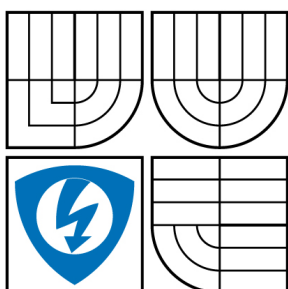


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SNÍMAČE PRO URČOVÁNÍ NATOČENÍ V MOBILNÍ ROBOTICE

ROTATION SENSORS IN ROBOTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

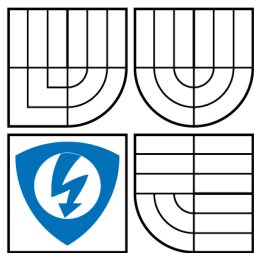
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN JAVORČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2009



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Javorček

ID: 83698

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Snímače pro určování natočení v mobilní robotice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte průzkum trhu v oblasti snímačů natočení (gyroskopy, magnetometry), porovnejte jejich vlastnosti. Navrhněte a realizujte vhodné řešení snímání natočení mobilního robota s dostatečnou přesností (upřesněno vedoucím práce) a stabilitou v čase. Vytvořený systém otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle vlastního literárního průzkumu a doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Snímače pro určování natočení v mobilní robotice

Diplomová práce

Obor: Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Javorček

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Abstrakt:

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout vhodnou metodu na měření uhlového natočení pro mobilního robota. V úvodní části, jsou rozebrány tři různé snímače - gyroskop, akcelerometr a elektronický kompas. V této části jsou vysvětlené jejich výhody a nevýhody z teoretického hlediska a možnosti jejich použití v praxi. V následujících částech je práce zaměřena na MEMS gyroskopy a možnosti jejich využití v praxi, s ohledem na dosažitelnou přesnost a s návrhem na zlepšení této přesnosti. V závěrečné části je popsán HW návrh zařízení, spolu s řídicím SW pro mikrokontrolér a zhodnocení dosažených cílů a zjištěných skutečností.

Klíčová slova:

Gyroskop, Akcelerometr, Magnetometr, Kalmanův filtr, MEMS

Brno University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Control, Measurement and Instrumentation

Rotation Sensors In Robotics

Master's Thesis

Specialisation of study: Cybernetics, Control and Measurement
Student: Bc. Martin Javorček
Supervisor: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Abstract:

The goal of this paper is to suggest suitable method for angle measuring of mobile robot. There are being analyzed 3 different sensors – gyroscope, accelerometer and electronic compass in the prologue. Their advantages and disadvantages in the theoretical way are being explained in this part and also their opportunities of use in the practical way. In the following parts the work is focused on MEMS gyroscopes and their opportunities of use in the practical way with regard to achievable exactness and to the application for development of its exactness. The application of device together with main SW for microcontroller and the valuation of achievable exactness and determined facts are being described in the conclusion part.

Key words:

Gyroscope, Accelerometer, Magnetometer, Kalman filter, MEMS

Bibliografická citácia

JAVORČEK, M. *Snímače pro určování natočení v mobilní robotice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 97 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Prehlásenie

„Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému *Snímače pre určovanie natočenia v mobilnej robotike* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledovných autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zb.“

V Brne dňa 25. 5. 2009

Podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Doc. Ing. Luďkovi Žaludovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa 25. 5. 2009

Podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	11
2. PRAKTICKÉ VYUŽITIE INERCIÁLNÝCH SNÍMAČOV	12
2.1 Inerciálne snímače.....	12
2.1.1 Snímače zrýchlenia	12
2.1.2 Snímače natočenia	13
2.2 Inerciálna navigácia	14
2.2.1 Pohyb bodu v priestore	14
2.3 Stabilizácia obrazu	16
2.4 Stabilizácia lietajúceho objektu	17
2.5 Segway	18
3. ZÁKLADNE SPÔSOBY URČOVANIA NATOČENIA	19
3.1 Spôsob určenia natočenia s použitím akcelerometru	20
3.1.1 Rozbor metódy.....	20
3.1.2 Akcelerometer.....	22
3.1.3 Zhrnutie metódy.....	24
3.2 Magnetometria	25
3.2.1 Úvod do merania mag. poľa zeme.....	25
3.2.2 Zemské magnetické pole	25
3.2.3 Najčastejšie používané senzory magnetického poľa Zeme	28
3.2.4 Snímače magentického poľa.....	28
3.2.5 Zhrnutie senzorov magnetického poľa Zeme	37
3.3 Gyroskopy.....	38
3.3.1 Mechanické gyroskopy	38
3.3.2 Optické gyroskopy RLG.....	42
3.4 MEMS gyroskopy	46
3.4.1 Funkčný popis gyroskopov.....	48
4. PROBLEMATIKA PRESNOSTI MEMS GYROSKOPOV.....	51
4.1 Úvod do problematiky	51
4.2 Ofset gyroskopu	51
4.3 ARW – Angle Random Walk	54
4.4 Teplotná závislosť	54

4.5 Metódy filtrácie výstupného signálu	57
4.5.1 Priemerovanie	57
4.5.2 Priemerovanie pre pomaly meniacu sa hodnotu	59
4.5.3 Odhad plávajúceho priemeru	60
4.5.4 Filtrovanie rýchlo meniacej sa hodnoty	60
4.5.5 Kalmanov filter	61
4.6 Zhrnutie	65
5. NÁVRH MERACIEHO SYSTÉMU PRE MERANIE UHLOVÉHO	
NATOČENIA.....	66
5.1 Úvod k návrhu meracej platformy	66
5.2 Voľba snímačov	66
5.2.1 Akcelerometer.....	66
5.2.2 Voľba magnetometru	68
5.2.3 Kompas CMPS03	69
5.2.4 Voľba MEMS gyroskopu	69
5.3 Návrh HW	76
5.3.1 ATmega644	77
5.3.2 AD7706.....	77
5.4 SW riešenie	78
5.4.1 Obsluha zbernice SPI.....	80
5.4.2 Spracovanie nameraných údajov	84
5.5 Návrh schém a DPS a mech. vyhotovenie	84
5.6 Návod na obsluhu zariadenia	85
6. NAMERANÉ HODNOTY A VYHODNOTENIE.....	87
7. ZÁVER A ZHODNOTENIE DOSIAH. CIEĽOV	93
8. LITERATÚRA	94
9. ZOZNAM PRÍLOH	97

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2.1 Dráha bodu v priestore. [3]	15
Obrázok 2.2 Inerciálna sústava [2].....	16
Obrázok 2.3 Quad-rotor využívajúci gyroskopy k svojej stabilizácii [19]	17
Obrázok 2.4 Segway [20].....	18
Obrázok 3.1 Názorne zobrazenie troch os otáčania [21]	19
Obrázok 3.2 Určovanie natočenia v osách vzťahných ku gravit. zrýchleniu [35]	20
Obrázok 3.3 Zložky gravitačného zrýchlenia [35].....	21
Obrázok 3.4 Štruktúra kapacitného akcelerometru [34]	22
Obrázok 3.5 Vnútna štruktúra tepelného akcelerometru [34].....	23
Obrázok 3.6 Magnetické pole Zeme [17]	26
Obrázok 3.7 Zložky magnetického poľa Zeme [2]	27
Obrázok 3.8 Kompas KVH C100 [17].....	30
Obrázok 3.9 Kompas MicroMag [17].....	32
Obrázok 3.10 Kompas TCM [17]	33
Obrázok 3.11 Magnetorezistívny snímač magnetického poľa. [9]	35
Obrázok 3.12 Magnetický senzor s kompenz., nast. a mer. smerom mag. poľa.....	35
Obrázok 3.13 Kompas CMPS03 [30]	36
Obrázok 3.14 Mechanický gyroskop [3].....	39
Obrázok 3.15 Princíp kompenzácie výchylky u gyroskopov s 2DOF [3]	40
Obrázok 3.16 Princíp Sagnacovho efektu.....	43
Obrázok 3.17 Princíp interferenčného laserového gyroskopu [3].	45
Obrázok 3.18 MEMS Gyroskop využívajúci Coriolisovú silu [2]	46
Obrázok 3.19 MEMS Gyro GladiatorTechnologies, INC [17].....	47
Obrázok 3.20 Gyroskop ARROW3i [17]	48
Obrázok 4.1 Nameraný offset vzorkovaný v intervale $T = 93\text{ms}$	52
Obrázok 4.2 Nameraný offset vzorkovaný v intervale $T = 42\text{ms}$	52
Obrázok 4.3 Grafické znázornenie Allanovej odchýlky [13]	53
Obrázok 4.4 Príklad, kedy môže začať rásť Allanová odchýlka [33].....	54
Obrázok 4.5 Graf pre kompenzovaný a nekompenzovaný gyroskop [13].....	55

Obrázok 4.6 Závislosť zmeny teploty na zmene ofsetu	55
Obrázok 4.7 Zmena teploty po uplynutí času 10min.	56
Obrázok 4.8 Grafické znázornenie šumu na výstupe gyroskopu	57
Obrázok 4.9 Postupné počítanie priemeru [32].....	58
Obrázok 4.10 Príklad filtrácie s použitím plávajúceho priemeru pre $k = 8$ [32]	59
Obrázok 4.11 Použitý odhad plávajúceho filtra s $k = 8$ [32]	60
Obrázok 4.12 Dôsledok použitia plávajúceho filtra [32]	61
Obrázok 4.13 Súvislosť medzi kalmanovým filtrom a modelom systému	62
Obrázok 4.14 Iný spôsob vyjadrenia kalmanového filtra	63
Obrázok 4.15 Aplikovanie kalmanovho filtru na biely šum	64
Obrázok 4.16 Fúzia dvoch meraných veličín pomocou kalmanovho filtru	65
Obrázok 5.1 Bloková schéma ADXL203[31].....	67
Obrázok 5.2 Puzdro LCC E-8 [31]	68
Obrázok 5.3 Detailný pohľad na snímač ADXL203 [31]	68
Obrázok 5.4 CMPS03 [30].....	69
Obrázok 5.5 Analógový gyroskop fy. ANALOG DEVICES z rady ADXRS [13] ...	70
Obrázok 5.6 Bloková schéma gyroskopu ADIS16255 [13]	71
Obrázok 5.7 Gyroskop ADIS16255 osadený vo vývojovej doske [13].....	72
Obrázok 5.8 FIR filter pre gyroskop ADIS16255 [13]	75
Obrázok 5.9 Bloková schéma zariadenia	76
Obrázok 5.10 Bloková schéma AD7706 [29]	78
Obrázok 5.11 AVRISP mkII programátor [15].	78
Obrázok 5.12 Vývojový diagram	79
Obrázok 5.13 SPI HW usporiadanie [28]	80
Obrázok 5.14 Prenos dát cez dva kruhové registre v SPI zbernici [28].....	81
Obrázok 5.15 Pamäťová bunka na základe adresy [13].....	82
Obrázok 5.16 Zápis do pamäti na základe adresy [13].	82
Obrázok 5.17 Presun dátových rámcov cez SPI a ADIS16255 [13].....	83
Obrázok 5.18 Príklad jedného čítacieho cyklu z gyroskopu [13]	83
Obrázok 5.19 Postupnosť dát na RS232	85
Obrázok 5.20 Pohľad na hotové zariadenie	86
Obrázok 5.21 Detailný pohľad na akcelerometre pre meranie v 3 osiach	86

Obrázok 6.1 Výstup MEMS gyroskopu bez dolnopriepustnej filtrácie [26]	88
Obrázok 6.2 Výstup MEMS gyroskopu s použitím dolnopriepustného filtra [26]....	89
Obrázok 6.3 Nepoužitý plávajúci priemer	89
Obrázok 6.4 Použitý plávajúci filter	90
Obrázok 6.5 Vplyv zrýchlenia na meranie uhovej rýchlosti.....	90
Obrázok 6.6 Rast teploty čipu gyroskopu po pripojení napájacieho napätia.....	91
Obrázok 6.7 Grafické znázornenie ustálenia teploty po čase $t > 2\text{min}$	92

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Prehľad najvýznamnejších výrobcov MEMS Gyroskopov.....	49
Tabuľka 2 Výber kondenzátora v závislosti od frekvencie filtru.....	68
Tabuľka 3 Základné parametre gyroskopu ADIS16255 [13]	71
Tabuľka 4 Význam a umiestnenie jednotlivých výstupných mer. veličín [13]	73
Tabuľka 5 Popis jednotlivých slov na výstupe RS232	85
Tabuľka 6 Zistenie časovej stability 1. metódou	87
Tabuľka 7 Zistenie časovej stability 2. metódou	88
Tabuľka 8 Snímače uhlového natočenia a aplikácie pre ne vhodné	92

1. ÚVOD

Neoddeliteľnou súčasťou robotiky, ale napríklad aj v motorizme (ale aj v iných odvetviach) je navigácia robota či auta, respektíve určenie presnej polohy v priestore, či spätná rekonštrukcia trasy po ktorej sa skúmané teleso pohybovalo. V moderných a často používaných systémoch sa používa GPS navigácia ktorej hlavné prednosti sú cena a dostupnosť. Pomocou tejto metódy je možné relatívne presne určiť polohu objektu, či zaznamenávať jeho trasu. Hlavnou nevýhodou takejto navigácie je funkčnosť iba pri priamej viditeľnosti medzi satelitom a prijímačom GPS z čoho vyplýva, že je nepoužiteľná napríklad v tuneloch a podobne. Ďalšou z jej nevýhod je aj presnosť, ktorá je relatívna cca 5-10m čo v robotike môže byť často nedostačujúce. Spomínané nevýhody GPS môže čiastočne odstrániť tzv. inerciálna navigácia respektíve kombinácia inerciálnej navigácie a GPS. Ako bude ďalej vysvetlené, podstatou inerciálnej navigácie je určenie zrýchlenia v danom smere pričom smer v ktorom pôsobí zrýchlenie je meraný *senzormi natočenia*.

Celá táto práca sa zaoberá metódami snímania natočenia. Budú podrobne popísané rôzne metódy, pričom sa hlbšie budem venovať problematike určovania natočenia s využitím gyroskopov (podľa pokynov vedúceho práce).

V nasledujúcej kapitole je podrobnejšie popísané využitie snímačov v mobilnej robotike. Ďalej nasleduje rozbor možných metód k určovaniu natočenia a nakoniec vytvorenie meracej platformy s dosiahnutými výsledkami a so záverom ktorý plynie zo zistených skutočností.

