



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**  
**Fakulta aplikované informatiky**

# **Implementace elektronického kompasu**

Bc. David Pijáček

---

Diplomová práce  
2017



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**  
**Fakulta aplikované informatiky**

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2016/2017

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Pijáček**

Osobní číslo: **A14479**

Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Informační technologie**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Implementace elektronického kompasu**

Téma anglicky: **The Implementation of an Electronic Compass**

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte literární rešerši na dané téma.
2. Nastudujte principy funkce MEMS senzorů.
3. Odvodte a provedte kalibraci akcelerometru.
4. Odvodte a provedte kalibraci magnetometru.
5. Navrhněte elektronický kompas s kompenzací náklonu.
6. Vytvořte aplikaci elektronického kompasu.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. LACKO, L'uboslav. Vývoj aplikací pro Android. Brno: Computer Press, 2015. ISBN 978-80-251-4347-6.
2. PEDLEY, M.: AN3461 Application note: Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer, (2013). Accessed from:  
[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3461.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf)
3. PEDLEY, M.: AN4399 Application note: High Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer, (2013). Accessed from:  
[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN4399.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4399.pdf)
4. STMicroelectronics, AN3192 Application note: Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass, 2010: 34p., Accessed from:  
<https://www.pololu.com/file/0J434/LSM303DLH-compass-app-note.pdf>
5. T., Ozyagcilar, AN4248 Application note: Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors, 2013. Accessed from: [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN4248.pdf](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf)
6. NOAA, Wandering of the Geomagnetic poles, National Oceanic And Atmospheric Administration, Accessed from:  
<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Martin Sysel, Ph.D.**

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

**3. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce:

**16. května 2017**

Ve Zlíně dne 3. února 2017

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

*děkan*



prof. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.

*ředitel ústavu*

**Jméno, příjmení: Bc. David Pijáček**

**Název bakalářské/diplomové práce: Implementace elektronického kompasu**

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/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 diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/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 diplomovou/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 – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/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 diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/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 diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vytvoření aplikace elektronického kompasu pro určení severního zemského pólu za pomoci dat získanými tříosým akcelerometrem a magnetometrem včetně kalibrace těchto senzorů pomocí dostupných metod.

Cílem práce je vytvoření aplikace získávající hodnoty s daných senzorů, jejich kalibrace a následné určení severního zemského pólu. Aplikace je vytvořena pro zařízení obsahující operační systém Android vybavenými senzory akcelerace a měření magnetického pole doplněnými o senzor určování polohy GPS pro zvýšení přesnosti.

Klíčová slova:

Akcelerometr, magnetometr, ekompas, deklinace, Hard Iron, kalibrace

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with problematice of creating an electronic compass application for determination of North Pole using data obtained by a three-axis accelerometer and magnetometer, including the calibration of the sensors using the available methods.

The aim of the thesis is creating an application obtaining values with given sensors, their calibration and subsequent determination of the North Pole. The application is designed for devices with the Android operating system equipped with acceleration and magnetic fields sensors completed with GPS position sensors to increase accuracy.

Keywords:

Accelerometer, magnetometer, ecompass, declination, Hard Iron, calibration

Rád bych touto cestou vyjádřil své poděkování panu doc. Ing. Martinu Syslovi za jeho cenné rady, trpělivost a pomoc při získání potřebných informací a podkladů při vedení mé diplomové práce.

Děkuji

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HISTORIE KOMPASU</b> .....	<b>11</b>
<b>2 MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ</b> .....	<b>12</b>
2.1 INKLINACE A DEKLINACE .....	13
<b>3 ELEKTRONICKÝ KOMPAS</b> .....	<b>14</b>
3.1 PRINCIP ELEKTRONICKÉHO KOMPASU.....	14
3.2 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM APLIKACE .....	15
<b>4 MEMS TECHNOLOGIE</b> .....	<b>16</b>
4.1 MEMS AKCELEROMETR .....	16
4.1.1 Princip MEMS akcelerometru.....	17
4.1.2 Chyby měření akcelerometru .....	18
4.1.2.1 Chyba offsetu - BIAS.....	18
4.1.2.2 Teplotní závislost offsetu .....	19
4.1.2.3 Parazitní zrychlení .....	19
4.2 MEMS MAGNETOMETR .....	20
4.2.1 Princip MEMS magnetometru .....	21
4.2.2 Chyby měření .....	22
4.2.2.1 Vliv okolí .....	22
4.2.2.2 Vliv deklinace .....	23
4.2.2.3 Vliv náklonu – inklinace.....	23
<b>5 SENZORY V OPERAČNÍM SYSTÉMU ANDROID</b> .....	<b>24</b>
5.1 SENZORY POHYBU .....	24
5.2 SNÍMAČE OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ.....	24
5.3 SNÍMAČE POLOHY.....	24
<b>6 URČENÍ ORIENTACE ELEKTRONICKÉHO KOMPASU</b> .....	<b>25</b>
6.1.1 Algoritmus kompenzace náklonu' .....	27
6.1.2 Kompenzace Hard Iron .....	28
6.1.3 Kompenzace deklinace.....	29
6.2 FILTRY .....	30
6.2.1 Filtr typu dolní propust – LowPass Filter .....	30
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>32</b>
<b>7 MĚŘICÍ APLIKACE</b> .....	<b>33</b>
7.1 STRUKTURA MĚŘICÍ APLIKACE .....	34
7.2 KALIBRACE MĚŘENÝCH HODNOT .....	34
7.2.1 Algoritmus Hard Iron offsetu .....	34
7.2.2 Filtr typu dolní propust.....	35
7.2.3 Kompenzace offsetu akcelerometru .....	38
7.2.4 Kompenzace deklinace s využitím GPS .....	38
7.3 TRANSFORMACE ZÍSKANÝCH HODNOT PRO URČENÍ ROTACE .....	39
<b>8 APLIKACE – ELEKTRONICKÝ KOMPAS</b> .....	<b>41</b>

8.1	NÁVRH STRUKTURY APLIKACE.....	41
8.2	GRAFICKÝ NÁVRH APLIKACE.....	42
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>43</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>45</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>48</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>49</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>50</b>



## ÚVOD

Určení zemského severního pólu bylo od dávných dob důležitým aspektem při cestování, především při mořeplavbě a dalekých cestách. Především v mořeplavbě bylo určení směru velmi důležité, jelikož na moři neexistují žádné body, podle kterých se dá určit správný směr. Z tohoto důvodu začali vznikat první zařízení k určování směru magnetického pole, které směřuje, i když nepřímo k severnímu pólu země. Kompas se od kusu magnetovce plovoucího na dřevěné podložce vyvíjely a v dnešní době elektronických obvodů lze mechanickou podstatu kompasů a určení severního pólu vyjádřit s využitím elektronických obvodů měřící magnetické pole země a pozici zařízení.

Tato práce se zabývá pochopením principů jednotlivých elektronických senzorů pro měření magnetického pole a zrychlení, které jsou označovány jako senzory MEMS. Tyto senzory jsou v dnešní době dostupné široké veřejnosti, především ve většině mobilních zařízeních. Právě proto je práce zaměřena na využití těchto senzorů, které jsou v mobilních zařízeních s operačním systémem Android. Mobilní zařízení s tímto systémem jsou ve světovém měřítku nejpoužívanějšími zařízeními.

Jelikož v mobilních zařízeních jsou použity senzory technologie MEMS a cena výsledných zařízení často nebývá vysoká, odráží se to i na použitých senzorech a jejich výsledné přesnosti. I když se přesnost a citlivost neustále zvyšuje, je výhodné při jejich použití přesnost dále v aplikaci zpřesňovat. U aplikace elektronického kompasu pro určování směru sice není důležitá přesnost na desetiny úhlových stupňů, ale rozdíl několika stupňů může být znatelný.

Práce se tak zabývá nastudováním principů senzorů a možností jejich kalibrace a zpřesnění měřených údajů aby bylo dosaženo dostatečné přesnosti k vytvoření aplikace elektronického kompasu. Budou popsány technologie senzorů, jejich možné využití a možnosti jejich kalibrace ke zpřesnění jejich výstupů s ohledem na možnosti systému Android. Aplikace bude v systému Android primárně využívat senzory akcelerace a magnetometru spolu s dostupnými nástroji aplikačního programového vybavení API pro práci s těmito senzory. Dále bude aplikace rozšířena o sensor určování polohy pro finální zpřesnění severního pólu země. V aplikaci budou použity nastudované principy kalibrace senzorů z teoretické části.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 HISTORIE KOMPASU

V současné době přesný původ kompasu není potvrzen. Jako nejpravděpodobnější varianta o původu kompasu se jeví jeho původ ve starověké Číně. První písemná zmínka o magnetismu se objevuje ve čtvrtém století před Kristem v knize s názvem: Book of the Devil Valley Master (鬼谷子): "The lodestone makes iron come or it attracts it." První nepopíratelný důkaz použití kompasu a zmínka o zmagnetizované jehle v misce s vodou se v čínské literatuře objevuje až v roce 1086. V knize „The Dream Pool Essay“ popisuje učenec Shen Kua první použití kompasu (New World Encyclopedia contributors, 2017).

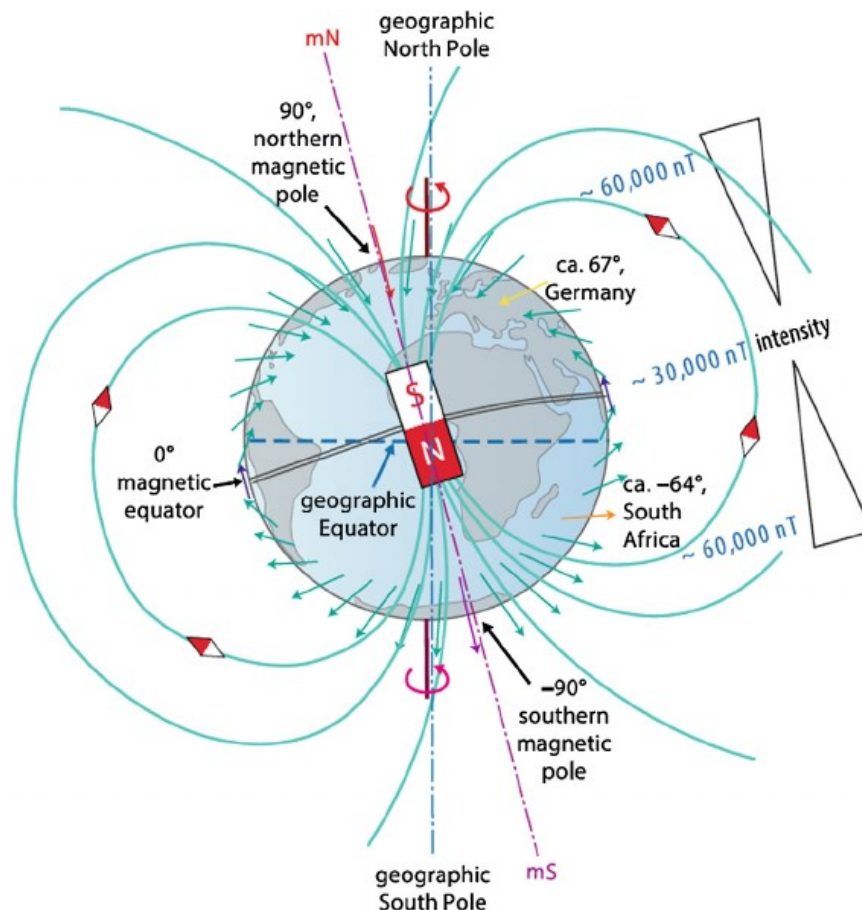
Následně se vývoji kompasu věnovala především Evropa. Jelikož jehla v misce s vodou byla příliš nepřesná a při velkém pohybu lodi byl problém s přílišným pohybem jehly ve vodě, umístila se zmagnetizovaná jehla na vertikální osu do nádoby bez vody. Na tuto jehlu se umístila kruhová karta, které se začalo říkat kompasová růžice. Kompasová růžice tehdy obsahovala italské názvy hlavních větrů. Tento kompas označovali jako suchý kompas.

Kolem roku 1750 ho zdokonalil Gowin Knigh. Dělal pokusy na starých typech kompasů a zjistil, že některé střelky mají šest pólů místo dvou. Dva póly měla na koncích, dva póly byly u zúžení a další dva póly se vytvořily u otvoru. Dalšími pokusy zjistil, „že nejlepší a nejjednodušší je dlouhá pravoúhlá střelka bez otvoru pro osu. Vytvořil tak kompas, který na klidném moři převyšoval všechny ostatní. Potíže nastaly, když se zvedly vlny. Problém byl v příliš lehké kompasové růžici, která nebyla schopna dostatečně absorbovat rázy rozbouřeného moře (Pilch, 2010).

