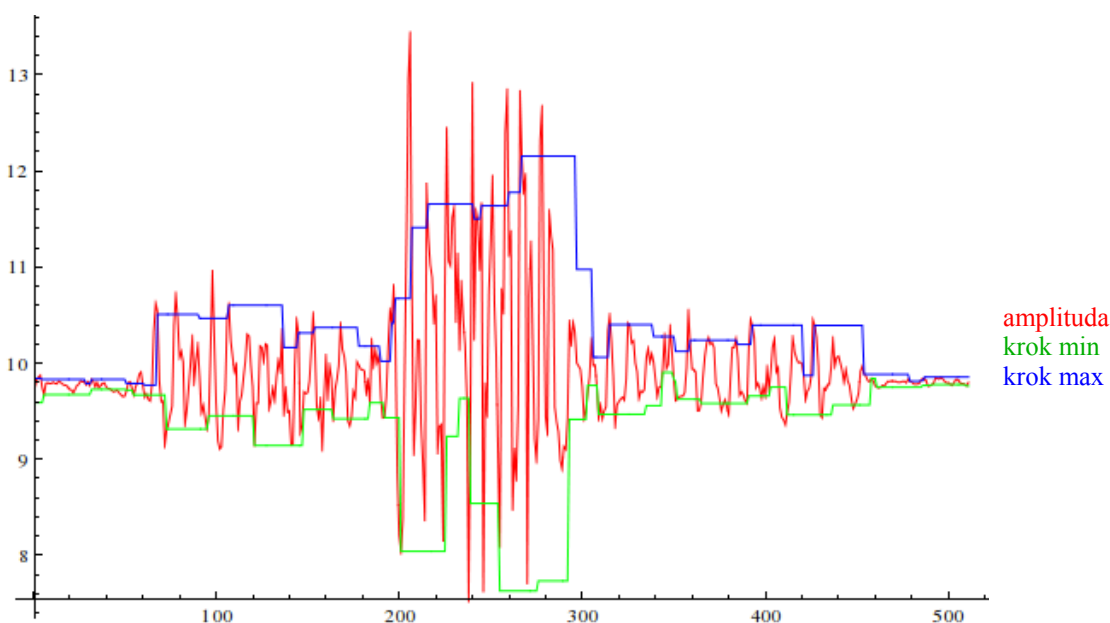
POLOŽKA	POPIS
Jazyková nastavení	
Jazyk aplikace	Uživatel má na výběr mezi britskou angličtinou a českým jazykem (vizte obrázek 8.15). Aplikace je kompletně přeložená do češtiny.
Nastavení Geo-serveru	
Hostitel	Adresa serveru. Může být zadána jako doména nebo IP adresa.
Port	Číslo portu, přes který server komunikuje.
Jméno uživatele	Jméno si zvolí každý uživatel sám.
ID uživatele	Identifikační číslo, které uživateli přidělí server, pokud žádné nemá. Nedá se zadat přímo, ale pouze smazat pro přidělení nového.
Nastavení akcelerometru	
Gravitace	Pouze informativní položka o výsledku kalibrace.
Odchylka	Pouze informativní položka o výsledku kalibrace.
Kalibrace	Funguje jako tlačítko, které otevírá okno kalibrace.
Nastavení krokoměru	
Délka kroku	Každý uživatel by si měl změřit svou průměrnou délku kroku. Postup je následující: Na zem se nakreslí rovná čára. Uživatel po ní udělá 10 kroků a změří vzdálenost, kterou ušel. Vzdálenost se vydělí 10.
Nastavení GPS	
Interval načítání	Je na výběr z několika intervalů, které přechází od několika vteřin až po několik minut. Kratší interval zvyšuje přesnost, delší výdrž baterie.
Nastavení nahrávání	
Instrukce	Pokud chce uživatel nahrávat data zobrazovaná v grafu nebo na ciferníku, stačí když zmáčkne jedno z HW tlačítek pro ovládání hlasitosti nebo spoušť kamery.
Úložiště	Ukládání dat je možné do složky dat aplikace (interní paměť), která se maže při odinstalaci, nebo do externí paměti (na kartu apod.).