2. PRAKTICKÉ VYUŽITIE INERCIÁLNYCH SNÍMAČOV

Inerciálne snímače majú v kybernetike veľké zastúpenie hlavne v obore robotiky. V dnešnej modernej dobe sa s inerciálnymi snímačmi stretávame takmer úplne všade. Od využitia v navigácii až po využitia v multimediálnom priemysle, pri konštrukcii nových progresívnych hracích konzolách približujúcich hráčom virtuálnu realitu v hraní. Okrem týchto aplikácií sú napríklad využívané vo videokamerách alebo digitálnych fotoaparátach, v ktorých vyrovnávajú obraz pri nestabilnom uchopení prístroja. Používa sa ako veľmi vhodná pomôcka pri vyvažovaní modelárskych RC vrtuľníkov, alebo na vyváženie dvojkoľosového vozítka označovaného ako „segway“ kde mimochodom je použitý optický druh gyroskopu. [12]

2.1 INERCIÁLNE SNÍMAČE

K tejto skupine snímačov jednoznačne zaradíme snímače, pomocou ktorých dokážeme určiť rýchlosť pohybu daného telesa a jeho uhlové natočenie. Inerciálne snímače avšak nemerajú vždy primárne rýchlosť či uhol natočenia, ale väčšinou merajú iné parametre pohybu ako sú uhlová rýchlosť či zrýchlenie a matematickými úpravami následne dosiahneme požadovanú rýchlosť pohybu či uhlové natočenie. Tieto snímače rozdelíme nasledovne:

2.1.1 Snímače zrýchlenia

Sú to takzvané akcelerometre, ktorých hlavný princíp je založený na využití zotrvačnosti hmoty pre meranie rozdielu medzi kinematickým zrýchlením vzhľadom k nejakému inerciálnemu priestoru a gravitačným zrýchlením. Ich vývoj je podobný ako vývoj napríklad gyroskopov. Opúšťa sa od klasického mechanického prevedenia a nahrádzajú sa novšími technológiami ako je MEMS alebo optický spôsob zisťovania zrýchlenia. Novšie technológie majú samozrejme aj svoje nevýhody ktoré sa podpisujú pod presnosť a stabilitu nameraných údajov. Tieto nevýhody sa hlavne pripisujú senzorum pracujúcim na princípe kapacitného merania pohybu mechanického elementu. Výhodnejšie je v tomto smere použitie piezoelektrického

javu, ktorým ale nie je možné merať jednosmernú zložku signálu a teda nemožno ho použiť pri výrobe inklinometru. Pri použití kombinácie piezoelektrického javu a kapacitného snímania pohybu mechanických častí dostaneme senzor, ktorým možno merať zrýchlenie vyšších frekvencií, ale i jednosmernej zložky či veľmi nízkych frekvencií. [12]

2.1.2 Snímače natočenia

Obecne tieto snímače môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín a to podľa primárne meranej veličiny na gyroskopy a magnetometre. Rozdiel medzi gyroskopom a magnetometrom hlavne spočíva v tom, že gyroskopy snímajú primárne *uhlovú rýchlosť* a kompasy (magnetometre) snímajú primárne *uhlovú polohu*. Z tohto základného rozdelenia vyplývajú aj ich vzájomne výhody a nevýhody. Napríklad hlavnou výhodou gyroskopu je prakticky nemožnosť rušenia ich primárne meranej veličiny (keď nepočítame silné vibrácie v ose merania) pričom u kompasov je rušenie primárne snímanej veličiny úplne jednoduché napríklad priložením kovového či magnetického predmetu v ich blízkosti a podobne.

2.1.2.1 Vlastnosti inerciálnych snímačov

Snímače využívané v inerciálnych meracích systémoch sú vystavené neustálemu a relatívne veľkému dynamickému zaťaženiu, dôsledkom ktorého ich vlastnosti (charakteristiky) nie sú stále, ale sa menia s časom. Snímače využívané na stavbu inerciálnych meracích systémov musia spĺňať kritéria (Smith & Weyrauch, 1990) a jedná sa o nasledovné:

- stredná chyba gyroskopicky určeného smeru $\sigma_{\varphi} < 0,01^\circ/\text{hodinu}$,
- rozptyl opakovaných meraní jedného smeru $\delta_{\varphi} < 0,002^\circ/\text{hodinu}$,
- presnosť určenia mierkového faktoru má byť aspoň 50ppm,
- rozlišovacia schopnosť snímačov zrýchlenia $da < 10^{-4}g$,
- stredná chyba meraného zrýchlenia $\sigma_a < 5 \cdot 10^{-5}g$,
- presnosť určenia mierkového faktoru na úrovni 200ppm,
- drift snímačov zrýchlenia nižší ako $10^{-2}g/\text{deň}$,
- rezonančná frekvencia minimálne na hranici 100Hz,
- rozsah pracovných teplôt -50°C až 100°C .

Uvedené charakteristiky sa zdajú na prvý pohľad ľahko splniteľné, pri neustálom dynamickom zaťažení týchto snímačov však ich splnenie vyžaduje značné úsilie konštruktérov a precíznu výrobu. [3]

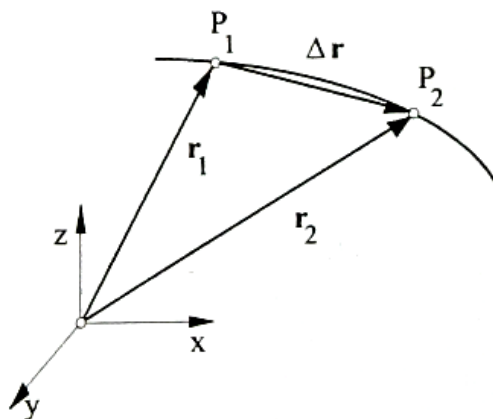
2.2 INERCIÁLNA NAVIGÁCIA

Ako už v úvode bolo naznačené, inerciálna navigácia je spôsob riešenia navigácie objektu v priestore, v prípade, ak nepoužívame z rôznych dôvodov iný spôsob navigácie ako je napríklad GPS (global positioning system). Inerciálna navigácia je metóda navigácie využívajúca údaje z tzv. inerciálnych senzorov - gyroskopov a akcelerometrov. Princíp tejto metódy je relatívne jednoduchý. Ak poznáme východiskovú polohu navigovaného objektu, tak meraním zmeny zrýchlenia a uhlového natočenia objektu v čase, vieme vypočítať rýchlosť a teda aj dráhu a z toho teda aj výslednú polohu. Praktická realizácia je však zložitejšia, pretože je potrebné pri výpočtoch mnohonásobne integrovať hodnotu nameraných údajov z inerciálnych senzorov a tým sa zároveň integruje aj chyba a zvyšuje sa nepresnosť určenia reálnej polohy objektu v priestore. Toto je práve dôvod, prečo je veľmi dôležité dbať na správny výber senzorov, pretože každý senzor má iné vlastnosti a je teda vhodný pre nasadenie do rôznych aplikácií. Táto práca je práve zameraná na to, aby porovnala jednotlivé gyroskopy a určila ich možnosti použitia v praxi.

2.2.1 Pohyb bodu v priestore

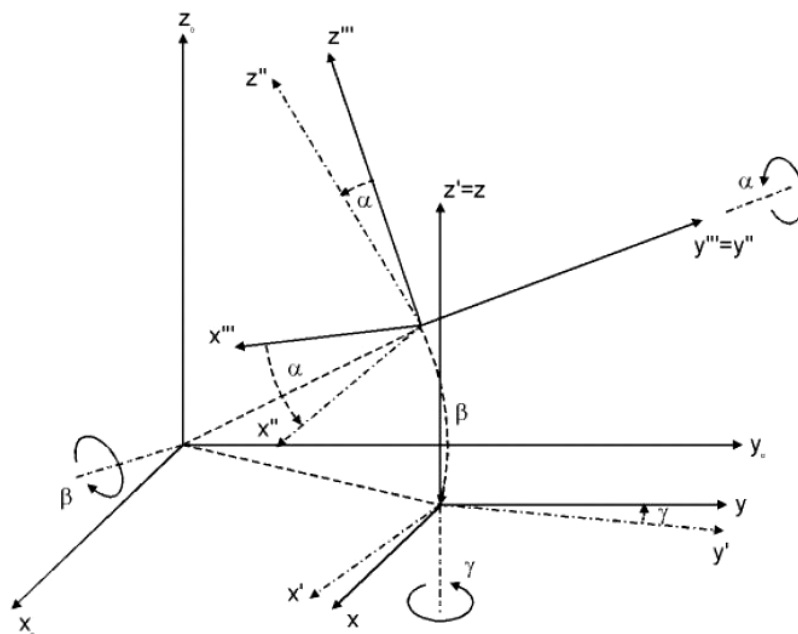
Polohu bodu pohybujúceho sa v priestore popisujú jeho súradnice, resp. jeho polohový vektor. Takéto určenie ale nie je jednoznačné, nakoľko sa môže bod nachádzať v tej istej polohe niekoľkokrát, vždy v rôznych časových okamihoch. Jednoznačné určenie polohy bodu v priestore dosiahnem, ak ku súradniciam polohovému vektoru priradíme ďalší údaj a tým je čas. Potom atribúty pohybu obsahujúce časový údaj sú: *dráha, rýchlosť a zrýchlenie*. Dráha bodu v priestore je definovaná ako zmena polohy, ktorú bod vykoná za určitý čas (obr. 2.1). Vektor Δr je priamou spojnicou bodov P_1 a P_2 a ako je možné z obrázku vidieť, nemusí byť zhodný so skutočnou vykonanou dráhou. Ak bude teda časový interval Δt dostatočne malý, je možné dráhu medzi bodmi P_1 a P_2 považovať za priamku a pohyb bodu

v tomto úseku za pohyb po priamke. Aj v tomto prípade je ale nutné naznačiť, že Δt musí byť vhodne zvolené vzhľadom na typ snímačov respektíve ich vlastnosti. [3]



Obrázok 2.1 Dráha bodu v priestore. [3]

S použitím týchto poznatkov o polohe bodu v priestore môžeme pristúpiť k voľbe vhodného algoritmu ktorým dopočítame presnú polohu. Prvým z príkladov jednoduchého spätno-väzbového algoritmu je G - vektor. V tomto algoritme nie je potrebný žiadny zložitý hardware ale predpoklad, že priemerný smer akcelerácie osy Z je kolmo dolu k zemskému povrchu a jeho priemerná hodnota je $-9,81 \text{ ms}^{-2}$. Iný spôsob je, že zavedieme GPS priamo do inerciálneho navigačného systému. Iný ešte viac zložitejší spôsob je, že zavedieme pravouhlý súradnicový systém. Tu existuje rozdielne riešenie – nejaký z nich s povolenou redundanciou pre presnejšie určenie hodnôt. Sú definované tri osy: roll (pravo – ľavý náklon) = alpha, pitch (sklon – pred – zadný) = beta a smer yaw (otočenie vpravo – vľavo) = gama. Translácia jednotlivých zložiek vzťahujúcich sa k východiskovému systému je vyjadrená ako: $(x'', y'', z'') = \alpha \Rightarrow (x', y', z') = \beta \Rightarrow (x, y, z) = \gamma \Rightarrow (x, y, z)$. [3]



Obrázok 2.2 Inerciálna sústava [2].

Výpočet aktuálnych zrýchlení:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) \cos(\alpha) - \sin(\gamma) \sin(\beta) \sin(\alpha) & -\sin(\gamma) \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\beta) \sin(\alpha) \cos(\gamma) - \cos(\alpha) \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \cos(\beta) & \cos(\gamma) \sin(\beta) \cos(\alpha) + \sin(\gamma) \sin(\alpha) \\ \cos(\beta) \sin(\alpha) & -\sin(\beta) & \cos(\beta) \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x''' \\ \Delta y''' \\ \Delta z''' \end{pmatrix}$$

Výpočet aktuálnych uhlových natočení:

$$\begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\alpha) \tan(\beta) & -\cos(\alpha) \tan(\beta) \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) / \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \alpha''' \\ \Delta \beta''' \\ \Delta \gamma''' \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

2.3 STABILIZÁCIA OBRAZU

Nie vždy máme možnosť za zlých svetelných podmienok rozložiť statív a vytvoriť fotografiu tak ostrú, ako by ste chceli. Statívy, ktoré sa v dnešnej dobe vyrábajú, nie sú až tak veľkých rozmerov ako v minulosti. Samozrejme doba pokročila, ale nie každý je schopný kedykoľvek mať statív poruke a tak stabilizátor obrazu využije skutočne veľká škála ľudí.

Okrem rôznych mechanických stabilizátorov ako sú napr. optický mechanizmus stabilizácie, či systém plávajúcej šošovky, sa používajú systémy stabilizácie obrazu s využitím inerciálnych snímačov. Napríklad VR systém spoločnosti Nikon, ktorý využíva elektronickú redukciu vibrácií (VR) slúžiacu k eliminácii chvenia fotoaparátu a vytvorenia ostrejších fotografií. Pomocou dát získaných z vstavaných snímačov uhlovej rýchlosti robí systém spracovanie snímok vo fotoaparáte a mení tak rozmazané snímky na krásne ostré. Tak isto aj spoločnosť Canon využíva vo svojom IS stabilizačnom systéme výhradne gyroskopy k určeniu smeru pohybu a tým vytvorením korekcie obrazu s využitím pohybu korekčných šošoviek.

2.4 STABILIZÁCIA LIETAJÚCEHO OBJEKTU

Veľmi často diskutovanou témou v modelárskych RC fórach je možnosť stabilizácie lietajúcich modelov v využití auto pilota či čiastočnou stabilizáciou, ktorá zjednodušuje ovládanie takéhoto lietajúceho objektu. Takáto stabilizácia vyžaduje zvládnutie dvoch dôležitých tém – riadenie a regulácia s využitím spätnej väzby zo snímačov natočenia.



Obrázok 2.3 Quad-rotor využívajúci gyroskopy k svojej stabilizácii [19]

2.5 SEGWAY

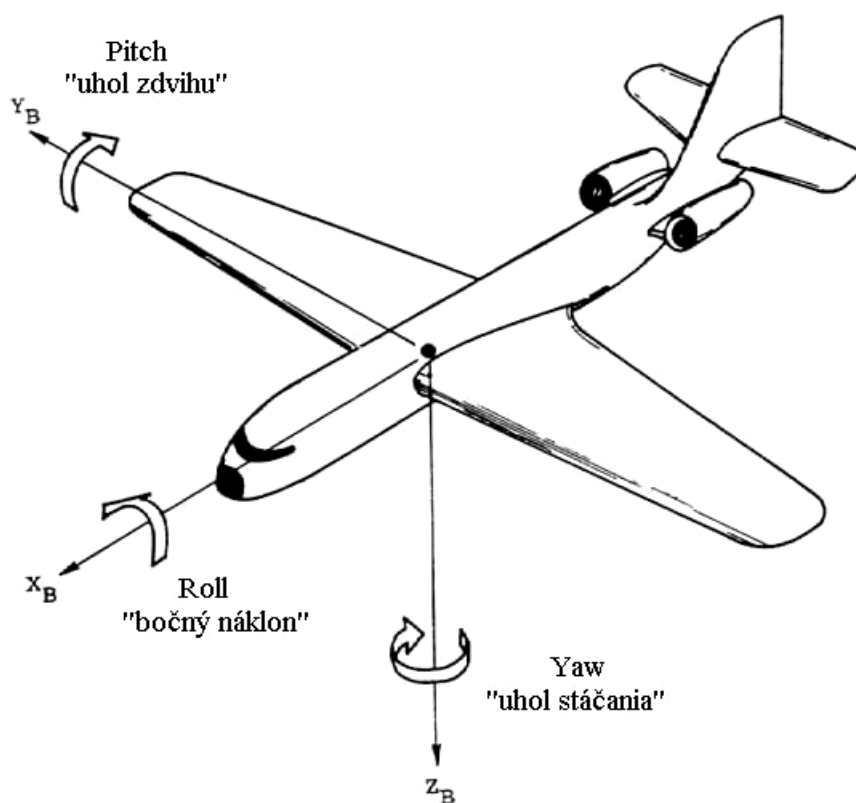
V poslednej dobe veľmi často môžeme vidieť dvojkolesové osobne vozítka, obr.2.4 ktoré si zachováva absolútnu a bezpečnú stabilitu aj napriek svojej nestabilnej dvojkolesovej mechanickej konštrukcii. Za stabilitu tohto vozítka možno ďakovať opäť robustnému riadeniu, ale v neposlednom rade hlavne vďaka niekoľkým gyroskopom, ktoré poskytujú riadiacej jednotke veľmi presnú informáciu o natočení vozítka v každej jeho ose voľnosti. Segway je ďalším príkladom toho, ako moderná veda dokáže určiť s veľmi veľkou presnosťou uhlové natočenie. A práve o tomto, ako je možné danej presnosti dosiahnuť a za akých podmienok, bude popísané v ďalších kapitolách tejto diplomovej práce.