## 2 MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ

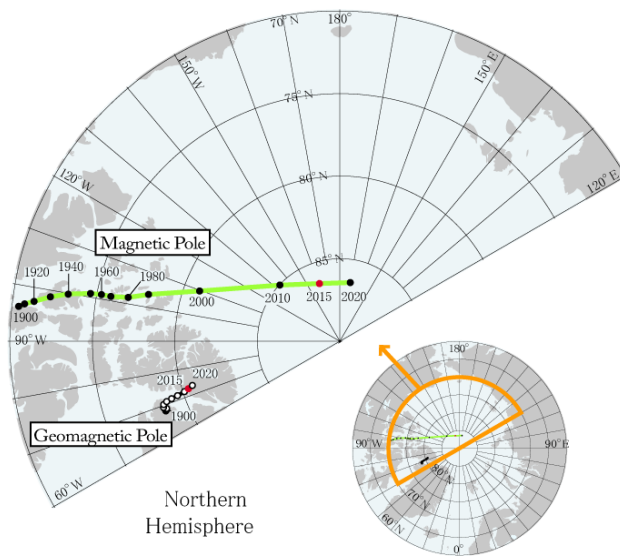
Magnetické pole Země neboli geomagnetické pole, je indukované magnetické pole v okolí Země. V tomto okolí Země působí magnetické síly vytvořené tzv. geodynamem uvnitř Země. Magnetické pole Země dosahuje až do vzdálenosti stotisíc kilometrů od povrchu planety. Magnetické pole kolem Země není symetrické. Jeho tvar je ovlivněn působením kosmického záření od Slunce. Na straně ke Slunci je pole zploštělé a na odvrácené straně naopak protáhlé (Šimberský, 2012).

Magnetické pole je se v čase mění a není stálé, mění se jeho intenzita a v průměru jednou za 250 000 let dochází ke změně polarity magnetických pólů. V současné době je v blízkosti zemského severního pólu jižní magnetický pól a u jižního zemského pólu se nachází severní magnetický pól.

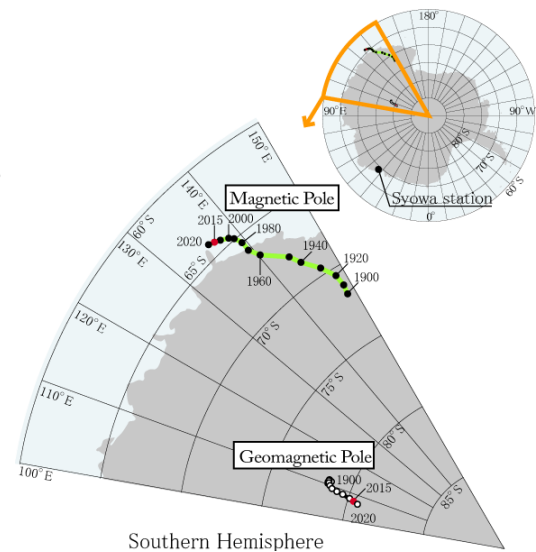


Obrázek 1: Magnetické a geografické póly Země (Azzarone, 2017)

Magnetické póly v průběhu let mění svou pozici a posouvají se, toto se nazývá „drift magnetických pólů“. To je zobrazeno na následujících obrázcích:



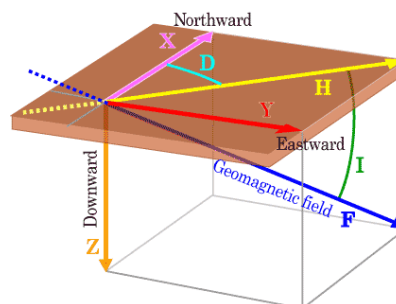
Obrázek 2 : Drift magnetického severního pólu (Data Analysis Center pro geomagnetismu and Space magnetismus, 2015)



Obrázek 3: Drift magnetického jižního pólu (Data Analysis Center pro geomagnetismu and Space magnetismus, 2015)

## 2.1 Inklinace a deklinace

Směr a velikost magnetického pole na každém místě planety je možné popsat vektorem. Souřadnicový systém volíme tak, že osa  $x$  směřuje k zemskému severnímu pólu, osa  $z$  je ve směru gravitace v daném místě a osa  $y$  doplňuje pravouhlý souřadnicový systém. Úhel  $D$ , který svírá horizontální část magnetického pole s osou  $x$ , nazýváme deklinace. Deklinace je tedy úhel mezi severním zemským pólem a jižním magnetickým pólem. Výsledný vektor magnetického pole je složen z horizontální části  $H$  a z vertikální části  $Z$  magnetického pole a je popsán vektorem  $F$ . Vektor  $F$  svírá s horizontální složkou magnetického pole úhel  $I$ . Tento úhel nazýváme inklinace. Grafické zobrazení je na následujícím obrázku. (Šimberský, 2012).



Obrázek 4: Geomagnetické elementy (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, 2017)

### 3 ELEKTRONICKÝ KOMPAS

Oproti standardním kompasům elektronický neobsahuje žádnou mechanickou střílku ukazující směr. Elektronický kompas je zařízení využívající elektronické obvody, kde je jeho základem senzor magnetického pole. Jelikož samotný magnetometr neumí rozpoznat, v jaké poloze se zařízení nachází, používá se v kombinaci se senzory náklonu, akcelerometrem nebo gyroskopem, případně kombinací obou. Pomocí hodnot získaných z magnetometru a senzoru náklonu lze podle definovaných rovnic vypočítat úhel natočení zařízení. Tento úhel odpovídá pak směru natočení k magnetickému pólu. Pro návrh elektronického kompasu se nejvíce osvědčily senzory měřící hodnoty ve třech směrech.

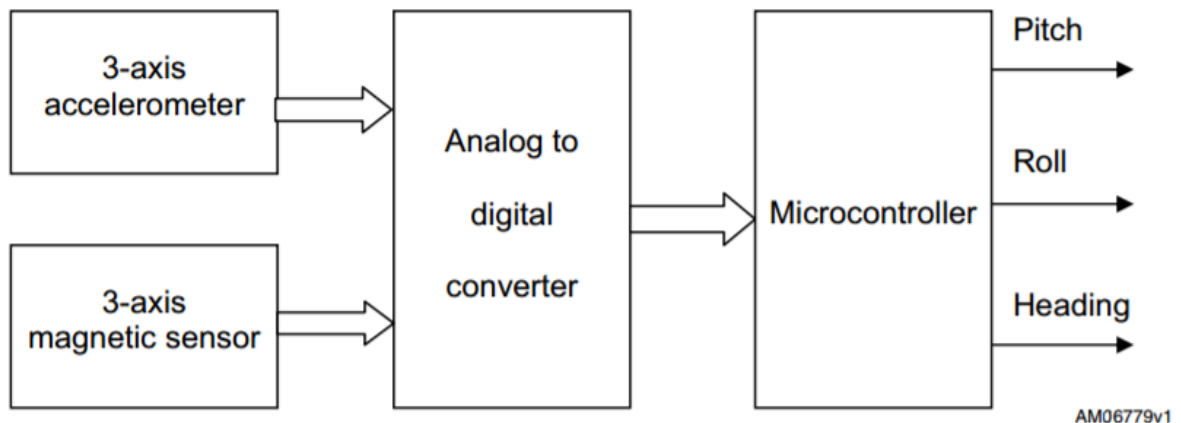
Se znalostmi o rotaci zařízení lze následně vytvořit aplikaci samotného kompasu případně hodnoty použít i v jiných aplikacích. Typickým použitím jsou mapové aplikace kde se zobrazená mapa může otáčet podle směru natočení zařízení apod.

Nevýhodou těchto kompasů jsou vlivy ovlivňující jejich přesnost. Přesnost určování orientace je typicky ovlivněna především kvalitou použitých součástek, šumem vznikajícím při měření hodnot se snímačů, teplotní závislostí použitých součástek, polohou součástek na desce plošných spojů, umístěním zařízení v blízkosti velkých zdrojů magnetického rušení jakými jsou kovové předměty, magnety apod. Se zmíněnými rušivými vlivy ovlivňující přesnost určování směru je třeba v aplikaci počítat a snažit se je pokud možno ošetřit, aby výsledný směr byl co nejpřesnější.

#### 3.1 Princip elektronického kompasu

Jak již bylo zmíněno výše, základním principem elektronického kompasu jsou data z magnetometru a akcelerometru. Obrázek 5 níže ukazuje blokové schéma elektronického kompasového systému. Mikrokontroler, nebo aplikace se používá ke sběru dat z tříosých akcelerometrických a magnetometrických dat pro výpočet úhlu náklonu v podélné ose rotace  $\varphi$  (roll), v příčné ose -  $\theta$  (pitch) a rotace zařízení ve směru otáčené hodinových ručiček -  $\psi$  (yaw). Následuje postup budování funkčního elektronického kompasového systému.

Základem jsou fyzické senzory akcelerometru a magnetometru. Analogové hodnoty s těchto senzorů jsou pomocí A/D převodníku převáděny na digitální signál. Digitální signál je předáván do řídicí části – Mikrokontroleru (v našem případě aplikace), kde dochází k výslednému zpracování měřených hodnot. Výsledkem zpracování měřených hodnot jsou hodnoty rotace v jednotlivých osách.



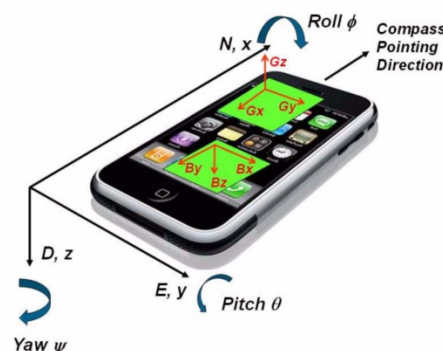
Obrázek 5: Princip elektronického kompasu (STMicroelectronics group of companies, 2010)

### 3.2 Souřadnicový systém aplikace

"Přirozený" souřadný systém akcelerometru není vhodným systémem, který se používá při diskusi o orientaci spotřebitelského výrobku, jako je například smartphone, protože akcelerometr může být umístěn v libovolné orientaci na desce plošných spojů. Je rozumnější používat souřadnicový systém podle os výsledného zařízení (Ozyagcilar, 2015). [AN3461]

- Osa X je zarovnána podél osy těla zařízení,
- Osa Z směřuje dolů tak, aby ve vodorovném stavu zařízení ukazovala směr gravitačního zrychlení,
- Osa y je zarovnána v pravém úhlu k osám X a Z.

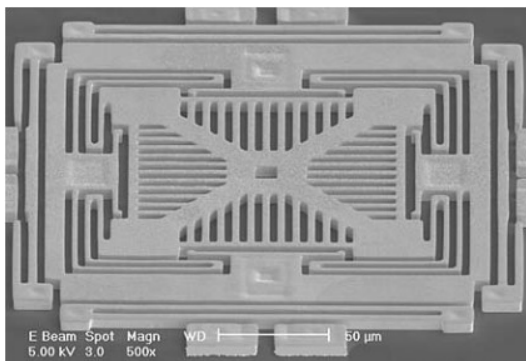
Rotace zařízení je popsána pomocí úhlu natočení kolem osy **Z** jako  $\psi$  (**yaw**), úhlu podélného naklonění v ose **Y** jako  $\theta$  (**pitch**) a úhlu příčného náklonu podél osy **X** jako  $\phi$  (**roll**). Všechny rotace jsou měřeny ve směru rotace hodinových ručiček. Na následujícím obrázku: Obrázek 6 je zobrazen souřadný systém, který bude v práci používán (Ozyagcilar, 2015).



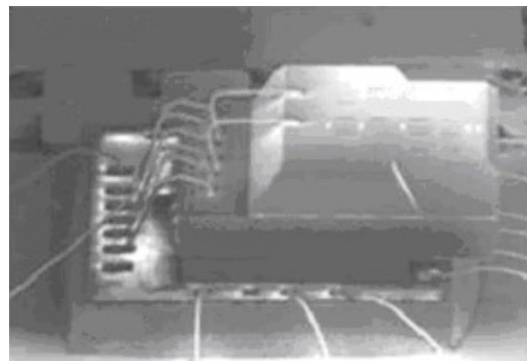
Obrázek 6: Souřadný systém aplikace (Ozyagcilar, 2015).

## 4 MEMS TECHNOLOGIE

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) je označení samotné technologie i produktů, které jsou touto technologií vyráběny. Jde o umístění elektronických a mikro mechanických prvků na křemíkovou bázi. Tento postup pochází z výroby integrovaných obvodů. V souvislosti s MEMS se hovoří o tzv. inteligentních snímačích, protože produkt obsahuje jak mechanický tak i elektrický systém. Mechanický má za úkol převést fyzikální podmět na elektrickou veličinu a elektrický systém se stará o další zpracování, úpravu vytvořené veličiny (zesílení, filtraci atd.). Jako stěžejní produkty této technologie se považují především různé pohybové senzory jako akcelerometry a gyroskopy. Můžeme se setkat ale i např. s tlakovými senzory, mikročerpadly, mikropohony atd. Příklad mechanické části MEMS systému na Obrázek 7 a napojení mechanického na elektrický systém na Obrázek 8 (Kopeček, 2015).



Obrázek 7: Mechanická část MEMS (Kopeček, 2009).



Obrázek 8: Napojení elektrické části MEMS (Kopeček, 2009).