Tab. 8.1: Popis nastavení

9 PRAKTICKÉ UKÁZKY

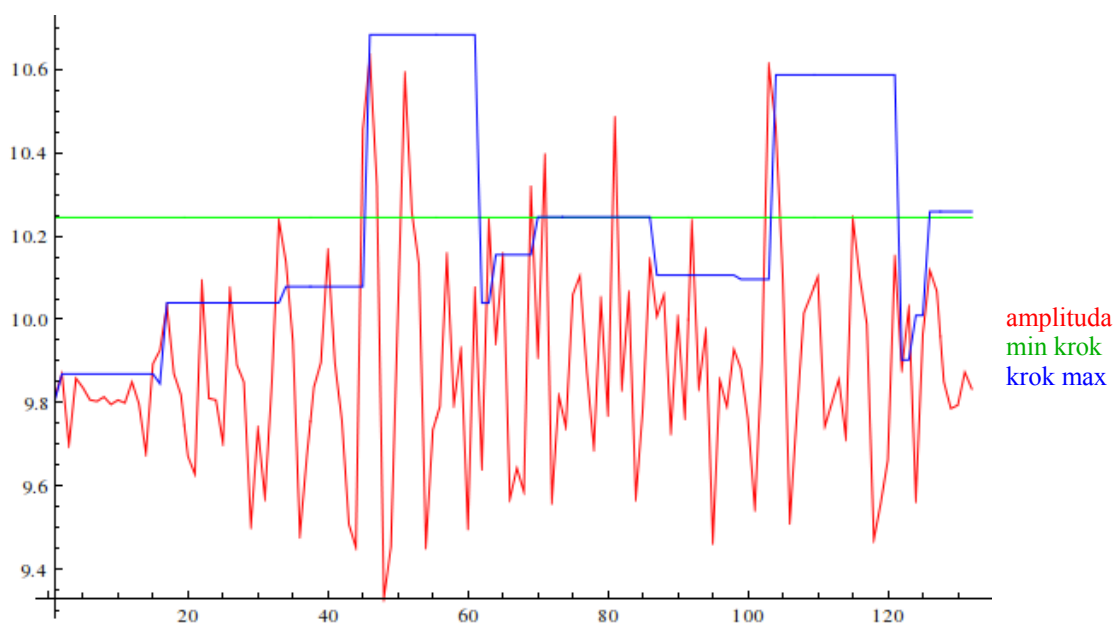
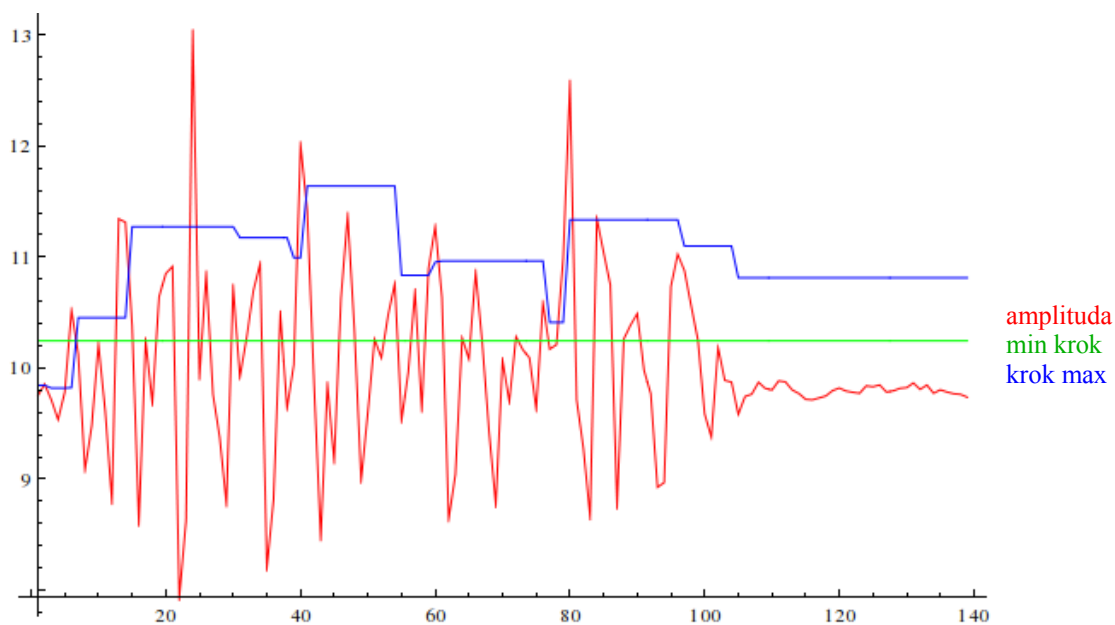
9.1 Demonstrace funkce krokoměru

Princip algoritmu krokoměru je popsán v kapitole 7.1. Nyní si ukážeme, jak jeho funkce vypadá v praxi. Na obrázku 9.1 vidíme, že amplituda akcelerometru je neustále shora i zezdola protínána dvěma v reálném čase počítanými hranicemi, jež odpovídají velikostem předchozích extrémních hodnot. Předchozí extrémy přitom nejsou brány v úvahu všechny, ale jen ty, které se nacházejí v intervalu přednastaveného zpoždění. Z obrázku je patrné, že když uživatel přejde z chůze do běhu, horní i spodní hranice se rychle rozšíří. Algoritmus přitom nemá problém zaznamenávat kroky. Pokud ale přejde zpět z běhu do chůze, zpoždění se projeví: chvíli trvá, než je rozpoznáno, že nízké hodnoty nejsou způsobeny reakcí akcelerometru na otřesy, ale kroky s nižším tempem.