Obrázok 2.4 Segway [20]

3. ZÁKLADNE SPÔSOBY URČOVANIA NATOČENIA

V tejto kapitole ešte raz rozdelím názorne spôsoby určenia natočenia aké sú v bežnej praxi používané. V praxi sa naraz merajú tri osi natočenia. Tieto osi sa označujú ako osi roll (bočný náklon), yaw (uhol stočenia), pitch (uhol zdvihu). Ľahko si tieto tri osi možno predstaviť na obrázku lietadla obr. 3.1.



Obrázok 3.1 Názorne zobrazenie troch os otáčania [21]

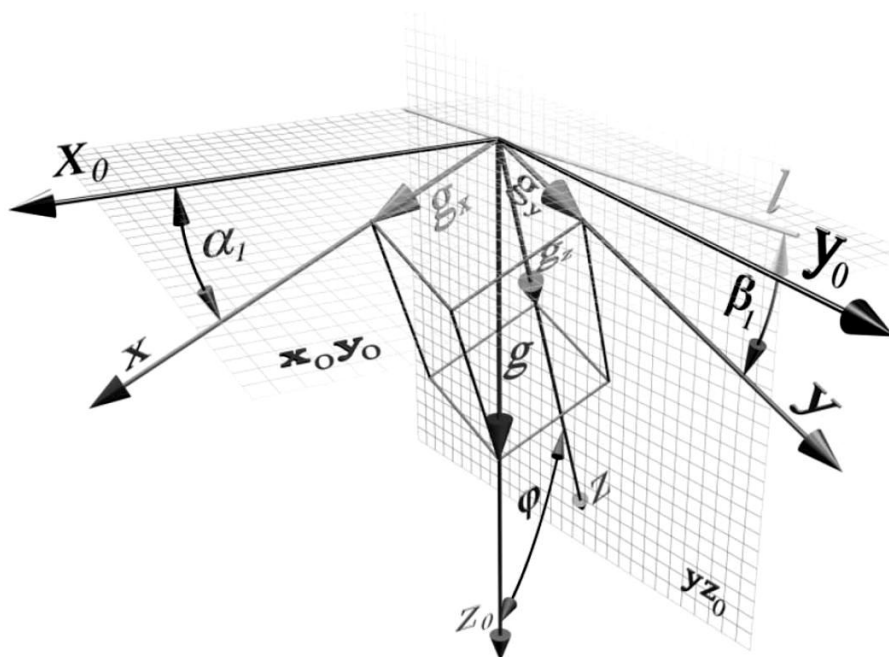
Spôsobov, ako tieto jednotlivé tri osi zmerať je niekoľko. Najčastejšie sa na to používajú gyroskopy. No ako už v úvode bolo naznačené, je možné uhol natočenia zmerať aj magnetometrom či dokonca s použitím akcelerometrov. Niekedy sa môžeme stretnúť aj s kombináciou jednotlivých metód súčasne. V nasledujúcich kapitolách som jednotlivé metódy rozoberal samostatne.

3.1 SPÔSOB URČENIA NATOČENIA S POUŽITÍM AKCELEROMETRU

3.1.1 Rozbor metódy

Hneď na začiatok je ale nutné spresniť fakt, že táto metóda neurčí natočenie v priamom zmysle slova, to znamená, neurčí natočenie v ose „z“ teda v ose yaw (obr.3.1), ale dokáže určiť náklon teda osu „x“ a „y“ ktoré sú vzťahné na gravitačné zrýchlenie. To znamená, meranie vychádza z toho, že náklon možno vyjadriť určením jeho čiastkových uhlov.

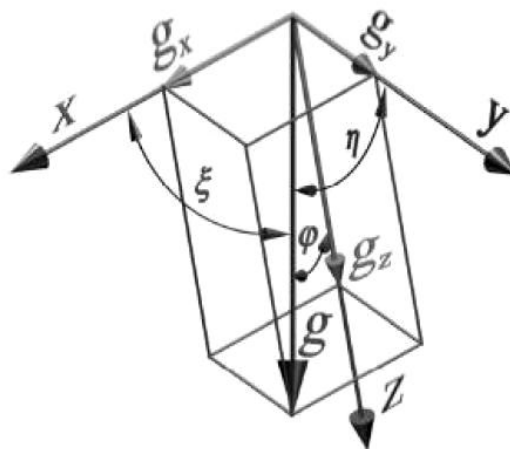
Snímače možno rozdeliť na dvoj a troj ose. U dvoj osového snímaču sa určuje náklon pomocou jedného čiastkového uhlu, ktorý je vychýlený oproti smeru gravitačného zrýchlenia. Jedná sa o náklon v rovine. Trojosí snímač zisťuje náklon určením jeho dvoch čiastkových uhlov. [34]



**Obrázok 3.2 Určovanie natočenia v osách vzťahných ku gravitačnému
zrýchleniu [35]**

Ako je na obr.3.2 vidno, uhol φ naznačuje ľubovoľný uhol náklonu, ktorý je rozložený do dvoch zložiek uhlov α_1 a β_1 ktoré sú obsiahnuté v rovine xz_0 a yz_0 . Na tomto obrázku je súradnicový systém označený ako $x_0y_0z_0$ ktorý je nehybný a jeho osa z_0 je zvislá. Súradnicový systém xyz je pevne spojený s pohyblivým snímačom.

Uhol β_1 možno nazvať uhol klopenia. Snímače náklonu tvoria dva nezávislé signály. Jeden z týchto signálov odpovedá uhlu klopenia a druhý uhlu klonenia α_1 . Pri meraní náklonu sú uhly klonenia a klopenia definované na obr.3.3. Náklon je určený meraním zložiek gravitačného zrýchlenia. Pokiaľ potrebujeme snímač náklonu s takým meracím rozsahom, aby pokryl všetky možné pozície s ohľadom na vektor gravitácie, musí byť snímač aspoň trojosí.



Obrázok 3.3 Zložky gravitačného zrýchlenia [35]

V zvislej polohe snímaču pokiaľ je os z zhodná so smerom gravitačného zrýchlenia, sú merané uhly η a ξ 90° . Náklon je teda 0° . Uhly ξ a η sú vlastne doplnkami uhlov α_1 a β_1 do 90° . Vzťahy medzi jednotlivými uhlami možno vyjadriť aj nasledujúcimi rovnicami:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \xi \quad (3.1)$$

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2} - \eta \quad (3.2)$$

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} \quad (3.3)$$

$$g_x = g \cdot \sin \alpha_1, \quad g_y = g \cdot \sin \beta_1, \quad g_z = g \cdot \cos \varphi \quad (3.4)$$

g – gravitačné zrýchlenie

g_x, g_y, g_z – kartézské zložky g , ktoré sú priemety zrýchlenia g do os x, y, z .

ξ, φ, η – uhly zovreté medzi zrýchlením g a osami x, y, z .

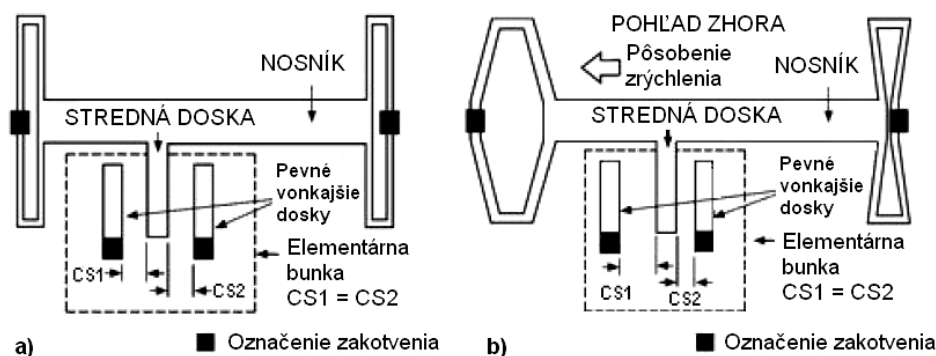
3.1.2 Akcelerometer

Princíp činnosti spočíva v meraní účinku sily na seizmickú (inerciálnu) hmotu. Z prvého Newtonovho zákona vyplýva, že pri známej hmotnosti je sila a zrýchlenie ekvivalentné. Nakoľko sa principiálne jedná o meranie vektoru sily vyvolanej meraním zrýchlenia, je toto zrýchlenie určené relatívne a pre absolútne hodnoty je nutné ďalšie matematické spracovanie. Polovodičové akcelerometre sú založené na technológii MEMS, ktorá spĺňa naše požiadavky z hľadiska rozmeru a vysokého stupňa integrácie obvodov zaisťujúcich obsluhu A/D prevodníku, komunikácie a podobne.

Akcelerometre (mám na mysli skupinu vyrobenú technológiu MEMS) je možné rozdeliť podľa princípu fungovania na:

3.1.2.1 Kapacitné akcelerometre

Jedná sa o skupinu akcelerometrov, od ktorých sa vyžadujú lepšie vlastnosti. Tieto akcelerometre využívajú zmenu kapacity v závislosti od zrýchlenia, ktoré na ne pôsobí. Štruktúra snímača umožňuje merať kladné aj záporné, statické aj dynamické zrýchlenia. Do tejto skupiny patrí aj akcelerometer, ktorý som použil v tejto práci (uvedené ďalej). Medzi popredných výrobcov týchto akcelerometrov patria firmy ako sú Analog Devices, Freescale a iné.



Obrázok 3.4 Štruktúra kapacitného akcelerometru, a) bez pôsobenia zrýchlenia, b) s pôsobením zrýchlením [34]

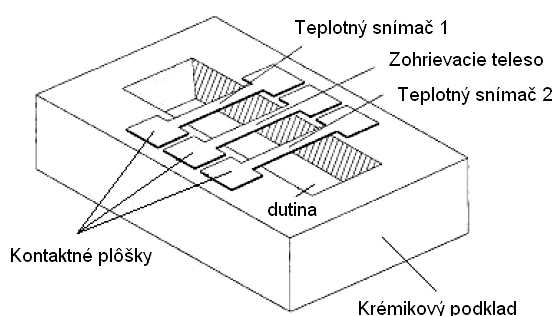
3.1.2.2 Piezorezistívne akcelerometre

Princíp spočíva v tom, že seizmická hmotnosť je závislá na pružnom návrate plochy vybavenej dvomi alebo štyrmi piezorezistívnymi snímačmi zapojenými do Wheatesonovho mostíku. Ohýbanie plochy je prenášané do meranej deformácie. Táto deformácia dovoľí zmenu zrýchlenia na elektrickú hodnotu a získaný signál je úmerný zrýchleniu pohybujúceho sa objektu.

Medzi nevýhody patrí to, že pre tento akcelerometer nie je práve priaznivá linearita, navyše sa vyznačuje vysokou citlivosťou na zmenu teploty, má priemerný výkon, je citlivý na vibrácie, otrasy a vyžaduje veľmi stabilný zdroj napájania a pri zvyšovaní šírky pásma dochádza k znižovaniu citlivosti akcelerometru.

3.1.2.3 Tepelný princíp v akcelerometroch

Touto metódou vytvorený snímač predstavuje jednoduchosť, spoľahlivosť a nízku cenu. Prvý krát bol predstavený v roku 1991. Využíva šírenie tepla malou bublinou horúceho vzduchu v uzatvorenej komore. Snímač ma citlivosť 0,6mg, ktorá sa môže teoreticky rozšíriť až pod niekoľko [μ g]. Vnútorne usporiadanie je možné vidieť na obr.3.5.



Obrázok 3.5 Vnútorná štruktúra tepelného akcelerometru [34]

Má jednoduchú štruktúru, skladá sa z malého kremikového podkladu s vyleptanou dutinkou kvôli termálnej izolácii. Uložené centrálne zahrievacie teleso sa zahrieva a znižuje hustotu vzduchu, ktorý ho obklopuje. Teplotný rozdiel merajú dva snímače teploty, rovnako vzdialené od zahrievacieho telesa. Snímač je zapuzdrený v zatvorenej komore, aby bolo zabránené toku vonkajšieho rušivého vzduchu. Tento typ akcelerometru vyrába firma MEMSIC.

3.1.3 Zhrnutie metódy

Tento spôsob merania natočenia či uhlu náklonu je v bežnej robotike využívaný no hlavne na statických objektoch. Mám tým namysli napríklad helmy virtuálnej reality – teda operátorské helmy u ktorých sa predpokladá, že helma bude takmer v statickom stave čo znamená, že nebude na snímače pôsobiť iné zrýchlenie ako gravitačné. V opačnom prípade bude nameraná hodnota uhlu skreslená a len ťažko filtrovateľná. Tento poznatok jednoznačne obmedzí akcelerometrické snímače natočenia na dosť nevýhodnú pozíciu používateľnosti v mobilnej robotike.

3.2 MAGNETOMETRIA

3.2.1 Úvod do merania mag. poľa Zeme

Kompas sa považuje za jeden z najstarších pomôcok na určenie svetových strán a teda na určenie smeru a navigáciu. Kompas je citlivý na magnetické pole Zeme. Meranie tohto magnetického poľa bližšie skúma magnetometria. Na to, aby sme lepšie pochopili magnetometre a elektronické kompasy, uvediem základy magnetometrie.

Magnetometria predstavuje jednu z najefektívnejších geofyzikálnych metód skúmajúcich prirodzené geofyzikálne polia, konkrétne stacionárne magnetické pole Zeme a jeho využitie pre rôzne praktické účely. Magnetometria patrí k najstarším geofyzikálnym metódam, ktoré začali magnetické pole Zeme používať úplne na začiatku pre navigáciu lodí a až neskôr sa začala využívať v oboroch ako je geodézia. Už dávno sa zistilo, že voľne pohyblivá železná magnetka vždy zaujme rovnakú polohu voči svetovým stranám. Ukázalo sa skúmaním, že príčinou je orientácia globálneho stacionárneho Zemského magnetického poľa (ďalej ZMP), ktorého prejavy sú pozorovateľné na Zemskom povrchu, ako aj do určitej vzdialenosti od neho. [5]

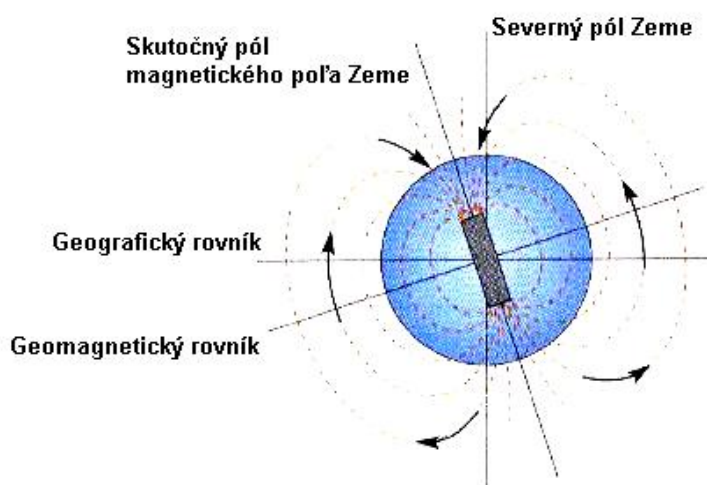
Magnetická indukcia na povrchu Zeme sa vyjadruje v Teslach, [T] prípadne v menších jednotkách [mT], [μ T], [nT].