Vznik tohoto systému se datuje do roku 1954, kdy byl objeven piezorezistivní jev v křemíku a germaniu. V roce 1961 vznikl prototyp tlakového senzoru a v roce 1977 kapacitního akcelerometru. Ty se dostaly do masové výroby až v roce 1984 resp. 1995 (Kopeček, 2009).

### 4.1 MEMS Akcelerometr

Akcelerometr je elektromechanické zařízení, které se používá k měření akcelerace a síly, která ji produkuje. Na trhu je dnes k dispozici mnoho typů akcelerometrů. Mohou být rozděleny podle síly (statické nebo dynamické), která se má měřit. I dnes je jedním z nejpoužívanějších piezoelektrických akcelerometrů. Ale protože jsou velké a nemohou být použity



pro všechny operace, bylo vyvinuto menší a vysoce funkční zařízení jako MEMS akcelerometr. Ačkoli první zařízení tohoto druhu byla vyvinuta před 25 lety, nebyla přijata až do nedávné doby, kdy začaly být ve velkém používány v průmyslových aplikacích. Díky tomu jde vývoj dopředu a vznikají senzory měřící zrychlení ve více osách (John, 2011).

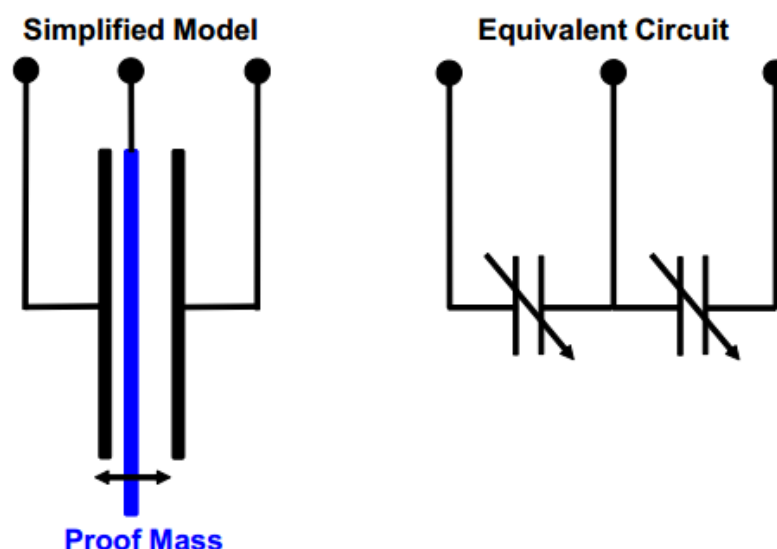
Možné využití akcelerometrů:

1. Mobilní zařízení – využití pro ovládání her pomocí naklánění zařízení, krokoměr, ovládání uživatelského rozhraní, v kombinaci s jinými senzory pro určení směru, atd....
2. Ve fotoaparátech pro snímání naklonění a určení orientace fotografie.
3. V pevných discích pro ochranu před poškozením při pádu (pevný disk se při vyhodnocení pádu vypne).

#### 4.1.1 Princip MEMS akcelerometru

Jedním z nejčastěji používaných akcelerometrů MEMS je kapacitní typ. Kapacitní MEMS akcelerometr je známý svou vysokou citlivostí a přesností při vysokých teplotách. Zařízení nemění hodnoty v závislosti na použitých základních materiálech a závisí pouze na kapacitní hodnotě, ke které dochází kvůli změně vzdálenosti mezi deskami (John, 2011).

Princip převodu kapacitního snímání je založen na změně kapacity mezi destičkami. Tento převod se dá představit jako tříelektrodový vzduchový kondenzátor, který má střední elektrodu pohyblivou viz obrázek 9. Její poloha je závislá na velikosti působícího zrychlení.



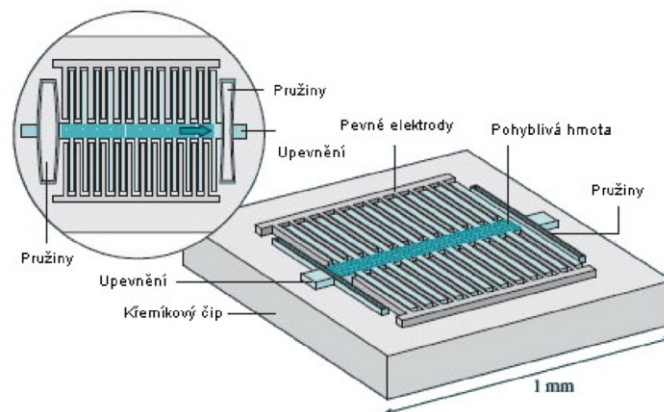
Obrázek 9: Zjednodušený model snímače a ekvivalentní elektrický obvod (Pedley, 2013)

Tento převod závisí na známé závislosti kapacity  $C$  na vzdálenosti elektrod  $d$  podle vzorce:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (4.1)$$

Kde plocha elektrod  $S$  a permitivita  $\varepsilon$  zůstávají konstantní, potom velikost kapacity závisí pouze na vzdálenosti elektrod  $d$ . Realizace takového převodu je znázorněná na následujícím obrázku Obrázek 10.

Vychází se ze vztahu pro působení síly  $F=m \cdot a$  kde  $F$  je síla, která působí na pohyblivou hmotu o hmotnosti  $m$ , vlivem působení zrychlení  $a$ . Síla působí na hmotu proti pružinám, které také zabezpečují její maximální vychýlení. Z výřezu, viz obrázek 10 je patrné, jak se mění vzdálenost pevných a pohyblivých elektrod (upevněných na pohyblivé hmotě) (Kopeček, 2009).



Obrázek 10: Realizace kapacitního akcelerometru (Kopeček, 2009)

## 4.1.2 Chyby měření akcelerometru

### 4.1.2.1 Chyba offsetu - BIAS

Offset akcelerometru jinak nazýván také „BIAS“ je hodnota na výstupu ze snímače při nulovém zrychlení působícím v měřící ose. Je dán především konstrukčními nepřesnostmi. Před začátkem měření by bylo dobré offset zjistit a následně od každé naměřené hodnoty odečíst. Situace zde ovšem není tak jednoduchá jako v případě gyroskopů. Nulovou působící rychlost je možné zajistit snadno, nulové působící zrychlení zajistit v podstatě nelze. Tíhové zrychlení (které je také předmětem měření) působí na Zemi stále, jedinou možností by bylo umístit akcelerometr tak, aby jeho měřící osa byla přesně kolmá na vektor tíhového zrychlení (tedy přesně vodorovně). K tomu by ovšem bylo zapotřebí další přesné zařízení k měření

tíhového zrychlení. Tento postup je náročný a v praxi těžko realizovatelný. Další možností jak offset zjistit je měnit náklon akcelerometru v celém jeho rozsahu a najít maximální a minimální hodnotu zrychlení. Průměr těchto dvou hodnot by odpovídal hledanému offsetu. Ale jen za předpokladu stejné citlivosti akcelerometru pro kladná i záporná zrychlení. Nekompensování offsetu akcelerometru není tak tragická chyba jako v případě gyroskopu. Neprovádí se zde žádná integrace, tudíž offset se s rostoucím časem nezvětšuje. Výsledek měření ovlivňuje za konstantní teploty stále stejně a jeho velikost nepřesáhne, po přepočtu na náklon, několik desetin stupně. Z důvodů zde popsaných, nebyl offset akcelerometru měřen (Skula, 2008).

#### **4.1.2.2 Teplotní závislost offsetu**

Offset akcelerometru bývá značně závislý také na teplotě. Závislost se dle typu akcelerometru pohybuje v jednotkách  $\text{mg}/^\circ\text{C}$ , hodnotu závislosti offsetu na teplotě standardně udává výrobce.

Zahřívání, či ochlazování senzorů v průběhu měření způsobuje proměnné odchylky v měřených datech. Tyto odchylky jsou závislé na měřené teplotě. Lze je považovat za deterministické v případě, že mají stejné vlastnosti při každém měření a při každé poloze senzoru (Bílý, 2014).

Není-li známa hodnota závislosti offsetu na teplotě pro akcelerometr, je velmi problematické provádět teplotní kalibraci a to především u mobilních zařízení, kdy výrobci nezveřejňují parametry použitých součástek. V tomto případě by bylo nutné zjišťovat hodnoty při rozdílných teplotách zařízení, zjištěné hodnoty aproximovat pro zjištění průměrné hodnoty rozdílu offsetu. Teplotní odchylka může být odlišná pro různá zařízení. S tohoto důvodu ani v práci nebude teplotní kompenzace řešena.

#### **4.1.2.3 Parazitní zrychlení**

Tato chyba vychází z potřeby měření pouze tíhového zrychlení Země, z něhož je následně počítán náklon. Problémem je, že akcelerometr měří jakákoli zrychlení, ne pouze tíhové. Bude-li například měřící osa akcelerometru umístěna vodorovně se Zemí, měřený úhel bude nulový. Přidá-li se však vodorovný pohyb, naměří akcelerometr zrychlení tohoto pohybu a vyhodnotí ho chybně jako úhel natočení.

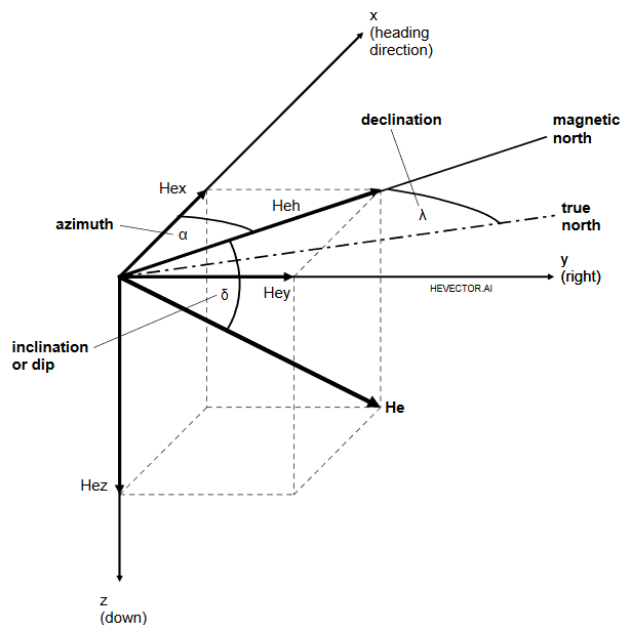
Parazitní zrychlení je největším zdrojem chyb při měření náklonu akcelerometrem. Dosáhnout může několikanásobku používaného měřícího rozsahu (1g), protože různé pohyby se

zařazením nebo vibrace mohou snadno dosahovat zrychlení daleko přesahujícím 1g. Jedinou možností snížení vlivu parazitních zrychlení je použití dolonopropustných filtrů, které v měřeném signálu potlačí rychlé změny zrychlení, vyvolané vibracemi a rychlými pohyby (Skula, 2008).

## 4.2 MEMS Magnetometr

Zařízení pro měření magnetického pole se nazývá magnetometr. Obecně je schopen měřit jakékoli magnetické pole velikostí spadající do rozsahu použité součástky. V této práci je magnetometru využito pro měření magnetického pole Země. Z těchto údajů je posléze vypočten úhel odklonu od severu, tedy azimut. Velikost pole se mění v závislosti na místě měření. Siločáry vycházejí z jižního magnetického pólu a vcházejí do severního magnetického pólu. Označení „magnetický pól“ je použito záměrně. Tyto póly se totiž neshodují s geografickými póly a úhel mezi přímkami spojujícími příslušné póly je asi  $11,5^\circ$ .

Na následujícím obrázku (obr. 11) je zobrazena 3D reprezentace vektoru magnetického pole  $H_e$  v libovolném bodě na Zemi.  $H_{ex}$  a  $H_{ey}$  jsou rovnoběžné s povrchem a  $H_{ez}$  směřuje do středu Země (Skula, 2008).

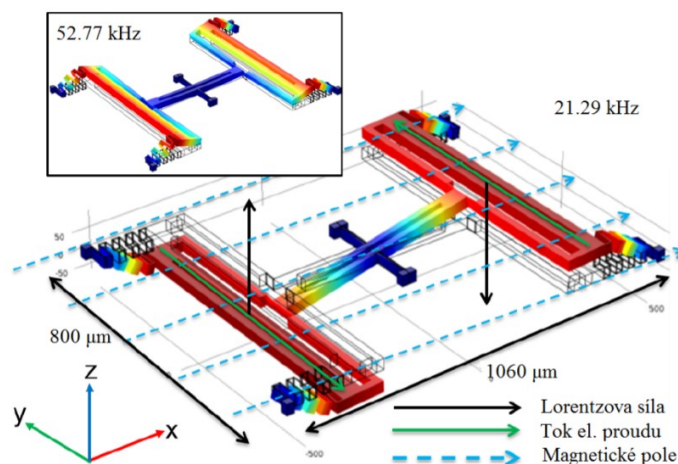


Obrázek 11: Vektor magnetického pole země (Skula, 2008)

#### 4.2.1 Princip MEMS magnetometru

Stejně jako ostatní MEMS senzory jsou i magnetometry vyrobeny pomocí MEMS technologie. Magnetorezistivní a Hall effect magnetometry jsou často využívány v přenosných zařízeních, jakými jsou například elektronické kompas, v MEMS se nejčastěji využívá magnetometrů založených na Lorentzově síle (LFS), neboť mají mnoho výhod, mezi které patří to, že nejsou vyžadovány žádné speciální magnetické materiály, protože využívají mechanického pohybu, a je možné je monoliticky spojit s MEMS gyroskopy a akcelerometry. Tyto magnetometry využívají torzní rezonátory, neboť je vyžadován tzv. "out-of-plane" pohyb. Problémem všech rezonátorů však zůstává citlivost na zrychlení. U vyvážených rezonátorů vytváří magnetické pole torzní pohyb, který je detekován jako diferenciální signál, zatímco pohyb vyvolaný zrychlením vytváří tzv. "common-mode" signál, který je při snímání odmítnut. Signál zrychlení je dále redukován při filtrování frekvencí, neboť jeho frekvence odpovídá frekvenci šumu senzoru.