Obr. 9.1: Krokoměr - Minimum a maximum

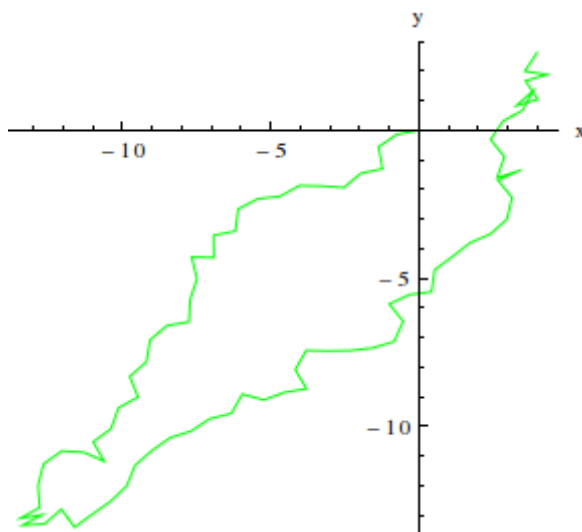
Dále můžeme na obrázcích 9.2 a 9.3 pozorovat, co se děje s krokoměrem, když je chůze příliš jemná (měkká nebo žádná obuv, měkká podložka). Limit označovaný jako minimální krok je nastaven při kalibraci tak, aby se co nejefektivněji zabránilo šumu ovlivňovat funkci krokoměru. Některé kroky však na akcelerometru způsobují natolik malé změny, že je těžké je rozšířit od výkyvů, které jsme při kalibraci zaznamenali u nehybného zařízení.

*Obr. 9.2: Krokoměr – Pod limitem**Obr. 9.3: Krokoměr – Nad limitem*

9.2 Demonstrace spolehlivosti krokoměru a azimutu

Obrázek 9.4 ukazuje, jak to dopadne, když se snažíte jít po téže cestě tam a zpátky ve snaze vrátit se do stejného bodu (vzdálenost je uváděna v metrech). Počátek je v bodě (0, 0), ale

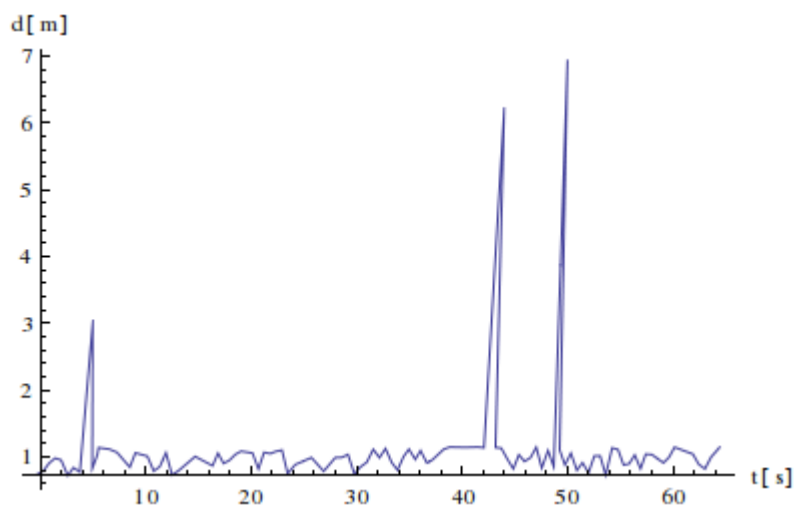
cíl je asi o 6 metrů posunutý. Jak je vidět, přestože cesta byla jen mírně zatočená, azimut mířil občas úplně špatným směrem. Krokoměř zase napočítal na zpáteční cestě o něco více kroků.



Obr. 9.4: Data získané z lokální mapy

9.3 Inerciální navigace

Testy inerciální navigace nedopadly až tak dobře. Na obrázku 9.5 vidíme graf pořízený při chůzi průměrnou rychlostí 1,8m/s, při které došlo ke korekci souřadnic až po 39s a chyba byla jen 6m, zatímco uražená vzdálenost byla asi 70m. To je docela dobrý výsledek, ale když v grafu pokračujeme dále, vidíme, že je klidně možné získat i větší chybu při mnohem kratší vzdálenosti.