3.2.2 Zemské magnetické pole

Tvar Zemského magnetického poľa je podobný tvaru poľa tyčového magnetu (fiktívne umiestneného v strede zemského telesa) s osou orientovanou približne v smere osi rotácie Zeme (s odklonom cca 11° - obr.3.6). Intenzitu ZMP v danom bode na povrchu Zeme predstavuje totálny vektor H s určitou amplitúdou a orientáciou. V pravouhlom súradnom systéme orientovanom tak, že rovina XY je dotyčnicová k Zemskému povrchu a os Z k nemu kolmá, je možné totálny vektor ZMP rozložiť na príslušné zložky.

Na toto hlavné tzv. dipólové pole sa superponujú kontinentálne anomálie rozkladajúce sa na veľkých plochách svetadielov. Spolu s anomáliami, ktoré vyvolávajú rôzne akumulácie magnetických hornín vo vrchných častiach zemskej

kôry tieto predstavujú pomerne zložité výsledné magnetické pole na zemskom povrchu. Na vysvetlenie príčiny existencie a udržiavania ZMP bolo vypracovaných viacero teórií, ktoré pomerne uspokojivo vysvetľujú javy súvisiace s jeho prejavmi, ale s určitosťou sa potvrdiť nedajú. Ich základom sú tzv. magneto hydrodynamické pochody prebiehajúce vo vnútri zemského telesa. [5]

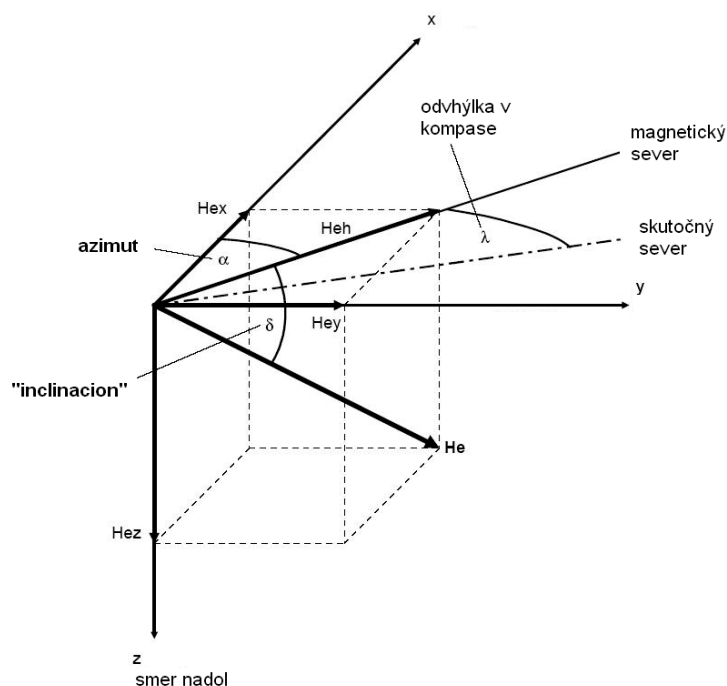


Obrázok 3.6 Magnetické pole Zeme [17]

ZMP je v kozmickom priestore jednak ovplyvňované kozmickým magnetickým poľom, ale najmä procesmi, ktoré prebiehajú na Slnku. Vplyv slnečnej činnosti a jeho polohy voči Zemi sa prejavuje pôsobením častíc tzv. slnečného vetra, čo sú elementárne častice neustále vystupujúce zo slnečného povrchu a prúdiace do okolitého kozmického priestoru. Častice slnečného vetra sú často elektricky nabité (ióny) a teda sú zachytávané magnetickým poľom Zeme a pohybujú sa pozdĺž jeho siločiar. V blízkosti pólu, kde sa siločiar zhusťujú, dochádza k svetielkovaniu (vzniká polárna žiara).

Intenzita ZMP v oblasti Slovenska sa pohybuje okolo 47000 nT, najväčšia hodnota je v oblasti magnetických pólov asi 62000 nT, najmenšia v okolí rovníka, asi 23000 nT. Denné variácie spôsobujú zmeny intenzity v jednotkách až desiatkach nT, magnetické búrky v stovkách nT, anomálie vyvolané zmenou obsahu magnetických minerálov v geologických telesách vyvolávajú zmeny až do veľkosti tisícov nT a zmeny väčšie ako desaťtisíc nT môžu vyvolať umelé zdroje, napr. rôzne výkonné elektrické zariadenia, kovové konštrukcie a pod.

Pre konkrétne vysvetlenie zložiek magnetického poľa Zeme nám slúži obr.3.7. Horizontálna os X (heading direction) ukazuje smer pohybu. Os Y je tiež horizontálna a je kolmá k ose X a tiež k osi Z, ktorá má smer gravitačnej sily. Vektor H_{eh} je tiež horizontálna zložka a je kolmá na gravitačnú silu a smeruje k magnetickému severu Zeme. Zložka H_e zobrazuje celkovú intenzitu a smer magnetického poľa Zeme. Azimut α je uhol medzi smerom pohybu zariadenia a magnetickým severom a je ho možné vypočítať ako $\arctan(H_{ey}/H_{ex})$, kde H_{ey} je horizontálna zložka v ose Y a H_{ex} je horizontálna zložka v ose X. Declination – teda odchýlka v kompase vyjadruje uhol medzi vektorom zložky magnetického poľa a smerom ukazujúcim skutočný geografický sever, jeho veľkosť je závislá na geografickej polohe a pohybuje sa v rozmedzí ± 11 -25 stupňov. Pre informáciu medzi skutočným geografickým severom a smerom pohybu je treba k azimutu pripočítať veľkosť uhlu declination. Uhol medzi vektorom magnetického poľa Zeme a vektorom horizontálnej zložky sa nazýva inclination. Inclination je na geomagnetickom rovníku rovný nule a na geomagnetických pólach je rovný ± 90 stupňov. Nakoľko uhly inclination a declination sa s časom a geografickou polohou menia, sú vydávané korekčné tabuľky, ktoré sú tlačené priamo na mapách pre danú oblasť. [2]



Obrázok 3.7 Zložky magnetického poľa Zeme [2]

3.2.3 Najčastejšie používané senzory magnetického poľa Zeme

V posledných rokoch sa na trhu s elektronickými súčiastkami zvyšuje ponuka senzorov magnetického poľa resp. senzorov vhodných na vyrobenie elektronického kompasu. Nakoľko tieto senzory sú určené na meranie H zložky magnetického poľa, je nutné si uvedomiť, že ich výstupný signál bude veľmi ovplyvňovaný aj tým, v akom uhle voči Zemskému povrchu je senzor naklonený. Z tohto dôvodu nám nestačí na vytvorenie elektronického kompasu iba snímač magnetického poľa, ale ďalšie snímače na meranie náklonu tzv. inklinometre. Tie sa najčastejšie vyrábajú pomocou akcelerometrov. Takýto senzor merajúci geografický severný pól nazývame modulom elektronického kompasu. Sensory magnetického poľa ktoré sa najčastejšie v robotike používajú sú zhrnuté v nasledujúcej kapitole.

3.2.4 Snímače magnetického poľa

Podľa intenzity magnetického poľa rozdeľujeme magnetické snímače do troch skupín: a) snímače nízkej intenzity $< 1\mu\text{G}$ (microgauss) b) strednej od $1\mu\text{G}$ do 10G c) vysokej intenzity magnetického poľa $> 10\text{G}$. Magnetické snímače na meranie magnetickej intenzity Zeme sa zaraďujú do strednej kategórie. Vzťah medzi jednotkou Gauss jednotkou Tesla a jednotkou gamma je nasledovný: $1\text{G} = 10^{-4}\text{T} = 10^5\text{gamma}$. Intenzitu magnetického poľa Zeme (teda intenzitu od $1\mu\text{G}$ do 10G) je možné merať nasledovnými spôsobmi:

- Optickými vlákn. snímačmi, ich rozsah je až $(10^{-8}$ až $10^4)$ Gauss.
- Optické pumpy, $(10^{-6}$ až $10^1)$ Gauss
- Magneto rezistívne majú najširší rozsah až $(10^{-8} - 10^9)$ Gauss
- Flux Gate senzory $(10^{-3}$ až $10^{-1})$ Gauss
- Magneto tranzistorové $(10^{-7}$ až $10^2)$ Gauss
- Magneto diódové $(10^{-6}$ až $10^3)$ Gauss

V robotike a všeobecne v inerciálnej navigácii sa najčastejšie používajú na meranie magnetického poľa Zeme senzory na báze *magneto-rezistívne* a *senzory flux gate*. Popredný výrobcovia elektronických kompasov ako je napríklad Honeywell alebo Philips využívajú pre konštrukciu senzory na princípe magento rezistívneho snímania. V ďalších kapitolách si uvedieme senzory práve od týchto výrobcov.

3.2.4.1 Senzory Flux-Gate

Tieto senzory sa používajú na meranie veľmi nízkych intenzít magnetického poľa. Základnú ideu funkcie flux-gate senzorov možno vzdialene prirovnať k prílivu a odlivu mora spôsobeného malou gravitáciou Mesiaca. Rovnako ako gravitácia Mesiaca spôsobuje zvýšenie hladiny mora v mieste Zeme, kde je Mesiac bližšie, dôjde k posuvu hysteréznej slučky, vplyvom napr. slabého magnetického poľa Zeme, pri magnetizácii od feromagnetického jadra od jednej saturácií k druhej. Keď je jadro magneticky saturované, stane sa pre okolité magnetické pole akoby neviditeľné a neovplyvňuje ho. Keď jadro nie je v saturácii, zakrivuje jeho siločiaru a je naň citlivé. Pri opakovanej periodickej saturácii feromagnetického jadra tak dochádza k hradlovaniu (prerušovaniu) vplyvu okolitého magnetického poľa a na základe Faradayovho zákona, premenné magnetické pole indukuje v závitoch vodiča snímačnej cievky elektrický prúd. Ten je potom úmerný práve okolitému slabému magnetickému poľu, ktoré možno tak merať za bežnej izbovej teploty. [7], [11]

Vlastnosti:

- Rozsah merania stovky nT až jeden mT.
- Rozlíšenie až 100pT
- Teplotná závislosť 30ppm/K
- Využíva nelineárnu magnetizačnú krivku feromag. jadra.
- Mechanicky odolné prevedenie.
- Výstupný signál úmerný magnetickému poľu.
- Teplotný rozsah -40°C až +85°C.

V hardwarovom naj jednoduchšom prevedení je samotný flux-gate snímač tvorený toroidným jadrom, na ktorom sú navinuté jedna, najčastejšie dve alebo aj viac cievok. Vždy je jedna cievka tzv. budiaca (driving coil), ktorá periodicky magnetizuje jadro, a ostatné cievky sú už snímacie (Sense coil), citlivé na merané vonkajšie mag. pole. Toto usporiadanie je určené pre meranie poľa v jednom smere, ktoré je kolmé na snímaciu cievku.

3.2.4.2 KVH C100 COMPASS ENGINE

Spoločnosť KVH predáva kompas s typovým označením C100 s presnosťou až $\pm 0,3^\circ$ (verzia so senzorom SE-25, pri maximálnom náklone $\pm 16^\circ$), resp. $\pm 0,5^\circ$

(verzia zo senzorom SE-10, pri maximálnom náklonu $\pm 45^\circ$), s rozlíšením $0,1^\circ$ a opakovateľnosťou $\pm 0,2^\circ/\text{s}$ v cene cca 700 USD. Stabilizácia náklonu je mechanického typu a odoláva nárazom 40 G a vibráciám 18 G (po dobu 30 min). Kompas má analógový ($\sin/\cos +1,5\text{V} \pm 1\text{V}$) aj digitálny výstup (UART ASCII protokol, 300 až 9600 baud). Doba odozvy je nastaviteľná od 0,1 (10 Hz) do 24 sekúnd. Kompas je určený pre napájanie 8 až 18 V alebo 18 až 28 V (podľa výberu), maximálny prúdový odber je 40 mA. Rozmery kompasu sú 114 x 46 x 28 mm a váha 64 g. Váha dodatkového hliníkového tienenia je 400 g s rozmermi 80 x 75 x 57 mm. Prevádzková teplota senzoru je -40 až $+65^\circ\text{C}$. [11]



Obrázok 3.8 Kompas KVH C100 [17]

3.2.4.3 AQCD – FX360

Jedná sa o kompas nemeckej firmy AQUAMATIC zložený z dvojsového stabilizačného kardanového závesu ($\pm 30^\circ$), jednej primárnej a dvoch sekundárnych cievok a tlmiacej kvapaliny pričom jeho presnosť je $\pm 2^\circ$, citlivosť 1-45 mT a opakovateľnosť $\pm 1^\circ$. Časová odozva je 100 ms. Výška kompasu je 67 mm a priemer 69 mm. Váha 290 g. Prevádzková teplota senzoru je -20 až $+80^\circ\text{C}$. [11]

3.2.4.4 Senzory využívajúce HALL efekt

Hallový efekt objavil E. H. Hall v roku 1879. Hallov jav možno objasniť pôsobením Lorentzovej sily. Uvažujme kovovú dosťičku o hranách a, b, c, vloženú do magnetického poľa konštantnej magnetickej indukcie orientovanej v smere osy – z. Dosťičkou preteká jednosmerný prúd I v smere osy x. Elektrostatická sila v smere

osy $-y$, tak spôsobuje, že na stenách (rovnobežných s osami x a z) vzorku sú rôzne potenciály. Potenciálny rozdiel medzi nimi nazývame Hallové napätie. Dôležitý je rozdiel medzi počtom majoritných a minoritných nosičov elektrického náboja v materiáli a preto je vhodné použiť polovodičové materiály. Základnou výhodou takéhoto kompasu je jeho jednoduchosť pri meraní statických magnetických polí (lineárna závislosť na magnetickej indukcií). Švajčiarska firma Sentron AG vyrába jedno ose (1SA-1M) a dvoj ose (2SA-10) magnetometre založené na Hallovom jave. Na rozdiel od konvenčných Hall effect magnetometrov merajú magnetometre Sentron magnetické pole v paralelnom smere s plochou čipu. Vďaka inému princípu a integrácií na jednom čipu s obvody pre úpravu signálu a sú tak o mnoho citlivejšie. V niektorých aplikáciách môžu veľmi dobre nahradiť magnetorezistívne magnetometre lebo netrpia nelinearitou, hystereziou, flipping efektom a malým rozsahom. Elektronický kompas postavený na Hall efekte sa však zatiaľ nevyrába. [11]

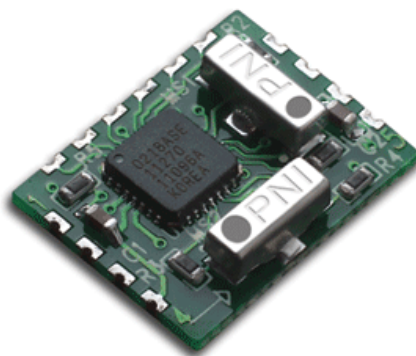
3.2.4.5 Magneto indukčné kompasy

Pre každú os je vytvorená jedna cievka, ktorá funguje ako indukčná časť v nízko výkonovom LR oscilátore. Relatívna permeabilita feromagnetického jadra cievky je závislá na magnetickom poli v ktorom sa nachádza (teda tiež na magnetickom poli Zeme). Jednosmerné napätie udržiava cievku v lineárnej pracovnej oblasti. Pokiaľ je senzor postupne v magnetickom poli natáčaný až o 90° , tak sa výstupná frekvencia oscilátoru môže meniť až o 100%. Výstupná frekvencia oscilátoru môže byť meraná priamo mikroprocesorom pomocou compare/capture vstupu. K výhodám magnetoindukčných kompasov patrí jednoduchosť zapojenia a veľmi nízka spotreba. Distribúciou takýchto kompasov sa zaoberá firma PNI Corporation a medzi najznámejšie z nich patrí MicroMag2 [11]

3.2.4.6 MicroMag 2-Axis Sensor Module

Tento senzorový modul obsahuje dva magnetoindukčné magnetometre vyrábané MPI Corporation, má výbornú teplotnú stabilizáciu, ale jeho digitálny výstup poskytuje cez SPI rozhranie len neupravené dáta získané priamo z magnetometrov. Modul nemá kompenzáciu vychýlenia z horizontálnej polohy.