LFS magnetometr, který je na obrázku 12, znázorňuje tok proudu, který je modulován na rezonanční frekvenci o velikosti 21.29kHz, a nízkofrekvenční magnetické pole, které generuje Lorentzovu sílu o frekvenci blízké rezonanční frekvenci. V obdélníku je znázorněn "out-of-plane" mód o frekvenci 52.77kHz (Rakovcová, 2016).



Obrázek 12: LFS magnetometr (Rakovcová, 2016)

Lorentzova síla je definována vztahem:

$$FL = qv \times B$$

kde FL je Lorentzova síla, q je elektrický náboj, v je rychlost náboje a B je magnetická indukce. Magnetometry ve spojení s akcelerometry a gyroskopy dokáží redukovat drifts, které vznikají během měření gyroskopu. Nejsou však dostatečně přesné na to, aby gyroskopy

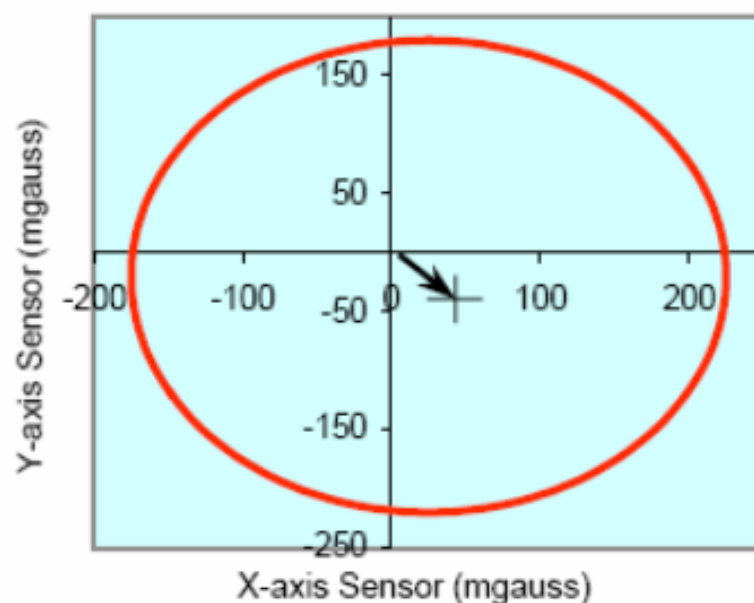
v inerciálním navigačním systému úplně nahradily. Jsou totiž ovlivňovány lokálními poruchami v geomagnetickém poli způsobenými jinými magnetickými objekty v blízkém okolí. Jejich měření však může být využito při fúzi s daty z gyroskopu, což vede k vylepšení přesnosti vypočítané orientace (Rakovcová, 2016)

## 4.2.2 Chyby měření

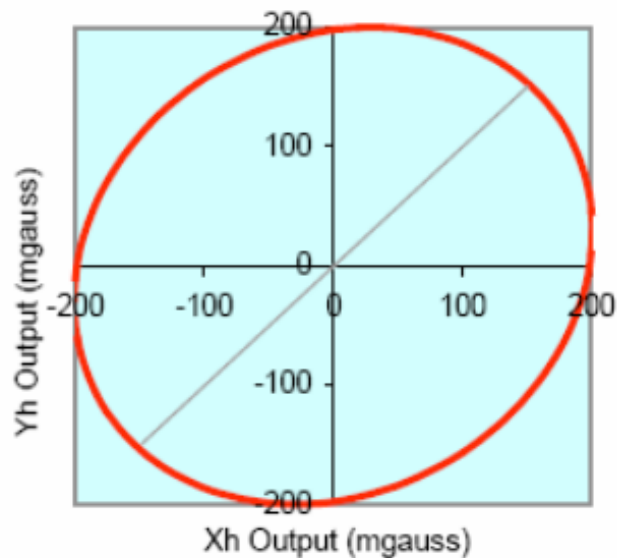
### 4.2.2.1 Vliv okolí

Jako i střílka kompasu neukazuje na sever v blízkosti magnetických materiálů, je i magnetometr citlivý na vše, co deformuje magnetické pole Země. Mezi tyto vlivy patří jak magnetické kovy, tak různé zdroje parazitního magnetického pole. Například transformátory nebo motory. Nejlepším způsobem jak tyto chyby eliminovat, je odstranit z blízkosti magnetometru všechny zdroje tohoto rušení. Obzvláště zdroje magnetického pole. Udává se, že předmět deformující magnetické pole, by měl být od magnetometru vzdálen dvojnásobek své velikosti. Ne vždy je to však možné (umístění magnetometru do konstrukce např. robota).

Vliv materiálů v okolí na magnetometr lze rozdělit na vliv magneticky tvrdých materiálů (Hard Iron) a magneticky měkkých materiálů (Soft Iron). Hard Iron materiály se projevují jako konstantní offset každé osy (obr. 13). Jejich kompenzace je v podstatě snadná a v této práci je použita. Magneticky měkké materiály deformují výsledek podle obrázku 14 (deformace ideální kružnice v elipsu). Kompenzace této chyby je složitější (Skula, 2008).



Obrázek 13: Hard Iron offset (Honeywell, 2011)



Obrázek 14: Soft Iron offset (Honeywell, 2011)

#### 4.2.2.2 Vliv deklinace

Jak již bylo zmíněno v kapitole: 2.1, geografické a magnetické póly neleží ve stejné ose, rozdíl mezi osami pólů je udáván ve stupních a je označován jako „Deklinace“. Úroveň deklinace se také mění v závislosti polohy na Zemi, tento rozdíl je v rozsahu  $-20^\circ$  až  $+20^\circ$ . S tohoto důvodu nelze úroveň deklinace kompenzovat statickou hodnotou.

Možnou metodou kompenzace je použití lokačních senzorů a zjištění aktuální nadmořské délky, šířky a výšky, nejčastěji s využitím senzoru GPS.

Deklinace se pak vypočítá podle světového magnetického modelu (WMM) nebo podle modelu mezinárodního geomagnetického referenčního pole (IGRF). Pro 1590 až 1900 je kalkulace založena na modelu gufm1. Bezproblémový přechod od gufm1 k IGRF byl zaveden v letech 1890 až 1900. Výsledky deklinace jsou obvykle přesné na 30 minut oblouku, ale faktory prostředí mohou způsobit poruchy magnetického pole.

#### 4.2.2.3 Vliv náklonu – inklinace

Vliv náklonu na měřený azimut je zřejmý z 3D reprezentace vektoru magnetického pole (obr. 11). Při nulovém náklonu v obou horizontálních osách měří zařízení skutečné složky magnetického pole  $H_x$  a  $H_y$ . Je-li však zařízení nakloněno v některé z horizontálních os (nebo obou), měřené složky  $H_x$  a  $H_y$  nejsou již původní složky vektoru magnetického pole, ale jsou náklonem ovlivněny. Proto je nutné náklon měřit a chybu kompenzovat (Skula, 2008). Vliv náklonu je kompenzován pomocí měření akcelerometru.

## 5 SENZORY V OPERAČNÍM SYSTÉMU ANDROID

Základem pro určování orientace zařízení jako jsou mobilní telefony, tablety a jiné podobné zařízení jsou senzory akcelerometry měřící zrychlení zařízení v jednotlivých osách a magnetometry měřící magnetické pole. V těchto zařízeních se díky miniaturizaci prosadily senzory typu MEMS.

Většina zařízení se systémem Android má vestavěné senzory, které měří pohyb, orientaci a různé podmínky prostředí. Tyto snímače jsou schopny poskytovat hrubá data s vysokou přesností.

Senzory se v systému dělí na tři základní kategorie:

### 5.1 Senzory pohybu

Tyto snímače měří síly zrychlení a rotační síly podél tří os. Tato kategorie zahrnuje akcelerometry, gravitační senzory, gyroskopy a rotační vektorové senzory.

### 5.2 Snímače okolního prostředí

Tyto snímače měří různé environmentální parametry, jako je teplota a tlak okolního vzduchu, osvětlení a vlhkost. Tato kategorie zahrnuje barometry, fotometry a teploměry.

### 5.3 Snímače polohy

Tyto snímače měří fyzickou polohu zařízení. Do této kategorie patří senzory orientace a magnetometry.

Dále se senzory dělí na hardwarové a softwarové. Hardwarové jsou fyzicky v zařízení přítomny a předávají měřenou veličinu přímo aplikaci. Softwarové nejsou fyzicky přítomny, i když se tak v systému prezentují. Získávají data z jednoho či více hardwarových senzorů a vyhodnocují je. Někdy se také nazývají virtuálními senzory (Sušánek, 2014).

V práci jsou použity fyzické senzory v zařízení pro zrychlení – akcelerometr, měření magnetického pole – magnetometr a pro zpřesnění orientace je použit lokační senzor GPS.



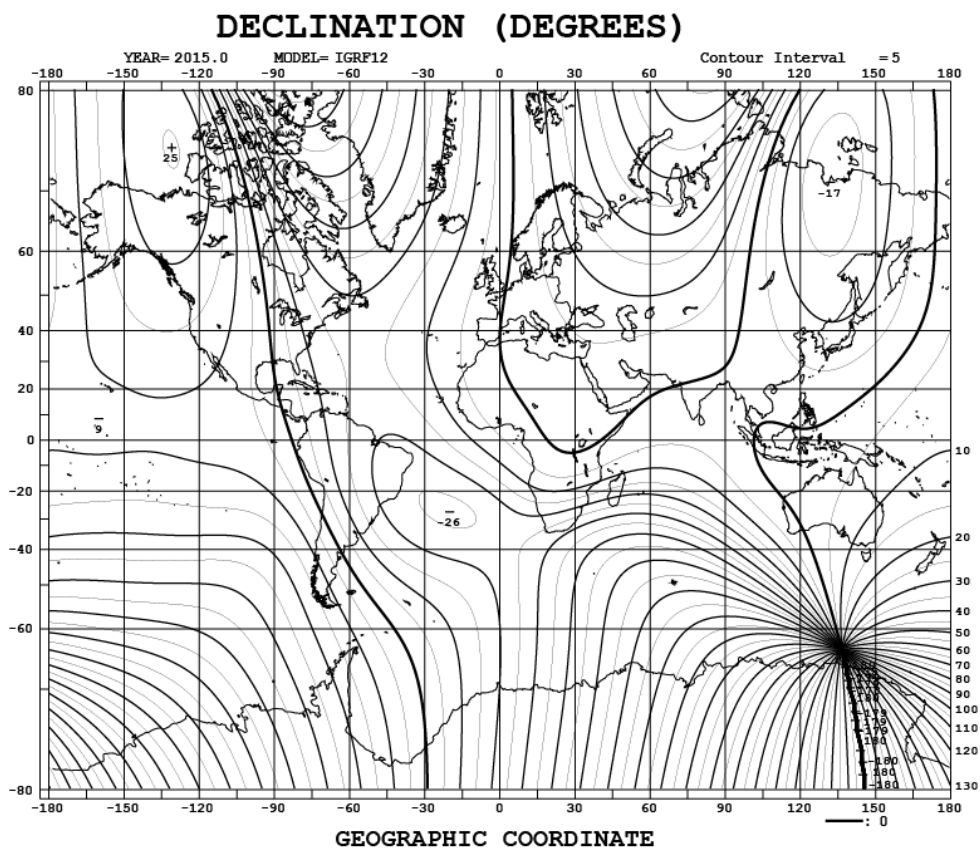
## 6 URČENÍ ORIENTACE ELEKTRONICKÉHO KOMPASU

Jakákoli orientace telefonu může být modelována tak, že je výsledkem rotace otáčení (yaw), podélného náklonu (pitch), příčného náklonu (roll) aplikované na zařízení ve vodorovné poloze a směřujícím na sever. Hodnoty akcelerometru,  $G_r$  a magnetometru,  $B_r$ , jsou dle této referenční polohy (viz 3.2) určeny vztahem:

$$G_r = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

$$B_r = B \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Gravitační zrychlení je  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ .  $B$  je intenzita geomagnetického pole, která se mění na povrchu země od minima  $22 \mu\text{T}$  přes Jižní Ameriku až do maxima  $67 \mu\text{T}$ , jižně od Austrálie.  $\delta$  je úhel sklonu geomagnetického pole měřený svise od vodorovné roviny a mění se na povrchu země od  $-90^\circ$  na jižním magnetickém pólu přes nulu v blízkosti rovníku až po  $90^\circ$  na severním magnetickém pólu (Ozygcilar, 2015).