Obr. 9.5: Rozdíly vzdálenosti

ZÁVĚR

Na začátku jsme se zabývali různými koncepty navigace ve vnitřních prostorách. Až na inerciální navigaci všechny vyžadují přítomnost různých vysílačů a přijímačů v budově. To je nevýhodné, pokud se snažíme navigaci do vnitřních prostor koncipovat co nejvíce univerzálně. Na druhou stranu se tímto podstatně zvyšuje přesnost. Inerciální navigace na externích zdrojích proto také závisí, a to především pokud jde o její inicializaci, ale neméně důležitým je i zpřesňování polohy. Inerciální navigace totiž akumuluje chyby (kterých se poměrně často dopouští), čímž roste v čase i její celková chybovost.

V porovnání s ostatními technologiemi má však zase výhodu v nízké spotřebě baterie. High Sensitivity GPS je určitě zajímavějším řešením, pokud jde o přesnost, ale větší citlivost si vyžaduje větší výkon, což baterii přenosného zařízení vyčerpává rychleji.

Zajímavé je i řešení společnosti GloPos, protože si v něm vystačíme pouze se signál mobilního operátora, ale zase musí být zavedeno všude, kde je chceme používat.

Pak je tu samozřejmě orientace pomocí WiFi, kterou využívá aplikace Google Maps. Tento typ určování polohy však není až tak efektivní, jak by se mohlo zdát, protože pokud se na něj chceme spoléhat vždy a všude, a ne jen na vybraných místech, kde jsou Google Maps pro vnitřní prostory zavedeny, může být naše poloha určena úplně špatně třeba jenom proto, že se majitel routeru o několik kilometrů přestěhoval.

V další části jsme se seznamovali s inerciální navigací z pohledu jejího provedení. Zvláště podrobně jsme se podívali na jednotlivé senzory, které jsou k ní potřeba. Nejprve jsme se zabývali akcelerometrem. Jeho data se dají poměrně snadno zpracovávat a jeho používání skoro vůbec nezatěžuje baterii. Jediné dvě věci, které se dají akcelerometru vytknout, jsou, že jeho data musíme filtrovat kvůli šumu, a že se na výstupu projevuje i setrvačnost a ne jen pohyb samotný.

Pak je tu magnetometr, který je zdrojem většiny problémů. Jeho šumovost i spotřeba je o něco vyšší, a také často neukazuje správně sever, protože je ovlivněn všemi magnetickými poli v okolí. V budovách to může být způsobeno přítomností kovů a elektrického vedení ve zdech, nebo i jiných kovových předmětů.

K určování orientace zařízení proto raději používáme i gyroskop. Gyroskop sice sám o sobě nemůže dávat informaci o orientaci, jelikož i na něj působí moment setrvačnosti, ale může nám pomoci reagovat na skutečné otočení přístroje.

Abychom data ze všech tří senzorů mohli dát dohromady, potřebujeme používat filtry. Dolní propust nám umožňuje získat z celkové akcelerace gravitaci. Také s ní můžeme filtrovat orientaci získanou z akcelerometru a magnetometru, abychom odstranili šum a mohli tak tato data kombinovat s orientací odhadovanou gyroskopem, jehož data jsou sama o sobě hladká, takže z nich horní propustí můžeme efektivně získat malé změny. Této kombinaci filtrů se říká komplementární filtr.

V praktické části šlo o zhotovení aplikace pro operační systém Android, která by odesílala polohu odhadovanou inerciální navigací na server. To se více méně podařilo. Aplikace je plně funkční a má všechny požadované vlastnosti, snad jen s výjimkou přesnosti odhadované polohy, jíž je problematické dosáhnout už jen kvůli potížím spojenými s inerciální navigací pro chodce obecně.

Je totiž potřeba nastavit velké množství parametrů, aby docházelo k co nejmenší chybě, a to jak na straně programátora, tak na straně uživatele. Některé problémy se přitom zdají neřešitelné. Můžeme například nastavit deklinaci magnetického pole Země, ale nemůžeme už zabránit tomu, aby nám magnetometr neukazoval i jinam, než na geografický sever. Stejně tak můžeme přizpůsobit nastavení akcelerometru tomu, aby odpovídalo charakteristice kroku uživatele, ale nemůžeme naučit akcelerometr, aby uměl rozlišit mezi krokem a například mávnutím rukou, v níž je přístroj držen.

Největší problém však vidím v tom, že se při chůzi všechny senzory otřásají, což je velká nevýhoda oproti navigaci předmětů, které se pohybují na kolech a nebo vzduchem. Chůze po nerovném povrchu způsobuje, že měříme akceleraci ve směru náklonu chodidla při došlápnutí jako pohyb do strany, přestože krok činíme kupředu. K tomu ještě ne každý krok má stejnou délku, ale kdybychom se snažili vypočítat délku kroku dvojitou integrací šumových dat akcelerometru, byla by chyba ještě větší, než když je délka kroku nastavena napevno. Navíc různá obuv a různá tvrdost povrchu může akceleraci ovlivnit snad i více, než samotná délka kroku.