Rozsah merania je $\pm 1100 \mu\text{T}$, rozlíšenie $0,015 \mu\text{T}$. Spotreba $< 500 \text{ mA}$ pri napájaní 3V . Napájacie napätie môže byť v rozsahu $2,2$ až $5,25 \text{ V}$. Rozmery sú $14 \times 11 \times 2,8 \text{ mm}$. Prevádzková teplota senzoru je -20 až $+70^\circ \text{C}$. Cena je 40 USD . [11]



Obrázok 3.9 Kompas MicroMag [17]

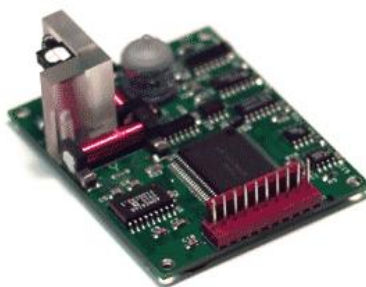
3.2.4.7 Vector 2x

Kompas s rozlíšením 1° , presnosť a opakovateľnosť 2° , rozsah merania $\pm 90 \mu\text{T}$ s presnosťou $\pm 1 \mu\text{T}$ pri rýchlosti merania $2,5 \text{ Hz}$ alebo rozsah $\pm 200 \mu\text{T}$ s presnosťou $\pm 5 \mu\text{T}$ pri rýchlosti merania 5 Hz . Cena modulu je 50 USD . Kompas umožňuje kompenzáciu deviation efektu, ale nemá kompenzáciu vychýlenia z horizontálnej polohy. Okrem azimutu môže poskytovať tiež neupravené dáta z magnetometrov. Rozmery sú $38 \times 33 \times 10 \text{ mm}$, váha 12 g . Prevádzková teplota senzoru je -20 až $+70^\circ \text{C}$. [2]

3.2.4.8 TCM2-20 a TCM2-50

TCM2 (Till Compensated Module) je založený na trojosovom magnetoindukčnom magnetometre a dvojsovom elektrolytickom inklinometri a neobsahuje žiadne pohyblivé časti. Výrobcom je PNI Corporation. Kompenzácia vychýlenia z horizontálnej polohy je účinná pre vychýlení max. $\pm 20^\circ$ u typu TCM2-20, a max. $\pm 50^\circ$ u typu TCM2-50 z horizontálnej polohy. Cena TCM2-20 je 399 USD a cena TCM2-50 je 769 USD . Presnosť týchto modulov je $\pm 0,2^\circ$, rozlíšenie $\pm 0,1^\circ$ ($0,01 \mu\text{T}$) a opakovateľnosť $\pm 0,1^\circ$. Rýchlosť možno nastaviť voliteľne na 16

alebo 30 Hz. Moduly poskytujú digitálny výstup pri ktorom cez rozhranie RS-232 modul odpovedá na príkazy a analógový výstup pri ktorom je azimut prevádzaný 8bit prevodníkom na výstup sin/cos s rozsahom 0-5V, rozlíšenie je teda v analógovom móde 1,4°. Okrem azimutu poskytujú moduly tiež informáciu o veľkosti magnetického poľa, a teplote (rozsah -20°C až $+70^{\circ}\text{C}$, presnosť po kalibrácii $\pm 1^{\circ}\text{C}$, rozlíšenie 1°C) a náklone (TCM2-20 rozsah $\pm 20^{\circ}$, presnosť $\pm 0,2^{\circ}$, rozlíšenie $0,1^{\circ}$, opakovateľnosť $\pm 0,2$ a TCM2-50 rozsah $\pm 50^{\circ}$, presnosť $\pm 0,4^{\circ}$, rozlíšenie $0,3^{\circ}$, opakovateľnosť $\pm 0,3$). Napájacie napätie je 5V. Rozmery modulu sú 64 x 51 x 40 mm, hmotnosť 46 g a prevádzková teplota je -20 až $+70^{\circ}\text{C}$. [2]



Obrázok 3.10 Kompas TCM [17]

3.2.4.9 Senzory AMR (Magneto rezistívne)

Magneto rezistívny jav je taký fyzikálny jav, pri ktorom nastáva zmena odporu materiálu v dôsledku pôsobiaceho magnetického poľa. Prvý krát bol tento jav popísaný v roku 1857 Williamom Thomasom pričom po prvý krát bol využitý až o viac ako 100 rokov neskôr.

Samotný snímač je postavený na silikónovej doštičke na ktorej je nanosený tenký film zo zlúčeniny nikel – irion takzvaný permalloy. Jeho odpor je ovplyvňovaný magnetickým poľom a jeho zmena sa pohybuje v rozsahu 2- 3%. Aj preto sa využíva konfigurácia štyroch citlivých snímačov zapojených do Wheatstonovho mostíku.

Šírka pásma týchto snímačov je približne 1 – 5MHz. Časová konštanta je veľmi nízka a nie je limitovaná ani cievkou ani oscilačnou frekvenciou.

Základné vlastnosti:

- Citlivosť vyššia ako u Hallových sondách.
- Vysoký frekvenčný rozsah
- Hlavná nevýhoda je, že veľmi silné vonkajšie mag. pole môže zničiť vnútorné usporiadanie domén a preto sa musí využívať obnovenie – *flipping*.

Nutnosť využívať flipping v týchto snímačoch prináša so sebou aj radu výhod ale i nevýhod. Výhody periodického flippingu sú: odolnosť voči silným poliam, zníženie hysterézy, pričom bez použitia flippingu je hysterézia v jednotkách [%] pričom pri použití flippingu sa zníži až na desatiny [%]. Medzi posledné výhody patrí periodická reverzácia charakteristiky – v mostíkovej konfigurácii striedavý výstup. Nevýhody flipovania sú zníženie šírky pásma a zvýšenie spotreby.

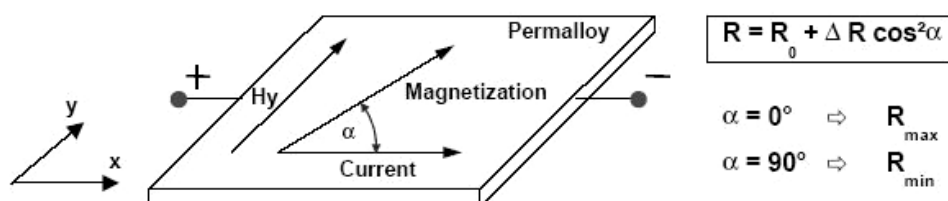
Pri dodržaní zvýšenej linearity a potlačenie vplyvu teploty je potrebné zaviesť spätnú väzbu. Nevýhody tejto spätnej väzby sú citeľné zvýšenie spotreby.

Praxou overené výsledky sú také, že linearita snímačov je približne 0,04% (400ppm), šup približne $3\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ale je závislý na veľkosti flipovacích impulzov a rozlíšenie lepšie ako 10nT. [11], [6]

3.2.4.10 KMZ51(2)

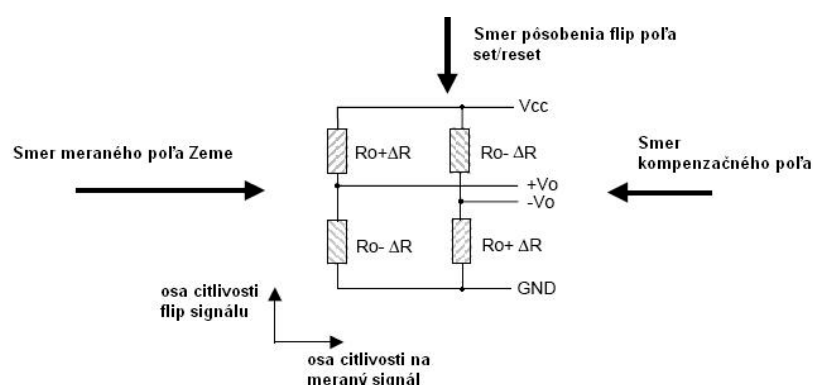
Jedná sa o senzory magnetického poľa, vyrobené firmou PHILIPS Semiconductors . Celý senzor je zabudovaný do miniatúrneho SMD puzdra, pričom KMZ51 obsahuje jeden senzor merajúci v jednej osi magnetické pole a KMZ52 je senzor umožňujúci meranie magnetického poľa v dvoch osiach. V puzdre každého tohto integrovaného obvodu sa nachádzajú dve cievky a to kompenzačná a takzvaná „flipovacia“ (jej možné využitie bude opísané neskôr). Oba tieto obvody merajú malé magnetické pole Zeme resp. jeho horizontálnu zložku ktorá je potrebná na výpočet azimutu ako už bolo vyššie písané v časti *magnetometria*. [9]

KMZ5x je veľmi citlivý magnetometer, založený na magnetorezistívnom jave v tenkej vrstve magnetického materiálu (permaloy) obr.3.11.



Obrázok 3.11 Magnetorezistívny snímač magnetického poľa. [9]

Kompenzačná cievka sa používa na kompenzovanie teplotnej závislosti. Znamienko citlivosti môže byť nastavované alebo menené pomocou nastavovacej cievky. Pokiaľ bol magnetometer vystavený v silnom magnetickom poli, tak môžeme krátkymi prúdovými impulzmi do kompenzačnej cievky znovu magnetometer nastaviť. Záporné prúdové resetovacie impulzy nastaví senzor na citlivosť s opačným znamienkom. S použitím pravidelne striedajúcich sa „flipovacích“ impulzov a synchronného zosilňovača dosiahneme nezávislosť na ofsete senzoru a zosilňovača. [9], [11]



Obrázok 3.12 Magnetický senzor s naznačeným kompenzačným, nastavovacím a meraným smerom magnetického poľa.

Senzor je napájaný jednosmerným napájacím napätím 5V a je uložený v SMD puzdre SO8 (KMZ51) resp. SO16 (KMZ52). Cena tohto obvodu sa pohybuje približne 250Kč.

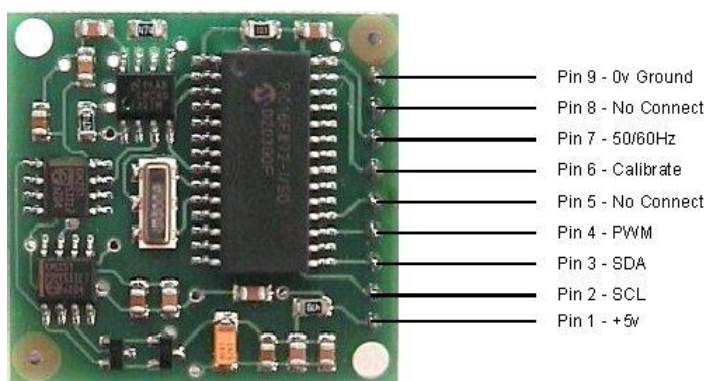
3.2.4.11 HMC105x

Integrované obvody rady HMC1051Z a HMC1052 patria k senzorom pre meranie magnetického poľa Zeme vyvinuté firmou *Honeywell*. Vo väčšine prípadov, sa môžeme ale stretnúť s označením HMC1055 pričom pod týmto typovým číslom

sa neskrýva žiadny nejaký integrovaný obvod ale set integrovaných obvodov respektíve senzorov určených k vytvoreniu komplexnej jednotky elektronického kompasu, so zabudovanou kompenzáciou náklonu. Obvodový set HMC1055 obsahuje jeden HMC1051Z čo je senzor na meranie magnetického poľa Zeme v jednej ose, HMC1052 obsahujúceho dva senzory pre meranie magnetického poľa v dvoch osách a dvoj osový akcelerometer MXS3334UL vyrobeného na báze MEMS. Magnetické snímače rady MHC sú založené na podobnom princípe ako snímače KMZ5x od firmy Philips, teda magneto rezistívne snímače. Všetky tieto snímače patria do kategórie low-cost pričom ich presnosť je veľmi výborná. Je to hlavne tým, že problematika týchto výrobných technologických postupov je veľmi dobre zvládnutá, pričom obmedzenia vychádzajú už iba z fyzikálnej podstaty jednotlivých fyzikálnych dejoch na ktorých sú snímače postavené. [10]

3.2.4.12 Devantech Magnetic Compass CMPS03

Tento elektronický kompas je založený na dvoch magnetometroch Philips KMZ51 dosahuje rozlíšenie $0,1^\circ$ a presnosť po kalibrácii 3 až 4° pri určovaní azimutu z horizontálnej zložky magnetického poľa. Jeho cena je 23USD. Kompas nemá žiadnu kompenzáciu náklonu vodorovnej polohy. Jeho napájacie napätie je 5V a prúdový odber 20mA. Kompas poskytuje zároveň dva možné druhy výstupu, PWM (pulzy s šírkou od 1ms, čo odpovedá uhlu 0° do 36,99ms, čo odpovedá uhlu $359,9^\circ$ teda s krokom $0,1\text{ms}/^\circ$) alebo výstup s protokolom I²C. Kompas poskytuje nové údaje rýchlosťou 50 alebo 60 Hz. Rozmery sú 32 x 35 mm. [9]



Obrázok 3.13 Kompas CMPS03 [30]

3.2.4.13 YAMAHA YAS529

Jedná sa o veľmi malý senzor magnetického poľa Zeme, ktorý sa používa pre mobilné telefóny a kompaktné navigačné GPS systémy ako korekcia pri krátkodobej strate GPS signálu. Tento snímač v sebe zahrňuje 3 osový geomagnetický snímač. Rozmery čipu sú 2x2x1mm čo tento senzor zaraďuje jednoznačne medzi najmenšie senzory magnetického poľa Zeme. Čo sa týka vlastností, tak je ho možné napájať od 2,55V do 3,6V, má v sebe zabudovaný AD prevodník s ktorým je možné merať v časových intervaloch 10ms v každej osy. [8]

3.2.5 Zhrnutie senzorov magnetického poľa Zeme

Táto kapitola nám priblížila pohľad na senzory natočenia využívajúce snímanie intenzity magnetického poľa Zeme. Ako z uvedených informácií vyplýva, tieto senzory sú citlivé na tri aspekty: zmeny okolitej teploty, náklon z rovnovážnej polohy a externé pôsobenie cudzích magnetických polí. Čo sa týka vplyvu teploty, tak tento aspekt je možné za použitia korekčných výpočtov alebo zavedením spätných väzieb silne potlačiť, alebo takmer aj úplne odstrániť a môžeme tak dosiahnuť veľmi dobré výsledky teplotnej stability. O niečo horšie to je, ak musíme vylúčiť vplyv zmeny rovnovážnej meracej polohy. Za použitia snímačov náklonu tzv. inklinometrov, je možné aj tento vplyv potlačiť do určitej miery, a to bežne do $\pm 20^\circ$ alebo výnimočne až do $\pm 60^\circ$ pričom sa tým ovplyvní výsledná cena takéhoto kompasu ktorá sa pohybuje rádovo 10 násobku z ceny nekompenzovaného kompasu. Tretí a zároveň nekompenzovateľný aspekt vplývajúci na presnosť kompasu je vplyv náhodných vonkajších magnetických polí. Príkladom môže byť vplyv kovovej lavičky popri ktorej prechádza robot navigovaný elektronickým kompasom. Kovová lavička spôsobí vychýlenie kompasu svojím zvyškovým magnetickým poľom. Tento vplyv sa nedá za žiadnych okolností vylúčiť a preto je potrebné pri konštrukcii inerciálnej navigácie brať tento aspekt do úvahy.