Obrázek 15: Mapa magnetické deklinace (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, 2015)

Hodnoty inklinace jsou v elektronickém kompasu získávány z údajů měření akcelerometru. Oproti tomu hodnotu deklinace nelze bez znalosti lokace zařízení určit. Pokud k výsledné hodnotě úhlu natočení nebude hodnota deklinace připočtena, bude kompas směřovat pouze k magnetickému pólu, který je od zemského pólu vychýlen. Pro určení deklinace bude v práci použit senzor GPS získávající údaje o poloze a úhel deklinace tak bude dopočítán pomocí modelu magnetické deklinace. Více v kapitole: 7.2.4.

Akcelerometr,  $G_p$  a magnetometr,  $B_p$ , měří hodnoty pro tři rotace  $R_z(\psi)$ ,  $R_y(\theta)$  a  $R_x(\phi)$  které jsou popsány rovnicemi:

$$G_p = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)G_r = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

$$B_p = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B_r = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Rotační matice uvedené v předchozích rovnicích jsou následující:

$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

$$R_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Rovnice (6.3) předpokládá, že telefon neprojevuje žádné lineární zrychlení a že signál akcelerometru  $G_p$  je pouze funkcí gravitačního zrychlení. Kompenzace náklonu tak bude poskytovat chybné údaje v případě lineárního zrychlení.

Rovnice (6.4) ignoruje vliv Hard-iron a Soft-Iron magnetického pole. Standardní způsob modelování efektu Hard-Iron je provedeno přičtením doplňkového vektoru  $V$  a offsetu v „nulové poloze“.

Rovnice (6.4) má pak následující tvar:

$$B_p = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \\ \sin \delta \end{pmatrix} + V = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \\ \sin \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

Hodnoty  $V_x$ ,  $V_y$  a  $V_z$  jsou zde složky Hard-Iron vektoru. Složky Soft-Iron vektoru zde nejsou zahrnuty.

### 6.1.1 Algoritmus kompenzace náklonu

Kompenzace náklonu elektronického kompasu jako první počítá hodnoty podélného  $\Theta$  a příčného  $\Phi$  náklonu viz rovnice (6.3). Z těch vytvoří inverzní matice a vynásobí je hodnotami získanými z akcelerometru podle následující rovnice:

$$R_y(-\theta)R_x(-\phi)G_p = R_y(-\theta)R_x(-\phi) \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = R_z(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

Vektor  $\begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix}$  zde představuje hodnoty zrychlení z akcelerometru.

Rozšířením rovnice (6.9):

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

Podélný náklon  $\Theta$  (pitch) podle osy X je počítán dle vzorce:

$$\tan(\theta) = \frac{-G_{px}}{G_{py} * \sin \Phi + G_{pz} * \cos \Phi} \quad (6.12)$$

Příčný náklon  $\Phi$  (roll) podle osy Y je počítán dle vzorce:

$$\tan(\Phi) = \frac{G_{py}}{G_{pz}} \quad (6.13)$$

Se znalostí úhlů  $\Theta$  a  $\Phi$  z akcelerometru lze pomocí načtených hodnot magnetometru provést korekci natočení zařízení podle rovnice:

$$\mathbf{R}_z(\psi) \begin{pmatrix} B \cos \delta \\ 0 \\ B \sin \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \cos \delta \\ 0 \\ B \sin \delta \end{pmatrix} = \mathbf{R}_y(-\theta) \mathbf{R}_x(-\phi) (\mathbf{B}_p - \mathbf{V}) \quad (6.14)$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \cos \psi B \cos \delta \\ -\sin \psi B \cos \delta \\ B \sin \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{px} - V_x \\ B_{py} - V_y \\ B_{pz} - V_z \end{pmatrix} \quad (6.15)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{px} - V_x \\ B_{py} - V_y \\ B_{pz} - V_z \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

$$= \begin{pmatrix} (B_{px} - V_x) \cos \theta + (B_{py} - V_y) \sin \theta \sin \phi + (B_{pz} - V_z) \sin \theta \cos \phi \\ (B_{py} - V_y) \cos \phi - (B_{pz} - V_z) \sin \phi \\ -(B_{px} - V_x) \sin \theta + (B_{py} - V_y) \cos \theta \sin \phi + (B_{pz} - V_z) \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{fx} \\ B_{fy} \\ B_{fz} \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

Vektor  $\begin{pmatrix} B_{fx} \\ B_{fy} \\ B_{fz} \end{pmatrix}$  představuje hodnoty magnetometru po korekci Hard-Iron offsetu a zpětné rotaci do vodorovné polohy kde  $\Theta = \Phi = 0$ .

Složky X a Z jsou v rovnici (6.17):

$$\cos \psi B \cos \delta = B_{fx} \quad (6.18)$$

$$\sin \psi B \cos \delta = -B_{fy} \quad (6.19)$$

$$\Rightarrow \tan(\psi) = \left( \frac{-B_{fy}}{B_{fx}} \right) = \left( \frac{(B_{pz} - V_z) \sin \phi - (B_{py} - V_y) \cos \phi}{(B_{px} - V_x) \cos \theta + (B_{py} - V_y) \sin \theta \sin \phi + (B_{pz} - V_z) \sin \theta \cos \phi} \right) \quad (6.20)$$

Rovnice (6.20) počítá úhel rotace  $\psi$  (yaw), kde je  $\psi$  počítán vzhledem k magnetickému severu. Úhel natočení  $\psi$  (yaw) je tudíž požadovaný vykompenzovaný azimut elektronického kompasu.

### 6.1.2 Kompenzace Hard Iron

Hard Iron kompenzace offsetu se provádí stanovením offsetu x a y. Tyto zjištěné hodnoty jsou následně použity přímo na nekalibrovaná data magnetometru. Tato kompenzace se určuje otáčením zařízení přes krajní pozice pro všechny tři osy. Uživatelsky nejsrozumitelnější a nejjednodušší na otáčení zařízení do krajních poloh je provádět rotaci zařízení opisující tvar ležaté osmičky viz obrázek 16.



Obrázek 16: Animace směru rotace zařízení (EEFan, 2015)

Při tomto pohybu jsou zjišťovány krajní hodnoty měření v jednotlivých osách. Aby bylo dosaženo zpřesnění, musí se osmička zařízením opsat několikrát. Počet opakování je konstantní. Při těchto opakováních jsou porovnávány maximální a minimální hodnoty měření v jednotlivých osách X, Y, Z a zaznamenávají jsou vždy extrémy, s těch je následně vypočítáván koeficient korekce Hard Iron „V“ dle následujícího vztahu:

$$V = a * \text{stará hodnota} + b \quad (6.21)$$

$$a = \frac{2}{\text{mag}_{\max} - \text{mag}_{\min}} \quad (6.22)$$

$$b = 1 - \frac{2}{\text{mag}_{\max} - \text{mag}_{\min}} \cdot \text{mag}_{\max} \quad (6.23)$$

Vypočtené koeficienty V jsou následně doplněny do vztahu pro výpočet úhlu natočení  $\psi$  (yaw) daný rovnicí (6.21) (Winer, 2016).

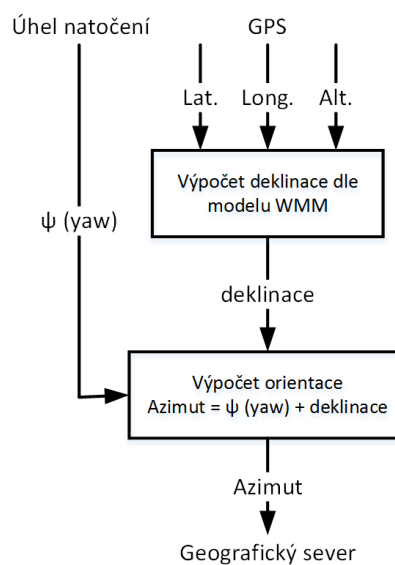
### 6.1.3 Kompenzace deklinace

Úhel deklinace je kompenzován tak, že se k vypočtenému úhlu natočení  $\psi$  (yaw) připočte zjištěný úhel deklinace. Samotný úhel deklinace s použitím akcelerometru a magnetometru nelze zjistit, musí být hodnota zjišťována s využitím jiných způsobů. Deklinace se na povrchu země mění a je tedy nutné k jejímu určení znát lokaci zařízení a mít možnost pro dané místo zjistit přesnou hodnotu. Ke zjištění polohy zařízení bude použit senzor GPS, který dokáže určit polohu ve formátu: nadmořská délka (latitude), šířka (longitude) a výška (altitude). Zjistit deklinaci se znalostí údajů o poloze lze následujícími způsoby:

- 1) On-line získání hodnot z veřejně dostupných zdrojů stacionárních stanic měřících deklinaci.
- 2) Výpočtem deklinace se znalostí magnetického model světa WMM (World Magnetic Model), vytvořeného organizací *United States National Geospatial-Intelligence Agency*.

Jelikož se předpokládá použití elektronického kompasu i mimo dosah mobilního či Wi-Fi signálu, je online získání deklinačních dat pro tuto aplikaci nevhodné.

Pro výpočet bude tedy použit magnetický model světa WMM. Tento model je sice méně přesný než aktuální hodnoty měřené měřicími stanicemi, ale pro výpočet deklinace k určení geografického severu je naprosto dostačující. Model WMM je vytvářen vždy pro konkrétní časové období a to v rozsahu 5 let. Aktuální model v době psaní této práce je vytvořen pro roky 2014-2019.



Obrázek 17: Kompenzace deklinace

## 6.2 Filtry

Jelikož jsou senzory v mobilních telefonech velmi citlivé, jsou čtené hodnoty ovlivňovány šumem, který způsobuje výkyvy v měřených hodnotách. Ke kompenzaci tohoto jevu se používají filtry typu dolní a horní propust' (Low-Pass, High-Pass), které šumové hodnoty odfiltrují.

### 6.2.1 Filtr typu dolní propust – LowPass Filter

Jako nejjednodušší možnost filtrace naměřených dat se nabízí filtrace údajů z akcelerometru pomocí digitálního filtru typu dolní propust. Tím se odstraní rušení, které je na vyšších frekvencích než námi požadovaný signál. Jako dolní propust byl použit filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR) prvního řádu. Z níže uvedeného grafu je vidět, že správně navržená dolní propust dobře filtruje rušivý signál. Nevýhoda tohoto filtru je časové zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem (Jeník, 2014).

Filtr pracuje s takzvaným váženým průměrem a to tak, že bere pouze část dlouhodobé hodnoty a část aktuálně načítané hodnoty. Parametr pro určení míry filtrace je parametr ALPHA, který je použit ve vzorci následovně:

$$(nová\_hodnota) = alpha * předchozí\_hodnota + (1-alpha) * aktuální\_hodnota \quad (6.24)$$

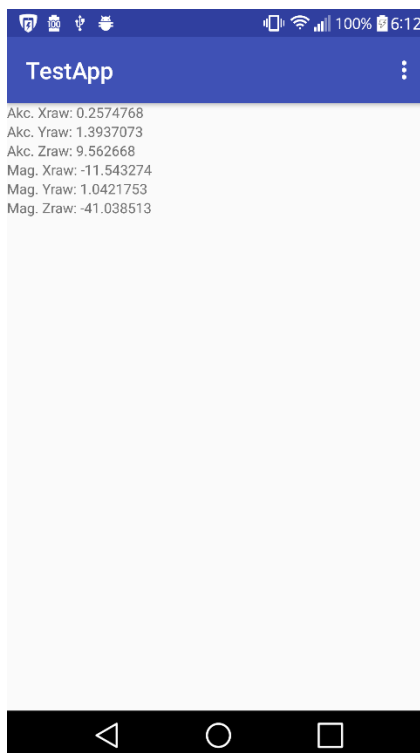
Hodnota ALPHA může být dle potřeby upravována tak, aby byla pro danou aplikaci nalezena nejlepší hodnota. Pokud by byla hodnota ALPHA = 0, znamenalo by to, že se průměrná hodnota nikdy nezmění, zatím co hodnota ALPHA = 1 by znamenala, že se vždy střední hodnota bude rovnat nové aktuální hodnotě (Milette Greg., Stroud Adam., 2012).