Můj závěr tedy je, že aplikace, již jsem vytvořil, je pravděpodobně vhodnější pro šetření energie baterie při současném používání GPS někde ve volném prostoru v přírodě, kde je povrch relativně stejný, než pro dlouhodobé určování polohy v prostředí, kde je GPS signál dlouhodobě nedostupný.

CONCLUSION

The most important of theoretical part in this thesis was to analyse abilities of sensors used in the inertial navigation for pedestrians and their potential to give us relatively precise information about the position.

First of them is an accelerometer. Working with its data is easy, though we have to count with noise caused by several kinds of unwanted vibrations. Other problem is that inertial force is causing accelerometer to register shakes which are not really happening. However, accelerometer has very little power consumption.

The second one (also the most problematic one) is a magnetometer. Magnetometer is not pointing to geographic north. It points in direction of strongest magnetic field which is not necessarily the magnetic north of the Earth, but could be anything else with magnetic potential.

A gyroscope, the last of the three, is good in improving the quality of information about the orientation of the device. Although, some devices may not have it at all.

In the practical part I was developing an application for Android OS. It works with API 10 and beyond. It has all abilities of application of this sort. It is capable of estimating the probable position by using inertial navigation and sending it to a remote server, but using it for a bit longer time seems useless, because inertial navigation is cumulating errors. That is a certain disadvantage in comparison with other indoor navigating methods which involve external sensors.

Errors can be caused by many reasons. Firstly, various parameters need to be set correctly on both side of the user and side of the programmer. If that is not done properly, we know in what direction we go, but not how far we went.

Yet calculating the length of each step by double integration of accelerometer data is not a good idea either. Accelerometer is measuring greater acceleration on harder surfaces and it also depends on the type of shoes. Besides that, integration of noisy data is never recommended.

Then there's the problem with walking. When we walk, all sensors in our device are shaking, which is causing them to produce highly distorted information about what is really going on. Also, if we stomp on something of a irregular shape, sensors can go into side, while the step was facing forward.

Therefore, my final conclusion is, that the application I developed would be more useful in nature where the surface is not that variable and GPS signal is mostly available rather than inside buildings where there's lots of magnetic objects.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WOODMAN, Oliver J. An introduction to inertial navigation. In: *Journal of Navigation*. Cambridge: Cambridge University, 2007, s. 249-259. ISSN 1476-2986. DOI: 10.1017/S0373463300036341. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0373463300036341
- [2] FOXLIN, E. Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors: Moving Mixed Reality into the Real World. In: *Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors: Volume: 25, Issue: 6* [online]. IEEE Computer Society, 2005 [cit. 2013-05-19]. ISSN 0272-1716. DOI: 10.1109/MCG.2005.140, PubMed ID: 16315476. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1528431>
- [3] LAWITZKI, Paul. Android Sensor Fusion Tutorial. In: *Thousand Thoughts* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.thousand-thoughts.com/2012/03/android-sensor-fusion-tutorial/>
- [4] SACHS, David. Sensor Fusion on Android Devices: A Revolution in Motion Processing. In: *YouTube* [online]. 2010 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=C7JQ7Rpwn2k>
- [5] Tilt Compensating a Compass with an Accelerometer. In: *Love Electronics* [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <https://www.loveelectronics.co.uk/Tutorials/13/tilt-compensated-compass-arduino-tutorial>
- [6] WALTER, Lewin. Lec 24 | 8.01 Physics I: Classical Mechanics, Fall 1999. In: *YouTube* [online]. 1999 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=zLy0IQ78ssk>
- [7] GLOPOS TECHNOLOGIES. *GloPos* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://glopos.com/>
- [8] Navatar: Navigating Blind Users in Indoor Spaces using Tactile Landmarks. UNIVERSITY OF NEVADA. *Eelke Folmer* [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://eelke.com/navatar-indoor-navigation-blind.html>
- [9] FASEL, Marc. A Good Look at Android Location Data. In: *Shine Technologies: The Shine Blog* [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://blog.shinotech.com/2011/10/14/a-good-look-at-android-location-data/>
- [10] SensorManager. GOOGLE INC. *Android Developers* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html>
- [11] Motion Sensors. GOOGLE INC. *Android Developers* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html

-
- [12] Position Sensors. GOOGLE INC. *Android Developers* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_position.html
- [13] The World Magnetic Model. *National Geospatial-Intelligence Agency* [online]. 2009 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