3.3 GYROSKOPY

V oblasti inerciální navigace prakticky rozdělujeme dva druhy gyroskopův podle principu měření úhlové rychlosti a to na gyroskopy mechanické a gyroskopy optické. Mechanické gyroskopy obsahují tzv. zotrvačnický přístroj optické ne a v tom je jejich hlavní rozdíl. Podrobněji lze gyroskopy rozdělit následovně:

- 1) mechanické gyroskopy:
 - a) S jedním stupněm volnosti
 - b) S dvěma stupni volnosti
 - c) Dynamicky nabitý gyroskopy
 - d) Vibračné gyroskopy
 - e) MEMS gyroskopy využívající Coriolisovu sílu
- 2) optické gyroskopy:
 - a) interferometrické vláknové optické gyroskopy
 - b) laserové gyroskopy (prstencové laserové)
 - c) Pasívně rezonanční gyroskopy

3.3.1 Mechanické gyroskopy

3.3.1.1 Úvod

Přibližná teorie je založena na momentu hybnosti. Časová změna nějaké vektorové veličiny značí v goniometrii, že rychlost jeho koncového bodu a tedy tato rychlost se rovná časové derivaci momentu hybnosti. Jinak můžeme to říci, že při geometrickém znázornění je rychlost koncového bodu momentu hybnosti dána momentem vnějších sil. [3], [12].

$$T = dH/dt \quad (3.5)$$

Kde H je úhlový moment $H = I\omega$

Ak krútiaci účinok na os otáčania je značný, tak sa tým zvýši aj uhlová rýchlosť:

$$T = C d\omega/dt = C\alpha \quad (3.6)$$

Kde C je moment zotrvačnosti na ose otáčania a α je uhlové zrýchlenie

Gyroskopický zákon: Ak je krútiaci moment pravouhlý na objekt otáčania, nemôže sa zmeniť veľkosť vektora úhlovej rýchlosti, ale zmena nastane v smere ako je ukázané na obrázku obr.. Úhlový moment H leží podľa osi otáčania a moment T sa

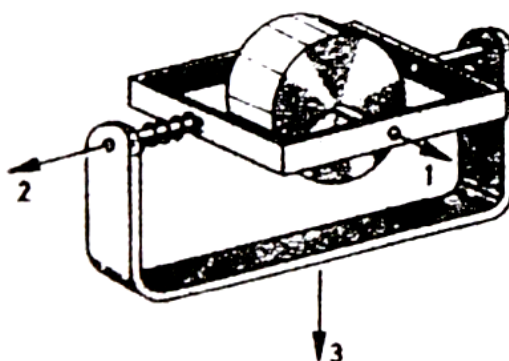
vyskytuje hore, totiž to je pohyb pokúšajúci sa o otočenie kolesa v smere ktorý je pravouhlý závitový, by sa točil, ak by bol posuv vedľa rovnakého smeru ako moment T . Zmena malého uhlového momentu dH je v tom istom smere ako T a jeho veľkosť je: $dH = H d\theta$. Keď tento vzťah spojíme so vzťahom $T = dH/dt$, tak dostaneme gyroskopický zákon:

$$T = H\Omega \quad (3.7)$$

Kde Ω je rýchlosť precesie (precesia je rýchlosť otáčania osy symetrie zotrvačníka voči pevnému smeru v priestore), uhlová rýchlosť kolesa na normálovej ose k rovine krútiaceho momentu T . [3]

3.3.1.2 Mechanické vyhotovenie

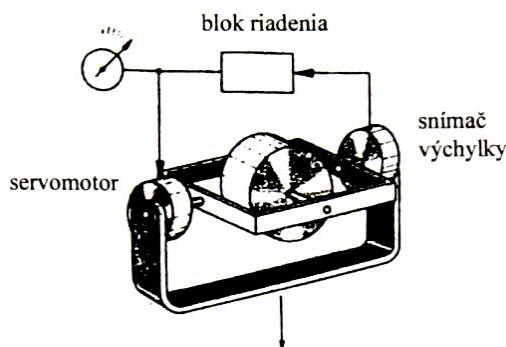
Už z úvodu je vidno, že mechanické prevedenie gyroskopu môže byť s jedným stupňom voľnosti pričom do inerciálnych systémov je potrebné inštalovať až tie tieto systémy, alebo gyroskopy s dvomi stupňami voľnosti si vystačíme s dvomi takýmito gyroskopmi a navyše konštrukcia gyroskopov s dvomi stupňami voľnosti je jednoduchšia ako konštrukcia s dvomi stupňami voľnosti. Pozostáva zo zotrvačníka, rámu a z nosiča – bližšie si to môžeme pozrieť na obrázku 3.14 [3]



Obrázok 3.14 Mechanický gyroskop [3]

Spôsob upevnenia rámu na nosič umožňuje jeho otáčanie okolo vlastnej osi (2) kolmej na os rotácie zotrvačníka (1). Os rotácie nosiča (3) je kolmá na obe predchádzajúce, čím je definovaná pravouhlá sústava so začiatkom v ťažisku zotrvačníka. Pri rotácii zotrvačníka vysokou uhlovou rýchlosťou vyvolá každé pootočenie nosiča okolo svojej osi vychýlenie rámu z jeho rovnovážnej polohy. Veľkosť výchylky úmernej pootočeniu nosiča je buď priamo meraná (napr.

inkrementálními snímači), alebo je korigovaná kompenzačným okruhom gyroskopu obr.3.15. Výstupným signálom takéhoto gyroskopu, je potom prúd alebo napätie indikované v kompenzačnom okruhu. [3]



Obrázok 3.15 Princíp kompenzácie výchylky u gyroskopov s dvomi stupňami voľnosti [3]

Konštrukcia gyroskopov s tromi stupňami voľnosti je zložitejšia. Pozostáva zo zotrvačníka uloženého vo dvojici kardanových rámov, ktoré sú ďalej uložené v nosiči. Z mechanických konštrukcií je jasné, že nie každý typ mechanických gyroskopov je možné použiť v inerciálnych moduloch tak, aby splnil základné požiadavky ktoré sú na ne kladené. Z uvedených typov gyroskopov tieto požiadavky spĺňajú nasledovné typy:

- dynamicky ladený gyroskop DTG
- gyroskopy so zaveseným zotrvačníkom v elektrostatickom poli ESG
- gyroskopy so zotrvačníkom uloženým vo vzduch. vankúši AFG

3.3.1.3 Gyroskopy DTG

Majú tri stupne voľnosti a vyznačujú sa veľkým inerciálnym momentom zotrvačníka ktorý vytvára synchrónny motor. Záves zotrvačníka pozostáva z torzne elastických ale laterálne pevných súčastí, čo umožňuje vychýlenie zotrvačníka vzhľadom na kryt snímača. Elasticita oboch závesov je ad justovaná ta, aby bola rezonančná frekvencia výchylky zotrvačníka ladená zhodne s jej uhlovou rýchlosťou. Uvedeným usporiadaním sa dosiahla veľmi dobrá izolácia zotrvačníka od krytu gyroskopu. Na záznam uhlovej rýchlosti výchylky zotrvačníka voči krytu sa používa dvojsový senzor, ktorého výstupný signál je privedený na dvojsový generátor sily.

Generátor sily kompenzuje výchylku osi zotrvačníka v dvoch smeroch a udržuje tak zotrvačník neustále v rovnovážnej polohe. [3], [4]

Tieto gyroskopy sa vyznačujú vysokou presnosťou a veľmi dobrými úžitkovými vlastnosťami. Ich presnosť sa pohybuje 1 námornej míle za hodinu. V súčasnosti sa ale nepoužívajú aj kvôli ich vysokej cene. [3]

3.3.1.4 Gyroskopy ESG

Ich zotrvačník je zavesený vo vákuu bez fyzického kontaktu na kryt. Senzory detekujúce polohu zotrvačníka sú umiestnené na kryte snímača. Slúžia na určenie zmeny vzájomnej orientácie krytu a osi zotrvačníka, ktorý zachováva svoju orientáciu v inerciálnom priestore. Vzájomná poloha zotrvačníka a krytu sa na začiatku merania inicializuje prostredníctvom tzv. kruhovej cievky umiestnenej v kryte snímača. Nakoľko tieto gyroskopy merajú iba výchylky zotrvačníka z rovnovážnej polohy a nie uhlovú rýchlosť, ktorou táto zmena nastala, nie sú vhodné na výrobu „strapdown“ systémov. Využívajú sa však na výrobu stabilizovaných meracích systémov určených pre aplikácie vyžadujúce vysokú presnosť. Tieto gyroskopy sa vyznačujú vysokými výrobnými nákladmi, náročnou výrobou a preto ich použitie v moderných systémoch je len minimálne. [3], [4]

3.3.1.5 Gyroskopy AFG

Tieto gyroskopy sa v skupine mechanických gyroskopov vyznačujú najdlhšou vývojovou dráhou. Považujú sa za najstaršie skutočne klasické inerciálne navigačné gyroskopy najvyššej presnosti. Pozostávajú z valcovitého hermeticky uzavretého zotrvačníka (často označovaného ako plavák), ktorý je uložený na jemnej osi v kryte taktiež valcovitého tvaru. Priestor medzi krytom a zotrvačníkom je vyplnený vysoko viskóznym médiom, ktorého úlohou je: a) oddelením zotrvačníka od krytu udržať tento v rovnovážnej polohe a súčasne eliminovať kmitanie zotrvačníka. b) tlmiť výchylku osi zotrvačníka vyvolanú zmenou orientácie gyroskopu v priestore. Gyroskopy tohto typu merajú uhlovú rýchlosť relatívnej výchylky krytu voči zotrvačníku, využívajúc pritom princíp gyroskopickej reakcie. Reakcia je vyvolaná viskozitou média a jej veľkosť je úmerná uhlovej rýchlosti relatívnej výchylky.

Veľkosť výchylky je pri tom úmerná integrálu uhlovej rýchlosti. Tieto gyroskopy patria do triedy najpresnejších gyroskopov. [3], [4]

3.3.1.6 HRG gyroskopy

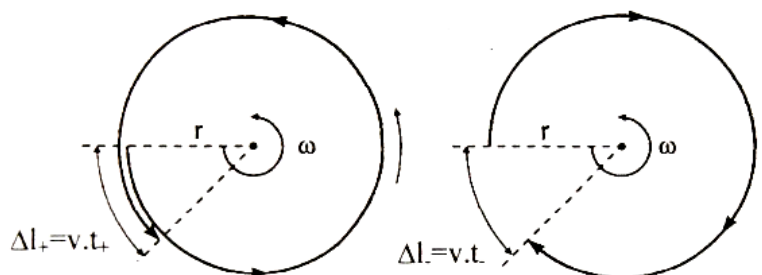
Do štádia výroby malých sérií sa dostala technológia mechanických rezonančných gyroskopov. Tieto gyroskopy vyvíja firma Delco Corporation. Aktívnym prvkom týchto gyroskopov je škrupina sférického tvaru, s dvomi hriadeľovitými ukončeniami. Pôsobením 16 silových elektród, uložených na obrube kómickeho krytu, vykonáva škrupina kmitavý pohyb okolo aktívnej osi snímača. Je dôležité, aby bola amplitúda a rýchlosť tohto kmitania konštantná. Dolná časť škrupiny zakrýva sadu 8 elektród kapacitného senzora polohy, ktorý detekuje polohu škrupiny analyzovaním vibračných vzoriek. Metalická úprava škrupiny musí byť izotropná a uzatvára kapacitný okruh a izoluje výstupný signál gyroskopu od prevádzkových napätí. V snímači je vytvorené vákuum. Vo vákuu sa správa škrupina ako rezonátor s exponenciálne vysokou kapacitou a s rezonančnou frekvenciou 2-9 Hz. Pri rotácii gyroskopu v inerciálnom priestore, vyvolá Coriolisovo zrýchlenie precesie aktívnej osi snímača. Smerové kosínusy týchto precesí určí zabudovaný μP modálnou analýzou na základe vibračných vzoriek detekovaných kapacitným senzorom polohy. Výhoda takýchto gyroskopov je, že neobsahujú žiadny zotrvačník a tým ani žiadne rotujúce mechanické prvky. Ich konštrukcia je nenáročná. Citlivosť snímačov tohto gyroskopu sú korigované softwarovo priamo v μP na základe vloženého matematického modelu. Ďalšie znaky pre tento typ gyroskopu sú nízka cena, vysoká presnosť a malé rozmery. [3], [4]

3.3.2 Optické gyroskopy RLG

Začiatky optických gyroskopov siahajú už niekde na koniec 60-tych rokov. Ich vývoj bol determinovaný hlavne možnosťou ich miniaturizácie a možnosťou navrhovať kompaktné a stabilné konštrukcie. Najčastejšie optické gyroskopy pracujú na princípe Sagnacovho efektu, podľa ktorého je možno z rozdielu dĺžky obežných dráh dvoch svetelných lúčov obiehajúcich protismere po uzavretej kruhovej dráhe, určiť uhlovú rýchlosť rotácie ich obežnej dráhy obr3.16. Pootočením dráhy svetelných lúčov sa čas obehu jedného lúča predĺži a druhého skráti. Rozdiel časov

obehu Δt je funkciou rychlosti svetla vo vákuu c_0 , plochy uzavretej dráhou svetelných lúčov P a uhlovej rýchlosti ω rotácie gyroskopu. [3], [4]

$$\Delta t = \frac{4P}{c_0^2} \omega \quad (3.8)$$



Obrázok 3.16 Princíp Sagnacovho efektu

Fázový posun $\Delta\Phi$ spôsobený pootočením určíme zo vzťahu

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{c_0}{\lambda} \Delta t \quad (3.9)$$

kde λ je vlnová dĺžka použitého svetelného zdroja a po dosadení do rovnice (3.9) a jej úprave dostaneme

$$\Delta\phi = \frac{8\pi P}{c_0 \lambda} \omega \quad (3.10)$$

Respektíve to môžeme napísať s odvodením uhlovej rýchlosti na tvar:

$$\omega = \frac{c_0 \lambda}{8\pi P} \Delta\Phi = \frac{d\phi}{dt} \quad (3.11)$$

Výsledné pootočenie gyroskopu za časový úsek T je nasledovné:

$$\phi_T = \int_0^T \omega dt = \frac{c_0 \lambda}{8\pi P} \int_0^T \Delta\Phi dt \quad (3.12)$$

Použitím optickej dráhy tvaru prstenca vzniká vo vnútri prstenca stojaté vlnenie, nemenné vzhľadom na inerciálny priestor meraní. Detektor spojený s prstencom pri jeho rotácii pozoruje pravidelné striedanie extrémov (maximum a minimum), ktorých rozstup je funkciou vlnovej dĺžky použitého svetelného žiarenia. Frekvencia f striedania extrémov je funkciou vlnovej dĺžky a uhlovej rýchlosti rotácie gyroskopu.

$$f = \frac{2\omega r}{\lambda} = \frac{4P}{l\lambda} \omega \quad (3.13)$$

Počet svetelných extrémov N pozorovaných detektorom za čas T bude nasledovný:

$$N = \int_0^T f dt = \frac{4P}{l\lambda} \int_0^T \omega dt = \frac{4P}{l\lambda} \varphi_T \quad (3.14)$$

Zo vzťahu (3.14) určíme pootočenie prstencového laserového gyroskopu za čas t :

$$\varphi_T = \frac{l\lambda}{4P} N \quad (3.15)$$

V súčasnosti sériovo vyrábané prstencové laserové gyroskopy (RLG Ring Laser Gyro) používajú ako zdroj koherentného žiarenia plynový He-Ne laser umiestnený mimo bloku prstenca. Malé rozmery týchto gyroskopov (cca 100mm), drift menší ako 0,02°/hodinu ich predurčujú najmä na využitie pri stavbe „strapdown“ systémov. Čo sa týka ceny, tak tá nie je zanedbateľná, ale akceptovateľná je aj odberateľmi z civilnej oblasti.