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



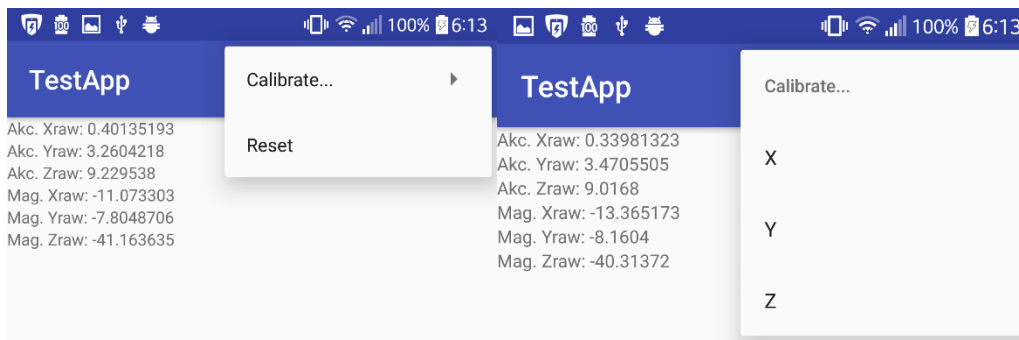
## 7 MĚŘÍCÍ APLIKACE

Ještě před návrhem finální aplikace elektronického kompasu byla vytvořena jednoduchá měřicí aplikace, pomocí které se testují vybrané filtrační a kalibrující funkce. Účelem aplikace je získání měřených dat do souboru pro možnost srovnání výsledků z aplikace filtračních a kalibračních metod s různými nastaveními. V hlavním okně jsou zobrazovány pouze nefiltrované hodnoty akcelerometru a magnetometru.



Obrázek 18: Hlavní okno testovací aplikace

V aplikaci jsou navrženy prvky, které jsou následně použity také v hlavní aplikaci. Aplikace byla vytvořena také z důvodu oddělení testovacích funkcí od výsledné aplikace.



Obrázek 19: Menu testovací aplikace pro nastavení k offsetu os akcelerometru

## 7.1 Struktura měřící aplikace

Samotná aplikace má jednoduchou strukturu skládající se pouze z jedné aktivity. V rámci této aktivity probíhá sběr dat ze senzoru akcelerometru a magnetometru. Na získané hodnoty z akcelerometru je aplikován filtr typu dolní propust s různými koeficienty, pro možnost srovnání výsledků. U akcelerometru lze v menu také získat hodnoty pro nastavení offsetu jednotlivých os. Na hodnoty magnetometru je aplikován algoritmus kompenzace Hard Iron pole.

## 7.2 Kalibrace měřených hodnot

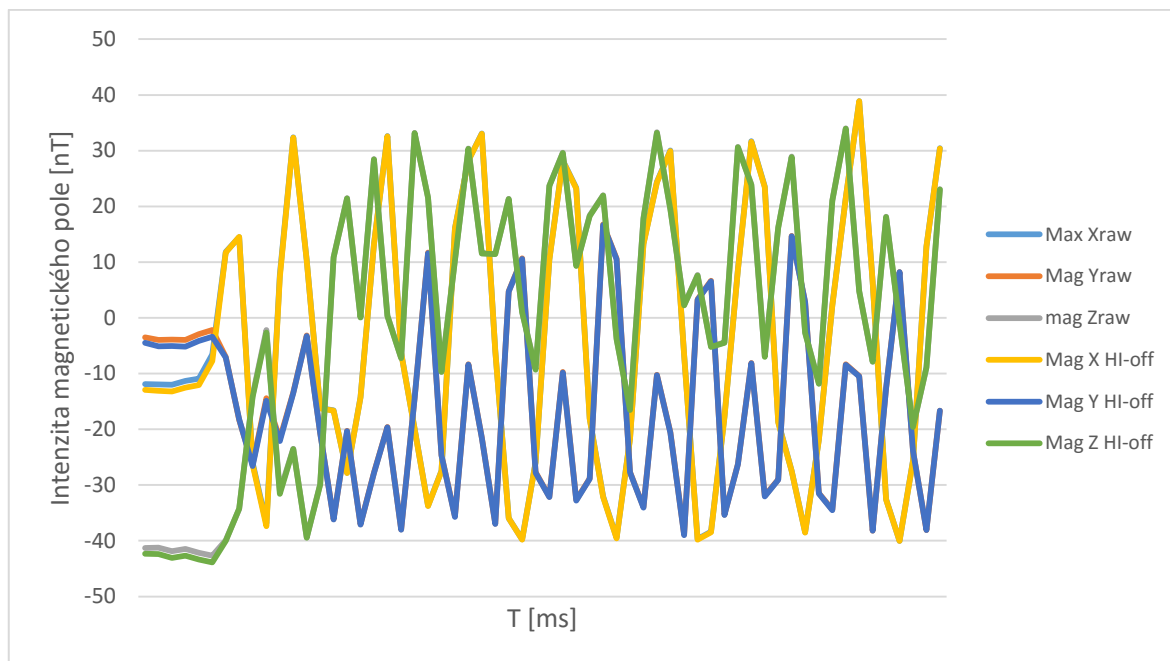
Po startu aplikace se uživateli jako první spustí aktivita hlavní aplikace. Pro stanovení hodnot Hard Iron offsetu je potřeba provést se zařízením rotaci tak aby se opsala ležatá osmička. Při tomto pohybu jsou sbírány maximální a minimální hodnoty magnetického pole pro jednotlivé osy. Tato kalibrace probíhá, dokud není nasbírán definovaný počet hodnot, ze kterých je postupně vypočítávají koeficienty pro kalibraci Hard Iron offsetu u magnetometru.

### 7.2.1 Algoritmus Hard Iron offsetu

V rámci kalibraci Hard Iron offsetu je aktivován cyklus pro sběr dat při otáčení zařízení

Kalibrační metoda Hard Iron offsetu využívá pro výpočet rovnici (6.21).

Jak je vidět z následujícího grafu, v případě, že je magnetometr správně z kalibrován, výsledné hodnoty i po odečtení kalibračních koeficientů jsou téměř totožné.



Obrázek 20: Měření hodnot magnetometru spolu s kompenzací Hard Iron

### 7.2.2 Filtr typu dolní propust

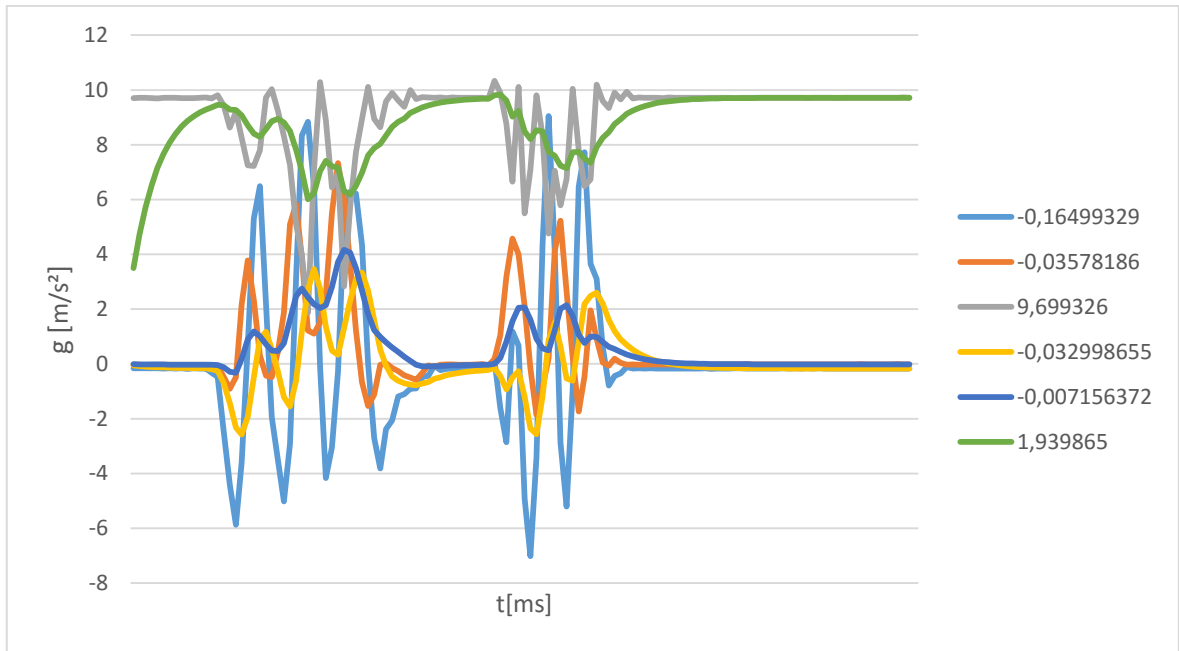
Jak již bylo zmíněno, měření jednotlivých senzorů jsou více či méně ovlivněny náhlými výkyvy což v případě akcelerometru může znamenat značný problém s následným určením orientace. Proto jsou načítaná upravována filtrem typu dolní propust – LowPass Filter. Tento filtr na základě zvoleného koeficientu odfiltruje skokové změny a signál upraví.

Pro volbu nejhodnějšího filtračního koeficientu bylo v počátečním návrhu aplikace provedeno měření, kdy byly zaznamenávány hodnoty, na něž byl aplikován filtr s koeficienty:

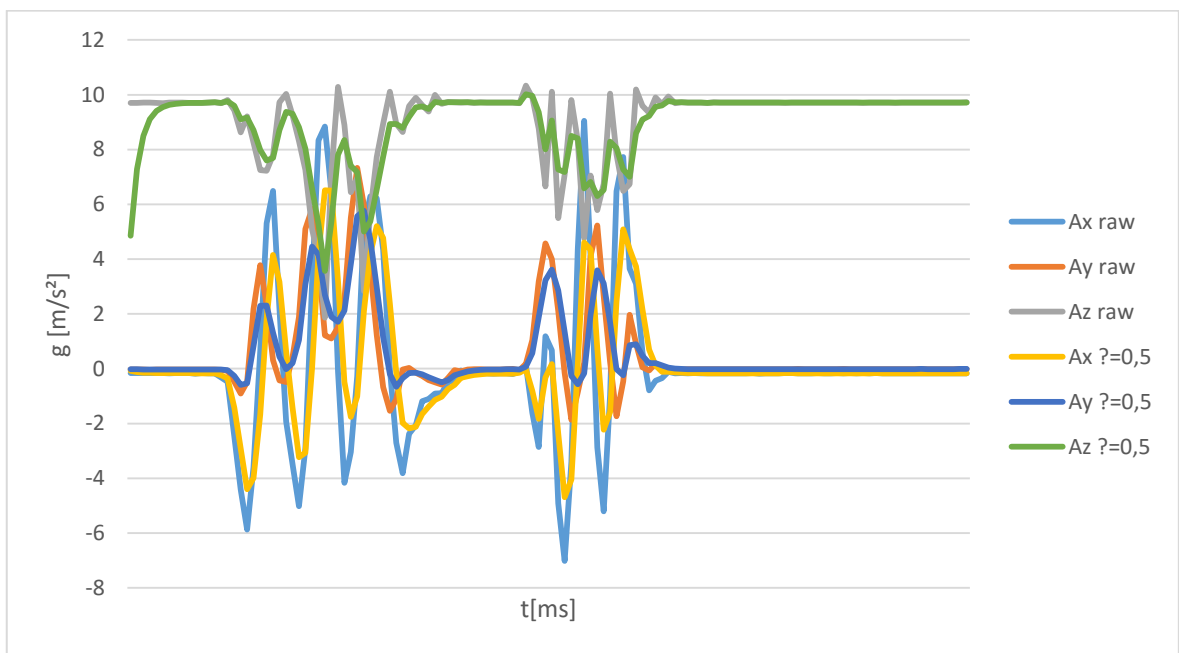
1.  $\alpha = 0,8$
2.  $\alpha = 0,5$
3.  $\alpha = 0,2$

Jak je vidět na následujících grafech, hodnoty se snižujícím se koeficientem jsou více vyhlazeny, ale dochází ke zpoždění signálu, což v klidovém stavu u hodnot blízkých nule nevádí. Problém by nastal v případě, že budeme chtít měřit reálné okamžité zrychlení.