API	Application programming interface – Programovací aplikační rozhraní
FOG	Fiber optic gyroscope – Gyroskop s optickými vlákny
GBAS	Ground Based Augmentation Systems – Pozemní dopňující systémy
GNSS	Global Navigation Satellite System – Globální navigační satelitní systém
GPS	Global positioning systém – Globální navigační systém
IPS	Indoor positioning systém – Navigace ve vnitřních prostorech
LPS	Local positioning systém – Lokální navigační systém
RFID	Radio-frequency identification – Identifikace pomocí radiové frekvence
RTLS	Real-time locating systém – Systém určování lokace v reálném čase
TTFF	Time to first fix – Doba do první opravy
VSG	Vibrating structure gyroscope – Gyroskop s vibrující strukturou

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 4.1: Znázornění akcelerometru.....	22
Obr. 4.2: Precese zavěšeného kola.....	24
Obr. 4.3: Stolní gyroskop.....	25
Obr. 5.1: Komplementární filtr.....	32
Obr. 6.1: Standardní souřadnicový systém.....	35
Obr. 7.1: Znázornění chůze na akcelerometru ve 3D prostoru.....	41
Obr. 7.2: Určování azimutu.....	41
Obr. 7.3: Azimut vs. horizontální zrychlení při chůzi na sever.....	42
Obr. 8.1: Snímek displeje - Menu.....	45
Obr. 8.2: Snímek displeje - Dostupné senzory.....	46
Obr. 8.3: Snímek displeje - Poskytovatelé polohy.....	47
Obr. 8.4: Snímek displeje - Data senzorů.....	48
Obr. 8.5 Snímek displeje - Ciferníky.....	48
Obr. 8.6: Snímek obrazovky - Kalibrace.....	48
Obr. 8.7: Snímek displeje - Kalkulátor.....	49
Obr. 8.8: Snímek displeje - Lokální mapa.....	50
Obr. 8.9: Snímek displeje – Služba odesílání polohy.....	51
Obr. 8.10: Snímek displeje - Seznam uživatelů.....	51
Obr. 8.11: Snímek displeje - Seznam poloh.....	51
Obr. 8.12: Widget - Služba spuštěna.....	52
Obr. 8.13: Widget - GPS zapnuto.....	52
Obr. 8.14: Widget - Služba zastavena.....	52
Obr. 8.15: Snímek obrazovka - Nastavení.....	52
Obr. 9.1: Krokomeř - Minimum a maximum.....	54
Obr. 9.2: Krokomeř – Pod limitem.....	55
Obr. 9.3: Krokomeř – Nad limitem.....	55
Obr. 9.4: Data získané z lokální mapy.....	56
Obr. 9.5: Rozdíly vzdálenosti.....	56