Popri mnohých výhodách majú laserové gyroskopy aj niekoľko nevýhod. Najdôležitejšou je, že pri meraní pomalých rotácií dochádza k veľmi malým fázovým posunom, ktorých dostatočne presné meranie spôsobuje ešte stále nesmierne technické problémy. Uhlové rýchlosti menšie ako 0,2°/s dokonca spôsobujú zablokovanie gyroskopov, tzv. lock-in-efekt. Úplné odstránenie tohto efektu pri laserových gyroskopoch prakticky nie je možné. Zníženie jeho vplyvu je možné uvedením samotného bloku (prstenca) gyroskopu do rotácie s konštantnou uhlovou rýchlosťou, ktorá sa obvykle volí 60°/s. Takéto gyroskopy nesú označenie Zero-Lock alebo ZeroGyro – ZLG. [3]

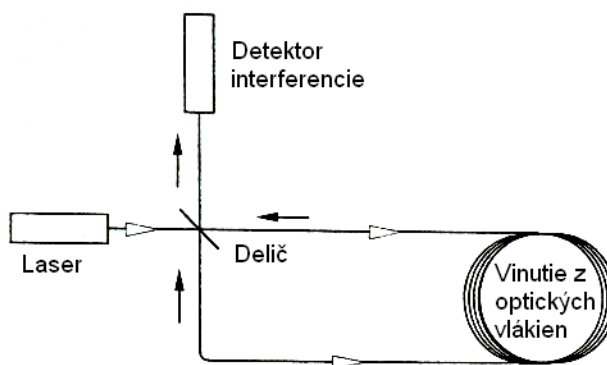
3.3.2.1 Fiber – Optic Gyro FOG

Zdokonalením výroby optických vlákien vznikajú FOG gyroskopy. Podobne ako už spomínané optické gyroskopy RLG, využívajú gyroskopy FOG na určenie uhlovej rýchlosti Sagnacov efekt. Použitie optických vlákien umožňuje mnohonásobne predĺžiť dráhu svetelných lúčov a tak zvýšiť rozlišovaciu schopnosť a presnosť laserových gyroskopov. [3]

Výstupný signál, je lineárny iba v malej limitovanej oblasti meranej veličiny. Gyroskopy merajúce na princípe priameho merania uhlovej rýchlosti sú tak limitované touto oblasťou malých uhlových rýchlostí, nazývajú sa preto aj snímačmi nulových rýchlostí. Ich využitie je značne obmedzené. Preto sa v praxi skôr ako priama veličina meria fázový posun, frekvencia alebo frekvenčný posun prípadne rozdiel frekvencií. [3], [4]

3.3.2.2 IFOG Interferometrické FOG

Tieto gyroskopy využívajú na meranie fázového posunu princíp interferencie svetelných lúčov obr.3.17. Základná schéma týchto snímačov obsahuje zdroj laserového lúča, pripojený na delič, ktorý delí lúč prichádzajúci zo zdroja na dva rovnaké protichodným smerom sa šíriace lúče. Ten istý delič slúži na vytvorenie optického interferenčného optického signálu, ktorý je spracovaný detektorom fázového posunu (interferometrom). Výstupný signál detektora je funkciou fázového posunu a uhlovej rýchlosti. [3]



Obrázok 3.17 Princíp interferenčného laserového gyroskopu [3].

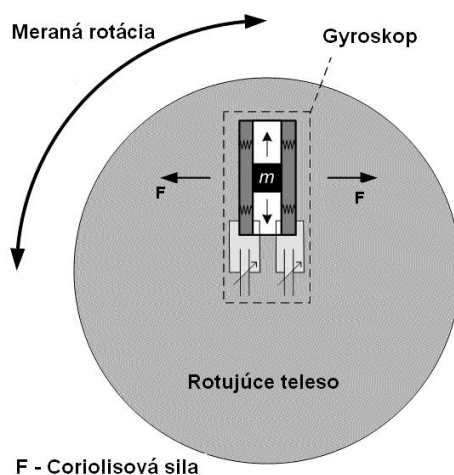
Použitím optických vlákien dĺžky cca 100m sa u gyroskopov tohto typu dosiahne rozlišovacia schopnosť $0,001^\circ/\text{hodinu}$, stredná chyba v určení smeru $\sigma_\varphi < 0,02^\circ/\text{hod.}$ a rozsah merania $\pm 800^\circ/\text{s.}$

3.4 MEMS GYROSKOPY

Týmto gyroskopom venujem samostatnú kapitolu, pretože ako ďalej možno vidieť, celá práca bola venovaná práve týmto gyroskopom a skúmaniu ich využitia v praxi.

Jedná sa o veľmi miniatúrne gyroskopy vyrobené technológiu SMT. Do skupiny mechanických gyroskopov sú zaradené iba z dôvodu, že nevyužívajú optické vlákno a keďže gyroskopy rozdeľujeme na optické a mechanické tak ich práve zaraďujeme k mechanickým gyroskopom. [1], [2]

Skratka MEMS vychádza z „Micro Electro Mechanical Systems“. Čo znamená systémy, v ktorých sú na jednom čipe implementované mikro mechanické štruktúry tvoriace vlastný snímač, s riadiacimi a vyhodnocovacími elektronickými obvodmi. Elektronické časti obvodov sú vytvárané bežnými technológiami ako CMOS alebo Bipolar, mikro mechanické súčasti sú vytvárané vyleptaním, alebo pridaním novej štruktúrálnej vrstvy pre vytvorenie mechanickej súčasti. Gyroskopy vyrábané ako integrované MEMS obvody, pracujú na princípe Coriolisovej sily obr.3.18.



Obrázok 3.18 MEMS Gyroskop využívajúci Coriolisovú silu [2]

Coriolisová sila pôsobí na teleso o hmotnosti m pohybujúci sa rýchlosťou v v sústave rotujúcej okolo osy rotácie uhlovou rýchlosťou ω (3.16). Pri konštantnej rýchlosti predmetu je sila úmerná uhlovej rýchlosti ω , ktorá je predmetom merania.

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \times \omega \quad (3.16)$$

F_C – je výsledná coriolisová síla, [N]

m – hmotnosť telesa na ktoré pôsobí coriolisová síla, [kg]

v – rýchlosť pohybu, [ms^{-1}]

ω – uhlová rýchlosť, [rad s^{-1}]

Tieto snímače väčšinou vedia merať iba v jednom smere - kolmom na plochu čipu (yaw axis). Pre iné smery je nutné zaistiť správne natočenie a umiestnenie súčiastky. Čo sa týka ponuky MEMS gyroskopov na trhu, tak v popredí je niekoľko výrobcov. Najznámejší z nich sú uvedený v tab.1.

Okrem uvedených gyroskopických senzorov možno tiež na trhu zakúpiť aj hotové priemyselné prevedenie – pričom v niektorých prípadoch už aj so zabudovanou elektronikou pre presnejšie meranie. Jednou z takýchto firiem je aj firma GladiatorTechnologies, INC. Táto firma ponúka vysoko kvalitné priemyselné MEMS gyroskopy bez teplotnej závislosti a bez citlivosti na zrýchlenie pôsobiace na gyroskop spolu s nízkou šumovou hodnotou $0,012^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$. Jeho vyhotovenie je zobrazené na nasledujúcom obrázku obr.3.19.



Obrázok 3.19 MEMS Gyro GladiatorTechnologies, INC [17].

Ďalšou firmou ponúkajúcou gyroskopy určené priamo do priemyslu je firma ARROW3i. Podobne ako firma GladiatorTechnologies ponúkajú kvalitné robustné prevedenie s teplotnou kompenzáciou a nízkym šumom obr.3.20



Obrázok 3.20 Gyroskop ARROW3i [17]

3.4.1 Funkčný popis gyroskopov

Ako už na začiatku bolo vysvetlené, MEMS gyroskopy primárne merajú uhlovú rýchlosť natočenia. Nedokážu nejakým iným spôsobom práve merať uhlové natočenie pre ktoré vlastne boli skonštruované. Na to, aby sme dostali z gyroskopu práve takúto informáciu, musíme jeho signál integrovať v spojitnej časovej oblasti (3.17) resp. v diskkrétnej časovej oblasti musíme sčítat' navzorkovaný signál (3.18).

$$\varphi(T) = \int_0^T \omega(t) \cdot dt \quad [^\circ] \quad (3.17)$$

$$\varphi(T) = \sum_{i=0}^T \omega(i) \quad [^\circ] \quad (3.18)$$

V prípade, že by sme uvažovali ideálny gyroskop, tak takto vypočítané uhlové natočenie by bolo správne. Je ale nutné si uvedomiť, že do merania vstupujú rôzne nežiaduce vplyvy, ktoré môžu informáciu získavanú z gyroskopu ovplyvniť. Aj keď týmto bude informácia o uhlovej rýchlosti len minimálne ovplyvnená, je nutné si uvedomiť, že po časovej integrácii približne niekoľko minút, bude výsledné uhlové natočenie nepresné aj niekoľko desiatok stupňov čo je absolútne nežiaduce. Pre príklad uvediem výpočet v Pr.1.

Výrobce	Typ	Meraná osa	Rozsah [°/s]	Výstup	Šum [°/s/√Hz]	Šířka pásma [Hz]	Cena [CZK]
Analog Devices	ADXRS150	z	±150	analog	0,05	40	600
Analog Devices	ADXRS300	z	±300	analog	0,1	40	600
Analog Devices	ADIS16060	z	±80	digital	0,04	1000	700
Analog Devices	ADIS16080	z	±80	digital	0,05	40	700
Analog Devices	ADIS16120	z	±300	digital	0,015	320	12000
Analog Devices	ADIS16130	z	±250	digital	0,0125	300	10100
Analog Devices	ADIS16255	z	±80-300	digital	0,05	50	1100
Analog Devices	ADIS16355	x,y,z	±75-300	digital	0,05	350	7200
Melexis	MLX90609-N2	z	±75	analog/dig	0,03	75	n/a
Melexis	MLX90609-R2	z	±300	analog/dig	0,03	75	n/a
SensoNor	SAR10	z	±250	digital	0,21	50	n/a
Bosh	SGG020	z	±100	analog	0,091	30	n/a
Bosh	SMG040	x	±250	analog	0,38	27	n/a
Bosh	SMG060	x	±240	digital	0,27	30	n/a
Bosh	SMG070	z	±187	digital	0,0065	60	n/a
Systron Donner	QRS11	x	±100	analog	0,01	60	n/a
Systron Donner	QRS100	x	±100	analog	0,0035	60	n/a
Systron Donner	LCG50-00100	x	±100	analog	0,005	50	n/a
Silicon Sensing	CRS03-01S/02	z	±100	analog	0,016	10	n/a
Silicon Sensing	CRS03-05S	z	±80	analog	0,013	10	n/a
Silicon Sensing	CRS10	z	±300	digital	0,12	75	n/a
Epson Toyocom	XV-3500CB	z	±100	analog	n/a	200	n/a
Murata	ENC-03M	z	±300	analog	0,84	50	n/a
Murata	MEV-50A-R	z	±70	analog	0,84	50	n/a
MEMSense	TR0150S050	x,y,z	±150	analog	0,05	50	n/a
MEMSense	TR0300S050	x,y,z	±300	analog	0,05	50	n/a
InvenSense	IDG-300	x,y	±500	analog	0,014	140	n/a
InvenSense	IDG-1000	x,y	±30	analog	0,014	140	n/a

Tabulka 1 Přehled nejvýznamnějších výrobců MEMS Gyroskopů.

Pr.1 Uvažujme, že gyroskop je použitý pri inerciálnej navigácii. Robot stojí na mieste bez pohybu za čas $t = 120\text{s}$. Predpokladaná $\omega = 0,000^\circ/\text{s}$. Vzorkovacia frekvencia je 100 vzorkov za sekundu teda 100Hz. Ak sa prejaví šum + vplyv zmeny teploty + vibrácie tak, že priemerná nameraná $\omega_p = 0,0005^\circ/\text{s}$ tak výsledné uhlové natočenie za čas t bude:

$$\varphi(T) = \sum_{i=0}^T \omega(i) = \sum_0^{120} 0,0005 \cdot 100 \cdot 120 = 6^\circ \quad (3.19)$$

Ako je v (3.19) možno vidieť, aj úplne malá hodnota šumu za pomerne krátky čas dokáže spôsobiť pomerne vysokú nepresnosť v meraní. Aj preto je nutné venovať veľký dôraz na parazitné vplyvy ovplyvňujúce presnosť merania.

V oblasti MEMS snímačov je podľa mojich zistení najvhodnejšie použiť ako filter nameraných hodnôt kalmanov filter, ktorý dokáže z veľkej časti vyriešiť problémy s nepresnosťou nameraných dát. Tejto téme filtrácie sa ale budem venovať v kapitole 4.