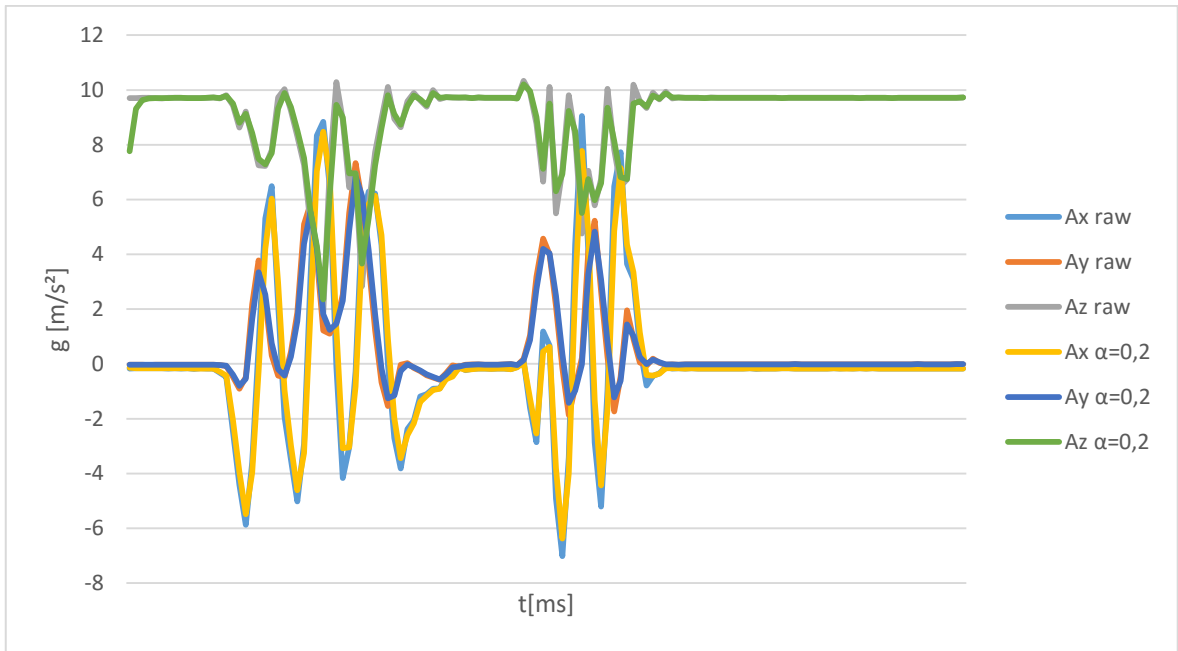
U aplikace elektronického kompasu, kdy se počítá s otřesy při chůzi, kdy bude zařízení drženo v ruce, je výhodnější použít vyšší hodnotu  $\alpha$ . Tak aby nechtěné otřesy byli co nejvíce eliminovány.



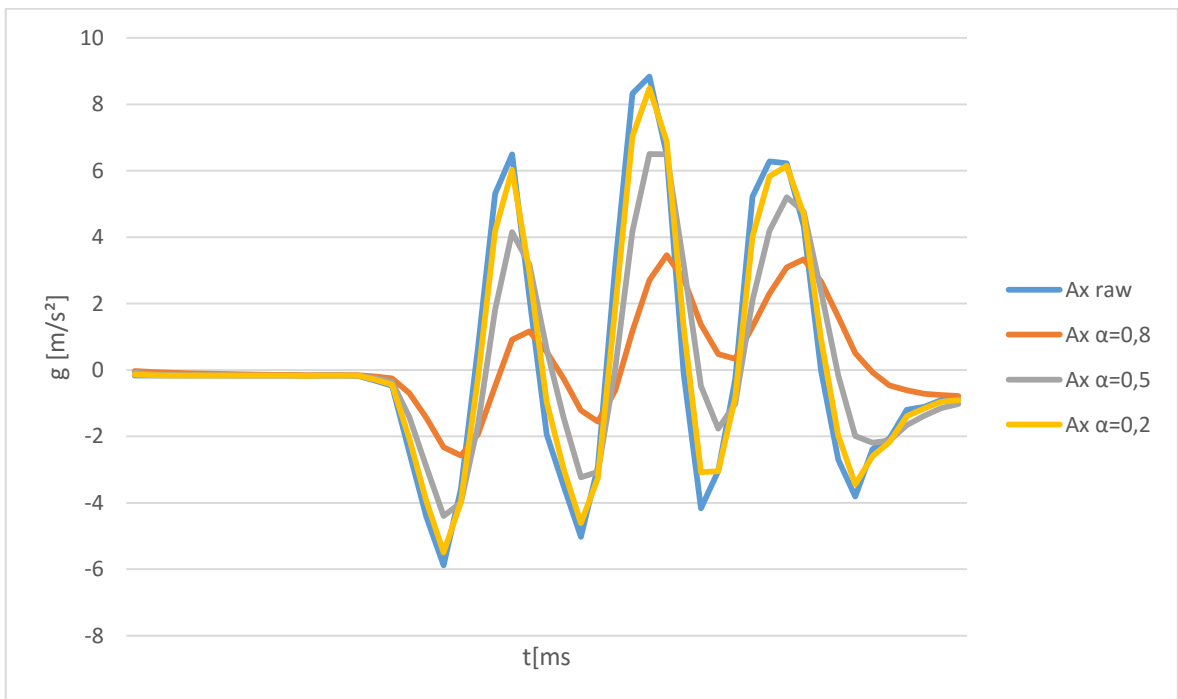
Obrázek 21: Filtrované hodnoty akcelerometru koeficientem  $\alpha=0,8$



Obrázek 22: Filtrované hodnoty akcelerometru koeficientem  $\alpha=0,5$



Obrázek 23: Filtrované hodnoty akcelerometru koeficientem  $\alpha=0,2$



Obrázek 24 Srovnání výsledků použitých filtrů na měřenou akcelerometru osou X

V následující tabulce je zobrazeno prvních 10 hodnot z výstupu aplikovaných filtrů na X osu akcelerometru.

Tabulka 1 : Ukázka datového souboru měřených hodnot

	<b>Ax raw</b>	<b>Ax <math>\alpha=0,8</math></b>	<b>Ax <math>\alpha=0,5</math></b>	<b>Ax <math>\alpha=0,2</math></b>
1	-0,16499	-0,033	-0,0825	-0,13199
2	-0,16411	-0,05922	-0,1233	-0,15769

3	-0,16339	-0,08005	-0,14335	-0,16225
4	-0,1619	-0,09642	-0,15262	-0,16197
5	-0,16296	-0,10973	-0,15779	-0,16276
6	-0,16052	-0,11989	-0,15916	-0,16097
7	-0,1658	-0,12907	-0,16248	-0,16484
8	-0,16322	-0,1359	-0,16285	-0,16355
9	-0,1649	-0,1417	-0,16388	-0,16463
10	-0,16141	-0,14564	-0,16264	-0,16205

V případě použití vyšších hodnot vyhlazovacího koeficientu dochází ke zpoždění odezvy signálu, ale nedochází ke ztrátě měřených hodnot. Při vyšším zpoždění tak dochází ke zmírnění výkyvů hodnot a lepšímu ustálení změny hodnot výsledné rotace. Pro výslednou aplikaci bude tedy použit filtr s výslednou hodnotou  $\alpha=0,8$ .

### 7.2.3 Kompenzace offsetu akcelerometru

Jelikož výrobci mobilních zařízení neuvádějí přesné parametry použitých součástek a v systému Android není možnost jednoduše zjistit offset u akcelerometru, musí být tento výsledek upravován vlastními způsoby. Princip kompenzace offsetu akcelerometru je založen na měření hodnot, kdy je zařízení v klidovém stavu a nepůsobí na něj jiné zrychlení než gravitační. V tomto případě by měly být hodnoty v osách X a Y nulové což ve většině případů nejsou. V aplikaci je pro tento případ vytvořena možnost provést kalibraci v klidovém stavu zařízení, kdy uloží poslední měřená hodnota do kalibračního koeficientu „ $dx$  a  $dy$ “. Hodnoty budou ve výsledku odečítány od měřených hodnot.

Odečet kalibračních hodnot bude prováděn na měřených datech ještě před jejich kalibrací. Tuto kalibraci lze provádět kdykoli v průběhu chodu aplikace. Kalibrace se spouští přes menu kalibrace, kde lze v případě potřeby tyto hodnoty také vynulovat.

Ukázka algoritmu zajišťující nastavení offsetu:

$$d = \text{předchozí\_hodnota} \quad (7.1)$$

$$\text{nová\_hodnota} = \text{aktuální\_hodnota} - d \quad (7.2)$$

### 7.2.4 Kompenzace deklinace s využitím GPS

Díky integrovanému čipu GPS (Global Positioning System) lze získat údaje o poloze ve formátu světového geodetického systému WGS84. Získané souřadnice jsou zeměpisná délka, šířka, výška (latitude, longitude, altitude) a aktuální čas v ms počítaný od 1. 1. 1970.

V API pro OS Android je implementována funkce, která s využitím získaných hodnot vypočítá aktuální úhel deklinace.

Výpočet využívá světový model magnetického pole WMM vytvářen organizací „U.S. National Geophysical Data Center (NGDC)“ ve spolupráci s „the British Geological Survey (BGS)“ a je dis. Tento model je vytvářen vždy pro určité časové období. V rámci API OS Android je tento model ve verzi WMM-2010 pro období od roku 2010-2015. V rámci API pro novější verze systému Android již může být použit novější model ve verzi WMM-2015.

Funkce pro získání magnetické deklinace: *getDeclination()*.

V případě, že nelze získat polohu zařízení, funkce není do výsledného výpočtu použita.

### 7.3 Transformace získaných hodnot pro určení rotace

Získaná a filtrovaná data ze senzoru akcelerometru a magnetometru jsou předávána metodám zajišťující výpočty rotace zařízení a výpočet jeho orientace. Tyto metody jsou implementovány ve třídě *SensorManager*.

Metoda pro určení rotace zařízení pomocí výpočtu rotační matice *getRotationMatrix(float[] R, float[] I, float[] gravity, float[] geomagnetic)* využívá pro výpočet rovnice uvedené v kapitole 5 a vrací hodnoty vypočtené rotační matice.

Parametry této metody jsou:

- 1) float[] R – výsledné pole hodnot rotační matice
- 2) float[] I
- 3) float[] gravity – vstupní pole obsahující hodnoty z akcelerometru
- 4) float[] geomagnetic – vstupní pole obsahující hodnoty z magnetometru

Výstup R rotační matice je předáván metodě *getOrientation(float[] R, float values[])*, která provede výpočet orientace pro jednotlivé osy podle rovnice (6.9). Výsledek této metody je pole udávající rotaci zařízení v jednotlivých osách. Rotace v ose X udává úhel natočení kompasu k magnetickému pólu země.

Výstupní hodnoty jsou uvedeny v radiánech a pro další zpracování jsou převedeny na úhlové stupně dle vztahu:

$$\alpha = \frac{a * 180}{\pi} \quad (7.3)$$

Kde  $a$  je velikost úhlu v radiánech a  $\alpha$  ve stupních. Výsledek je v rozsahu od  $-180^\circ$  do  $180^\circ$  a pro zobrazení rotace je potřeba jej převést na rozsah od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ . Tento převod je kontrolován jednoduchou podmínkou, kdy v případě záporné hodnoty je k výsledku přičteno 360. K této hodnotě je připočten získaný uhel deklinace což udává výsledný uhel natočení k zemskému severnímu pólu.



## 8 APLIKACE – ELEKTRONICKÝ KOMPAS

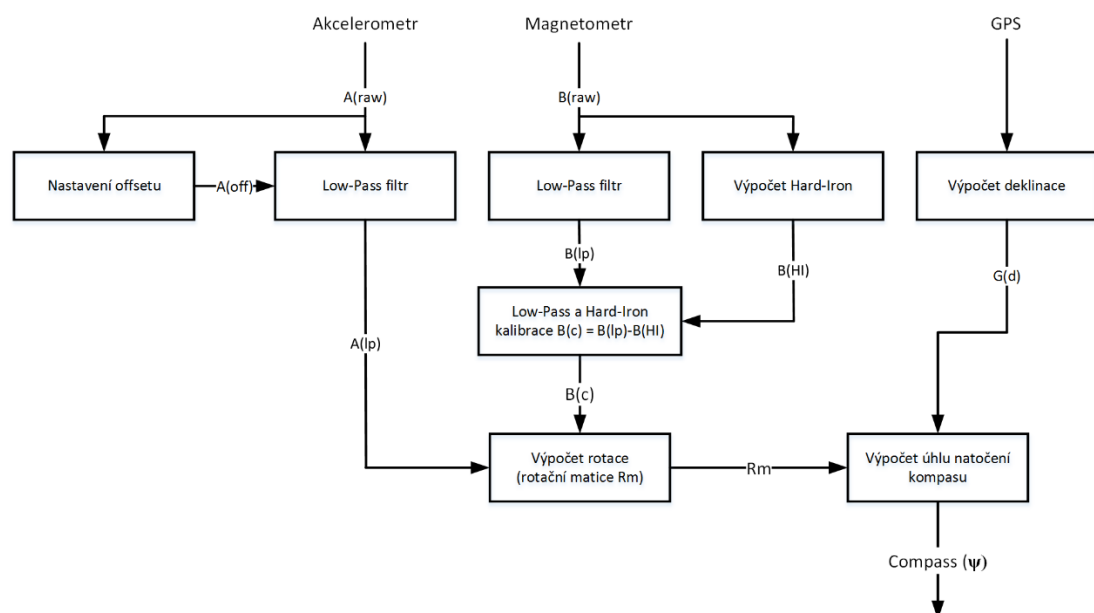
Aplikace elektronického je realizována pro platformu operačního systému Android, kterou je v dnešní době nejrozšířenější platformou mobilních elektronických zařízení, jako jsou mobilní telefony, tablety a podobná zařízení. Tyto zařízení v sobě standardně obsahují všechny potřebné senzory (akcelerometr, magnetometr, GPS) pro potřeby tvorby elektronického kompasu.

V rámci API systému Android jsou implementovány funkce pro tvorbu elektronického kompasu. Tyto funkce zpracovávají data ze senzoru pomocí principů, jež jsou popsány v teoretické části této práce.