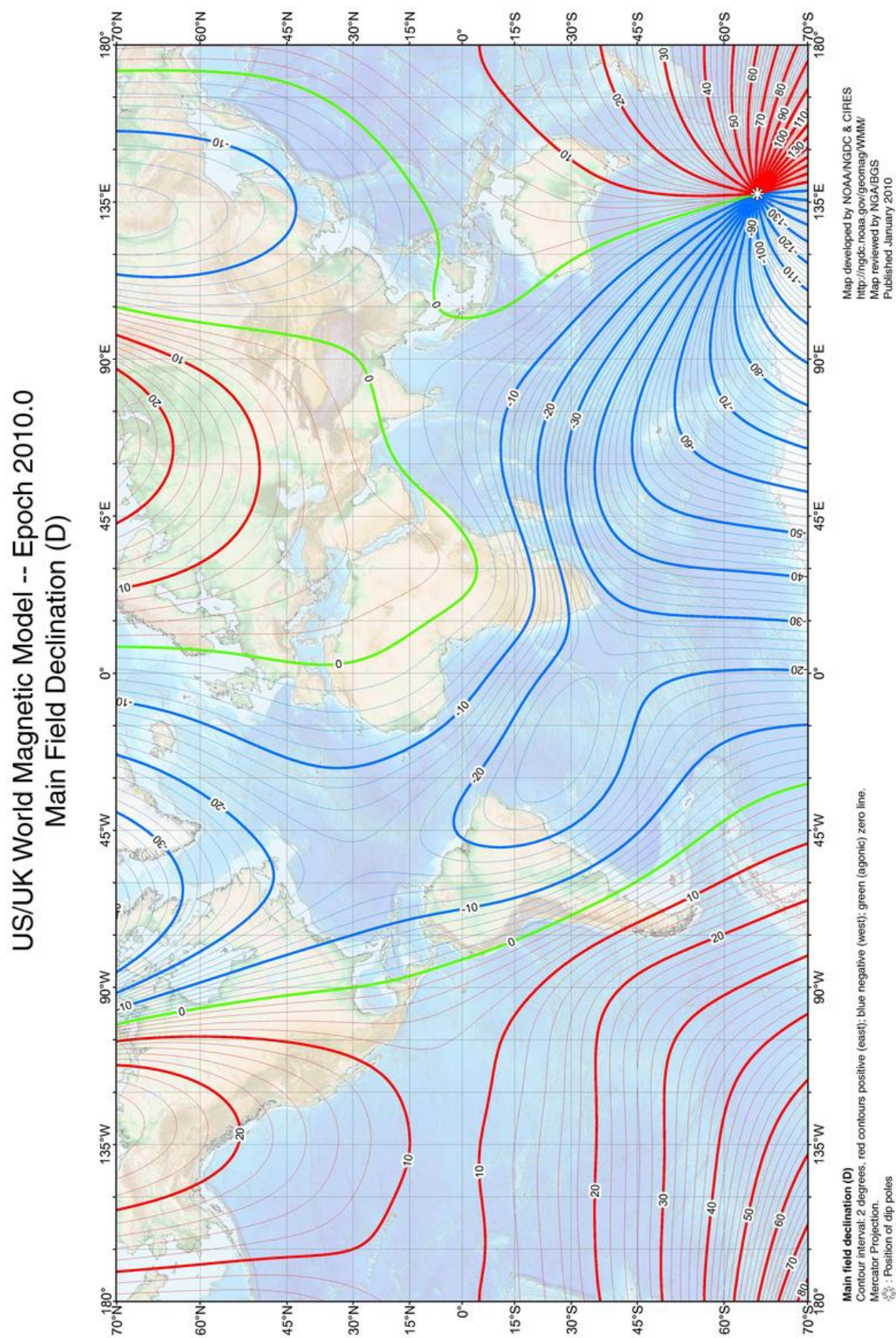
SEZNAM TABULEK

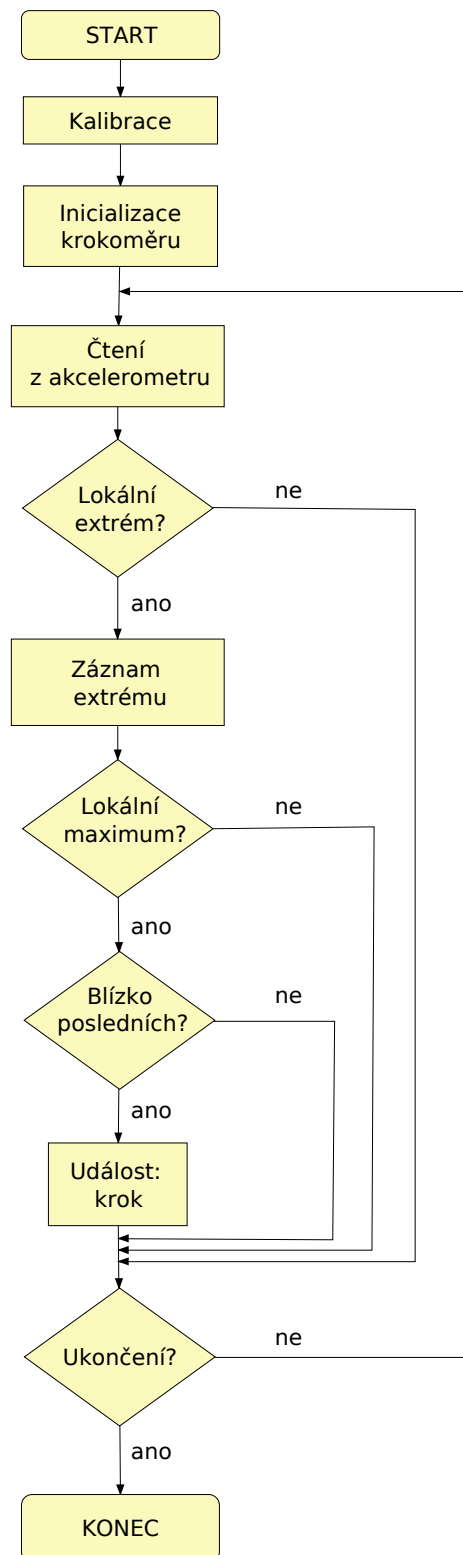
Tab. 6.1: Zrychlení - parametry.....	35
Tab. 6.2: Gravitační zrychlení – parametry.....	35
Tab. 6.3: Lineární zrychlení - parametry.....	36
Tab. 6.4: Úhlová rychlost – parametry.....	36
Tab. 6.5: Magnetické pole - parametry.....	36
Tab. 6.6: Orientace - parametry.....	37
Tab. 8.1: Popis nastavení.....	52