Aplikace byla vyvíjena a testována na mobilním telefonu značky LG model G3 označení LG-D855 s verzí operačního systému Android 6.0. Všechna měřená data zmíněna níže pocházejí s tohoto telefonu a na jiných zařízeních se hodnoty mohou lišit.

### 8.1 Návrh struktury aplikace

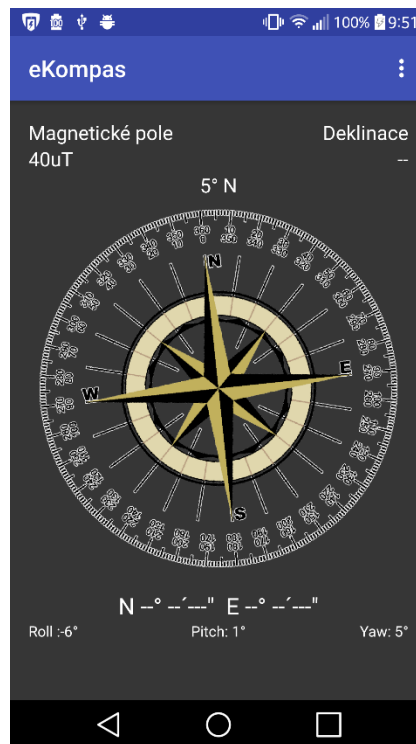
Aplikace se skládá ze dvou hlavních aktivit. Aktivita pro kalibraci senzorů a hlavní aktivita samotné aplikace, kde jsou zobrazovány údaje kompasu. Aplikace pracuje s hodnotami fyzických senzorů a to akcelerometru, magnetometru a GPS. V aplikaci jsem se vyhnul softwarovým senzorům, jako jsou senzor lineární akcelerace a rotace. Cílem bylo stanovení azimutu kompasu s použitím nastudovaných principů pro výpočty rotace a jejich kalibraci. Blokové schéma aplikace zobrazuje obrázek 25.



Obrázek 25: Blokové schéma aplikace

## 8.2 Grafický návrh aplikace

Aplikace je vytvořena s ohledem na jednoduchost použití. Je tvořena hlavním oknem, kde jsou zobrazeny všechny potřebné údaje. Jsou zde zobrazeny hodnoty o úhlu náklony v osách X a Y, hodnota celkového magnetického pole, hodnota deklinace, zeměpisná šířka, délka a výška a hodnota otáčení kompasu spolu s jeho grafickým vyobrazením.



Obrázek 26: Hlavní okno aplikace Kompas

Hodnota deklinace a údaje o poloze se automaticky zobrazí, jakmile jsou data o poloze získány, V tomto případě je automaticky přičtena hodnota deklinace k vypočtenému úhlu natočení a animaci rotace kompasu.

V pravém horním rohu se nachází rozbalovací menu s položkami umožňující kalibraci offsetu akcelerometru. Tady uživatel nalezne možnosti:

- Kalibrace:
  - Osa X – v klidovém stavu nastaví hodnotu offsetu pro osu X
  - Osa Y – v klidovém stavu nastaví hodnotu offsetu pro osu Y
  - Osa Z – v klidovém stavu nastaví hodnotu offsetu pro osu Z
- Reset kalibrace – vynuluje nastavené kalibrační hodnoty

Menu kalibrace je totožné s testovací aplikací viz obrázek 19.

## ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo osvojení problematiky MEMS senzorů snímání gravitačního zrychlení a senzoru měření magnetického pole, nastudování principů jejich kalibrace a vytvoření funkční aplikace implementující tyto principy.

První část práce je zaměřena na zpracování teoretických principů jednotlivých senzorů a jejich funkci v souvislosti s implementací elektronického kompasu. Praktická část práce je zaměřena na praktické testování nastudovaných metod pro kalibraci a zpřesnění výstupních hodnot senzorů. Získané výsledky jsou pak použity pro tvorbu uživatelsky použitelné aplikace v zařízeních s operačním systémem Android.

Paradoxně systém Android a jeho aplikační programové vybavení pro tvorbu aplikací jsou navrženy pro poměrně snadnou tvorbu grafických uživatelských aplikací, kde je spousta potřebných metod pro základní výpočty implementována. Oproti snadné implementaci základní aplikace, je zde úskalí v nemožnosti zjištění klíčových parametrů použitých měřících senzorů pro jejich kalibraci. To je i do značné míry způsobeno tím že zařízení s operačními systémy Android je velké množství od různých výrobců a nelze zajistit použití vždy stejných součástek. Ani samotní výrobci jednotlivých zařízení standardně informace o použitých součástkách pro konkrétní zařízení neuvádí. Stejně tak pro možnosti vlastní kalibrace, společnost Google tvořící systém Android, neuvádí žádné konkrétní způsoby jak postupovat při kalibraci senzorů. Toto má za následek to, že výstupní hodnoty dvou zařízení vedle sebe nemusí být ani za stejných podmínek totožné.

V případě použití akcelerometru pro určení náklonu zařízení, je měření ovlivněno zejména jiným než gravitačním zrychlením. Toto je v aplikaci kompenzováno pomocí filtru typu dolní propust, který potlačuje náhlé skokové změny zrychlení. V menší míře na akcelerometr působí posun offsetu, který se kompenzuje odečítáním průměrné hodnoty v klidovém stavu od měřených hodnot. Teplotní vliv působící na offset akcelerometru není v tomto případě možné kompenzovat a to z důvodu neznalosti přesných parametrů použitého senzoru.

Stejně jako u akcelerometru, tak i u magnetometru nejsou známy konkrétní vlastnosti použitého obvodu. Standardně je výsledek měření nejvíce ovlivněn kovovými objekty a objekty produkující magnetické pole. Tyto objekty způsobují vychýlení měřených hodnot. Tento stav je ošetřen pomocí Hard Iron kompenzace. Stejně jako u akcelerometru, tak i zde jsou vstupní hodnoty ošetřeny filtrem typu dolní propust pro odstranění náhodných výkyvů měřených hodnot.

Výsledným poznatkem při psaní této práce a vývoji aplikace je zjištění, že i když jsou v dnešní době zařízení s operačním systémem Android vybavena pokročilými měřicími senzory, je téměř nemožné vytvořit aplikaci, o které se dá tvrdit, že výstup z ní je přesný. S tohoto důvodu by byla vhodnější tvorba vlastního zařízení s využitím obvodů, ke kterým výrobci uvádějí přesné datasheety včetně minimálních doporučených kompenzačních a kalibračních algoritmů. Ovšem pro použití elektronického kompasu k určení směru pro turistické dostačující.

Samotný algoritmus elektronického kompasu může být využit i v rámci dalších aplikací, které nepotřebují precizní určení orientace. Typicky jsou to mapové aplikace nebo v dnešní době stále se rozšiřující aplikace pracující s rozšířenou realitou - augmented reality.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

BÍLÝ, Bc. Marek. Přesný inerciální navigační systém kategorie „Tactical grade“ [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [https://support.dce.felk.cvut.cz/media-wiki/images/4/4b/Dp\\_2015\\_bily\\_marek.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/media-wiki/images/4/4b/Dp_2015_bily_marek.pdf). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

DATA ANALYSIS CENTER PRO GEOMAGNETISMU AND SPACE MAGNETISMUS. Geomagnetic Elements. In: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [online]. Kyoto, 2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/element/elefig.gif>

DATA ANALYSIS CENTER PRO GEOMAGNETISMU AND SPACE MAGNETISMUS. Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles. In: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [online]. Kyoto, 2015 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/d-m.gif>

DATA ANALYSIS CENTER PRO GEOMAGNETISMU AND SPACE MAGNETISMUS. Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles. In: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [online]. Kyoto, 2015 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>

EEFAN. COMPASS CALIBRATION. In: EEFan [online]. 2015 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [http://www.eefan.net/wp-content/uploads/2015/03/compass\\_calibration8.png](http://www.eefan.net/wp-content/uploads/2015/03/compass_calibration8.png)

HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L [online]. Honeywell International, 2011 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2150248.pdf>

JENÍK, Bc. Petr. Řídicí systém pro trikoptéru. Praha, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Lubor Jirásek, CSc.

JOHN. MEMS Accelerometer. Instrumentation-Electronics [online]. Instrumentation-Electronics, 2011 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.instrumentation-today.com/mems-accelerometer/2011/08/>

KOPEČEK, P. MEMS technologie snímání náklonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 32 s., 2 příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dlouhý.

Magnetoreception in Birds and Its Use for Long-Distance Migration (PDF Download Available). Available from: [https://www.researchgate.net/publication/279446083\\_Magnetoreception\\_in\\_Birds\\_and\\_Its\\_Use\\_for\\_Long-Distance\\_Migration](https://www.researchgate.net/publication/279446083_Magnetoreception_in_Birds_and_Its_Use_for_Long-Distance_Migration) [accessed May 15, 2017]

OZYAGCILAR, Talat. Calibrating an eCompass in the Presence of Hard- and Soft-Iron Interference. 2015, 18 s. Dostupné také z: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/application-notes/AN4246.pdf>

PEDLEY, Mark. AN3461 Application note: Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer [online]. Freescale Semiconductor, 2013 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3461.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf)

PILCH, Petr. Analýza využitelnosti kompasu pro navigaci mobilního robotu v indoor prostředí. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ KREJSA, Ph.D.

RAKOVCOVÁ, Julie. Návrh a implementace AHRS systému založeného na MEMS senzorech [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/23776/1/BP\\_Rakovcova.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/23776/1/BP_Rakovcova.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Flídr, Ph.D.

SKULA, D. Datová fúze pro určování rotace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 80 s. 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

STMICROELECTRONICS GROUP OF COMPANIES. AN3192 Application note [online]. STMicroelectronics group of companies, 2010 [cit. 2017-05-15]. Doc ID 17353 Rev 1. Dostupné z: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0038/9582/files/tilt-compensation.pdf>

SUŠÁNEK, Filip. Určení polohy objektu pomocí kombinace sensorů mobilního telefonu. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Bc. Marek Neruda.

ŠIMBERSKÝ, M. Měření magnetického pole. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 64s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Jiří Fialka.

TANABE, Rosie. Compass. New World Encyclopedia [online]. New World Encyclopedia: New World Encyclopedia contributors, 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.newworldencyclopedia.org/p/index.php?title=Compass&oldid=1003703>

WINER, Kris. Simple and Effective Magnetometer Calibration [online]. © 2017 GITHUB, INC. 2016 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <https://github.com/kriswiner/MPU-6050/wiki/Simple-and-Effective-Magnetometer-Calibration>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Magnetické a geografické póly Země (Azzarone, 2017) .....	12
Obrázek 2 : Drift magnetického severního pólu (Data Analysis Center pro geomagnetismu and Space magnetismus, 2015) .....	13
Obrázek 3: Drift magnetického jižního pólu (Data Analysis Center pro geomagnetismu and Space magnetismus, 2015) .....	13
Obrázek 4: Geomagnetické elementy (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, 2017) .....	13
Obrázek 5: Princip elektronického kompasu (STMicroelectronics group of companies, 2010).....	15
Obrázek 6: Souřadný systém aplikace (Ozyagcilar, 2015).....	15
Obrázek 7: Mechanická část MEMS (Kopeček, 2009). .....	16
Obrázek 8: Napojení elektrické části MEMS (Kopeček, 2009). .....	16
Obrázek 9: Zjednodušený model snímače a ekvivalentní elektrický obvod (Pedley, 2013).....	17
Obrázek 10: Realizace kapacitního akcelerometru (Kopeček, 2009).....	18
Obrázek 11: Vektor magnetického pole země (Skula, 2008) .....	20
Obrázek 12: LFS magnetometr (Rakovcová, 2016) .....	21
Obrázek 13: Hard Iron offset (Honeywell, 2011).....	22
Obrázek 14: Soft Iron offset (Honeywell, 2011) .....	23
Obrázek 15: Mapa magnetické deklinace (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, 2015) .....	25
Obrázek 16: Animace směru rotace zařízení (EEFan, 2015).....	29
Obrázek 17: Kompenzace deklinace.....	30
Obrázek 18: Hlavní okno testovací aplikace .....	33
Obrázek 19: Menu testovací aplikace pro nastavení k offsetu os akcelerometru .....	33
Obrázek 20: Měření hodnot magnetometru spolu s kompenzací Hard Iron.....	35
Obrázek 21: Filtrované hodnoty akcelerometru koeficientem $\alpha=0,8$ .....	36
Obrázek 22: Filtrované hodnoty akcelerometru koeficientem $\alpha=0,5$ .....	36
Obrázek 23: Filtrované hodnoty akcelerometru koeficientem $\alpha=0,2$ .....	37
Obrázek 24 Srovnání výsledků použitých filtrů na měřenou akcelerometru osou X. ....	37
Obrázek 25: Blokové schéma aplikace .....	41
Obrázek 26: Hlavní okno aplikace Kompas .....	42



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 : Ukázka datového souboru měřených hodnot.....	37
--	----

## SEZNAM PŘÍLOH

CD

Adresářová struktura:

/eKompass.zip

/TestApp.zip