SEZNAM PŘÍLOH

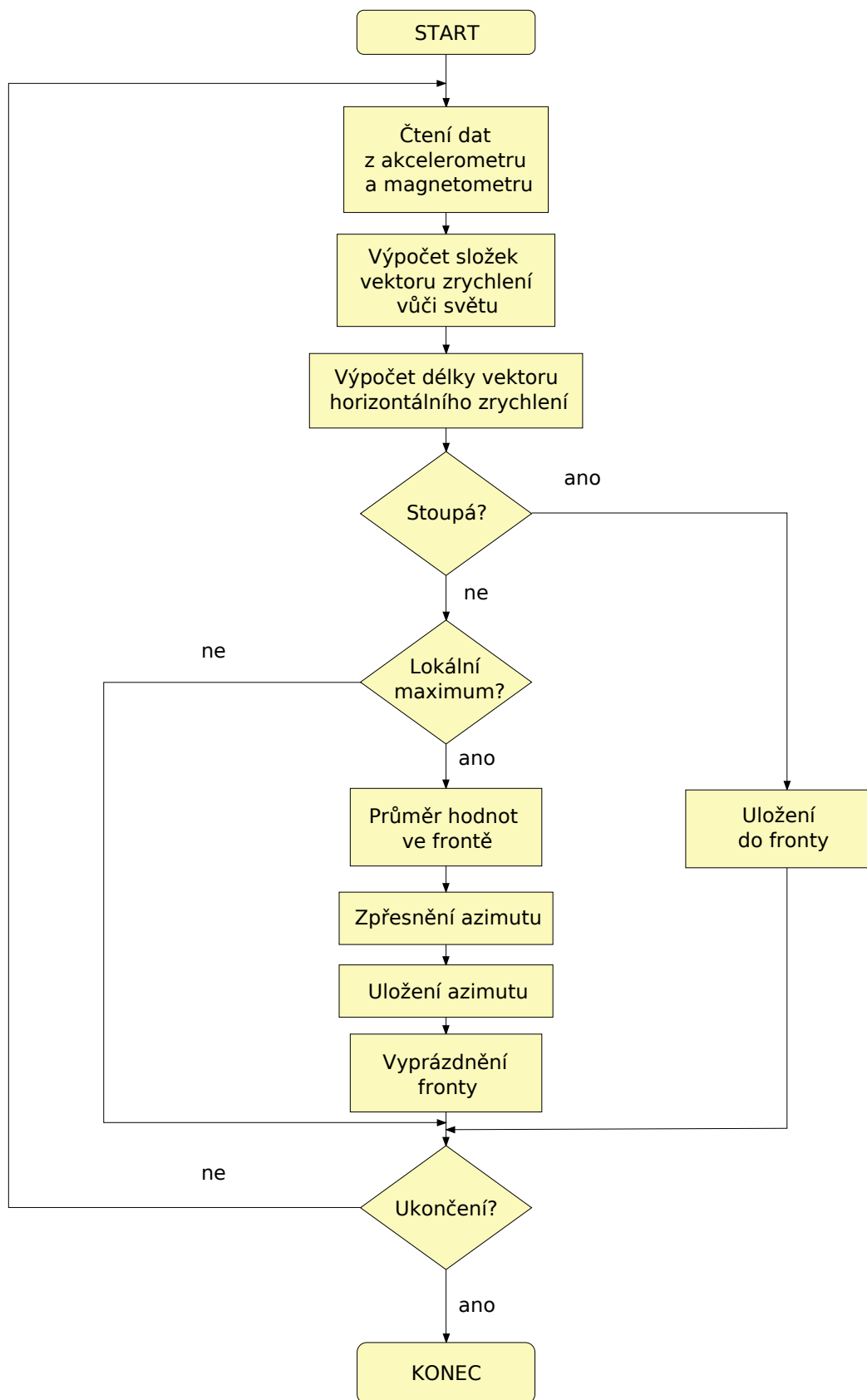
Příloha I: Proměnlivost magnetického pole Země.....	65
Příloha II: Vývojový diagram – Krokoměr.....	66
Příloha III: Vývojový diagram – Určování azimutu.....	67
Příloha IV: Vývojový diagram – odesílání polohy.....	68

PŘÍLOHA I: PROMĚNLIVOST MAGNETICKÉHO POLE ZEMĚ



PŘÍLOHA II: VÝVOJOVÝ DIAGRAM – KROKOMĚR

PŘÍLOHA III: VÝVOJOVÝ DIAGRAM – URČOVÁNÍ AZIMUTU



PŘÍLOHA IV: VÝVOJOVÝ DIAGRAM – ODESÍLÁNÍ POLOHY