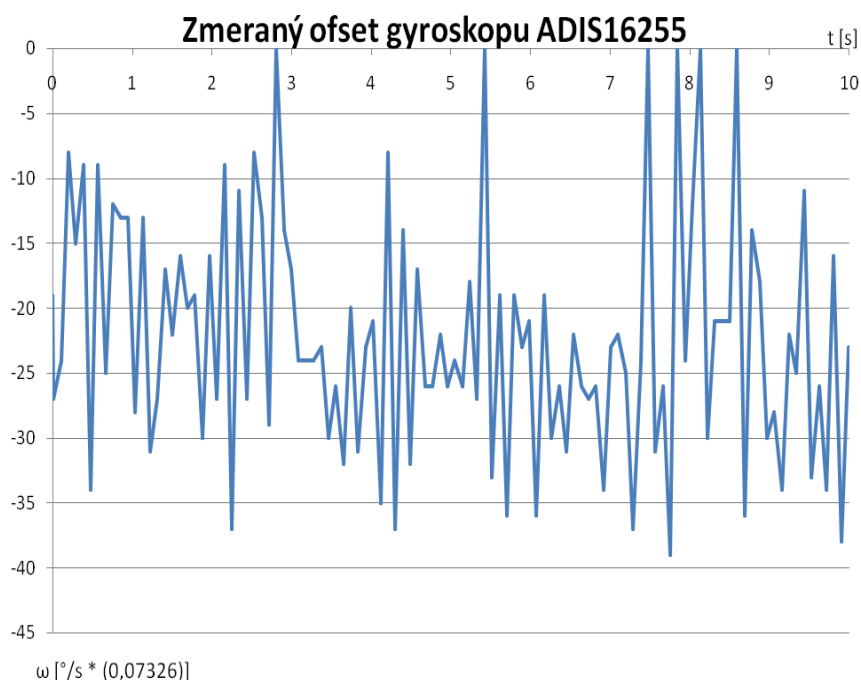
4. PROBLEMATIKA PRESNOSTI MEMS GYROSKOPOV

4.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

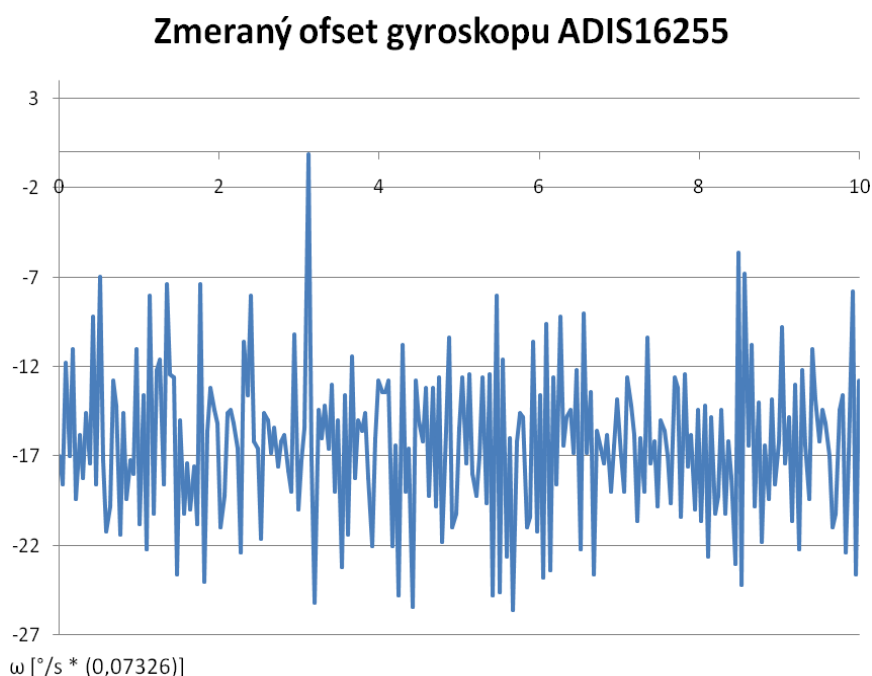
V prípade, že by sme mali ideálny gyroskop, tak získanie uhlového natočenia by sa urobilo jednoduchou integráciou výstupného signálu v čase, pričom pri nulovom výstupnom signáli by bolo jasné, že gyroskop nezaznamenáva žiadne uhlové natočenie. A práve v tomto nastáva ten najväčší problém u MEMS gyroskopov. Zaručenie nulového výstupného signálu pri $\omega = 0^\circ/\text{s}$. Okrem tohto problému sa stretávame aj nelinearitou či teplotnou závislosťou a iných parazitných vplyvoch. V predchádzajúcich kapitolách som stručne naznačil problematiku offsetu a iných negatívnych vplyvoch na MEMS gyroskop, no v tejto časti sa pokúsím čo najprírsnejšie zhrnúť tieto problémy s možným návrhom riešenia ich čo najmenšieho vplyvu na meranie.

4.2 OFFSET GYROSKOPU

Offset podľa môjho názoru má na presnosť gyroskopu ADIS16255 (ďalej bude vysvetlené, že sa jedná o vybraný gyroskop k tejto diplomovej práci) najväčší vplyv. Korekcia chyby offsetu v skutočnosti prebieha takým spôsobom, že si zmeriame pri $\omega = 0^\circ/\text{s}$ výstupnú hodnotu gyroskopu a túto nameranú hodnotu zapíšeme do príslušného registra gyroskopu, (ktorý bude popísaný neskôr) a ten automaticky od každej nameranej hodnoty túto hodnotu offsetu odpočíta. Nakoľko každý gyroskop má vlastný offset spôsobený svojimi mechanickými nepresnosťami a vlastnosťami okolitého prostredia (atmosférický tlak, teplota okolia a vlhkosť okolia), je nutné pre každý gyroskop zvlášť vykonať meranie tohto offsetu. Na obrázku 4.1 je možné vidieť zmeraný offset v čase $t = 10 \text{ s}$ a so vzorkovaním $T = 93 \text{ ms}$. Ako je vidno, offset sa mení naozaj náhodne v intervale určitých hodnôt a to ani nevzorkujeme naozaj rýchlou frekvenciou. Keď sa pozrieme na obr. 4.2 na ktorom je tak isto vzorkovaný offset, ale s periódou vzorkovania $T = 42 \text{ ms}$ v čase $t = 10 \text{ s}$.



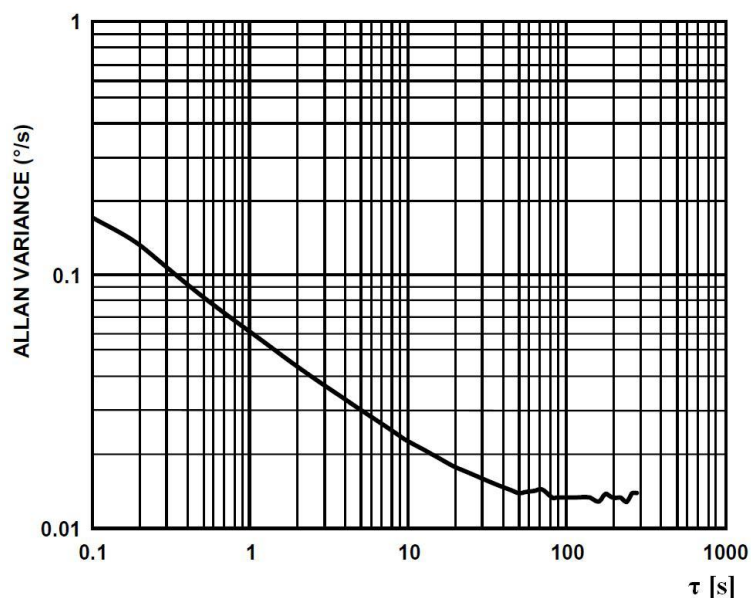
Obrázok 4.1 Nameraný ofset vzorkovaný v intervale $T = 93ms$



Obrázok 4.2 Nameraný ofset vzorkovaný v intervale $T = 42ms$

Ako je u vedených dvoch grafických znázornení ofsetu vidieť, je potrebné vzorkovať dáta z gyroskopu čo najvyššou možnou rýchlosťou, aby do výpočtu ofsetu

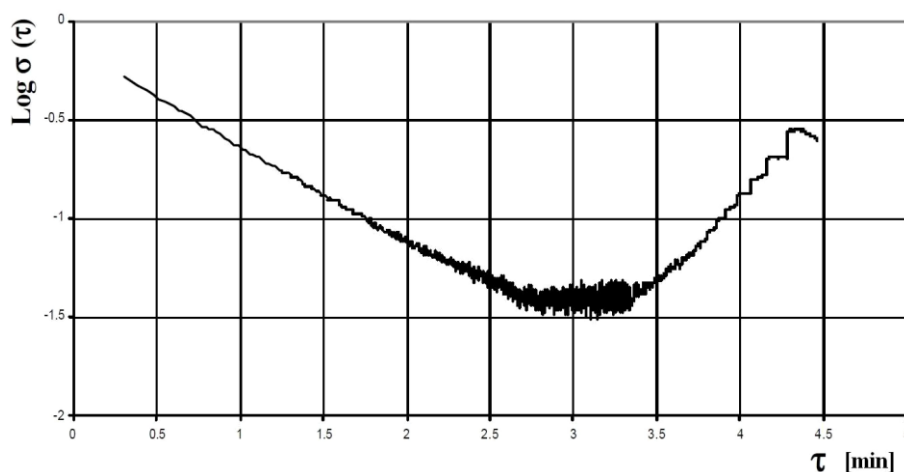
gyroskopu sme mohli zaznamenať každú možnú hodnotu a tým zvýšili čo najviac presnosť merania. Z uvedeného vyplýva, že je potrebné vypočítať strednú hodnotu offsetu počas určitého času vzorkovania. Otázne ale je, aký dlhý čas merania offsetu zvoliť, alebo, či čas vzorkovania má podstatný vplyv na presnosť vypočítaného výsledného offsetu. Odpoveď znie áno, dĺžka trvania vzorkovania offsetu pre jeho výpočet priemernej hodnoty je podstatná pre výslednú presnosť určenia offsetu. O tom, aký má byť tento čas, hovorí tzv. Allanova odchýlka, alebo Allan Variance. Ide o metódu analýzy sekvencie vzorkov v čase, pre čo najlepšie odstránenie vplyvu šumu na hľadajú priemernú hodnotu sekvencie. Ide o rozdelenie skúmanej sekvencie na intervaly rovnakej dĺžky. V každom intervale sa vypočíta stredná hodnota. Potom vypočítame kvadráty odchýlok dvoch susedných intervalov. Výsledok je podelený normalizačným koeficientom. Keďže pre náš gyroskop ADIS16255 už výrobca tento výpočet urobil, je možné vidieť výsledný graf Allan Variance na obr.4.3. [27]



Obrázok 4.3 Grafické znázornenie Allanovej odchýlky [13]

Z obr.4.3 logický vyplýva, že so vzrastajúcim intervalom pozorovania sa blíži vplyv zašumenia strednej hodnoty k nule. Tento predpoklad ale neplatí pre čas idúci k nekonečnu, ale končí v mieste grafu, kde je hodnota Allanovej odchýlky najnižšia, pretože v určitom bode (nie je na grafe dostatočne vidieť) začne Allanova odchýlka opäť rásť. Vidieť to môžeme na ďalšom obrázku 4.4, ktorý pochádza z iného merania ale dostatočne poukazuje na tento fakt. Tento opätovný nárast je spôsobovaný

vlastnou nestabilitou výstupu senzoru označovanou ako „rate random walk“. Pre náš gyroskop je práve vhodné merať ofset v čase 300s (vyplýva to z obr.4.3). [27]



Obrázok 4.4 Příklad, kedy po určitom čase opäť môže začať rásť Allanova odchýlka [33]

4.3 ARW – ANGLE RANDOM WALK

ARW je charakteristika šumu, popisujúca vplyv šumu v signáli gyroskopu na jeho integráciu v čase. Je udávané v $^{\circ}/\sqrt{hr}$. Vyjadruje teda, akú smerodатnú odchýlku nadobúdajú dáta po časovej integrácii v čase $t = 1h$. Výrobca udáva hodnotu pre gyroskop ADIS16255 $3,6^{\circ}/\sqrt{hr}$ pri stálej teplote okolia $\vartheta = 25^{\circ}C$.

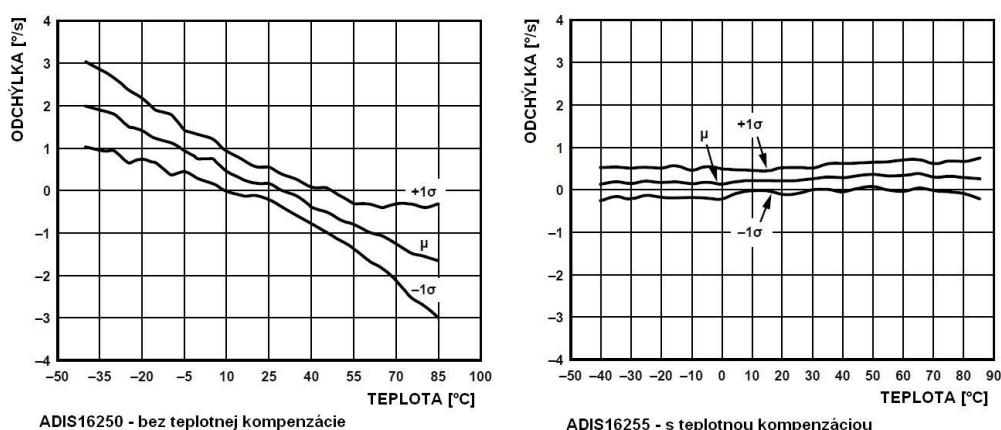
Túto chybu je možné kompenzovať jedine v prípade, ak použijeme navyše na meranie uhlu natočenia inú metódu. [27]

4.4 TEPLOTNÁ ZÁVISLOSŤ

Teplota okolia a teplota samotného čipu majú veľmi veľký vplyv na zmenu ofsetu gyroskopu. Keď som v kapitole 4.1 opisoval zisťovanie ofsetu s použitím metódy Allanovej odchýlky, tak uvedený postup platí pri zachovaní stálej teploty okolia a čipu. Toto však nie je možné. Je preto nutné, pozrieť sa bližšie na vplyv teploty na ofset gyroskopu.

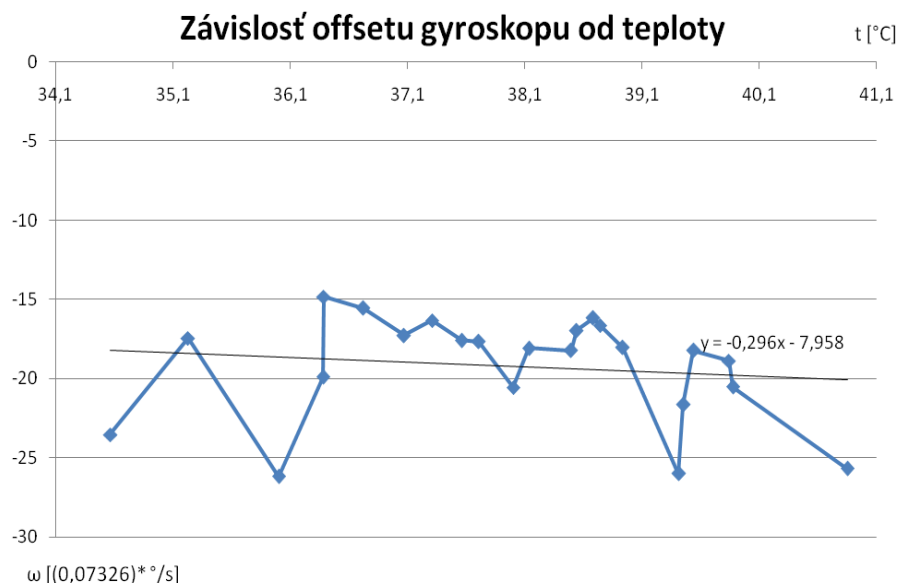
Vybraný gyroskop ADIS16255 bol vybraný mimo iného aj z toho dôvodu, že má v sebe zabudovanú okrem iného aj teplotnú kompenzáciu. Ak sa ale pozrieme detailne na katalógový list, tak zistíme, že to nie je až tak pravda. Gyroskop síce

kompenzovaný na zmenu teploty je, ale nie až v takom rozsahu akoby sme si želali. Konkrétne je to $0,005^{\circ}/s/^{\circ}C$, pričom keď si to porovnáme s gyroskopom ktorý nie je teplotne kompenzovaný a zmena teploty má na neho veľmi podstatný vplyv tak je to hodnota $0,03^{\circ}/s/^{\circ}C$ (ADIS16250). [36] Keď si to zobrazíme na grafoch, tak to vyzerá celkom prijateľne pre náš gyroskop ADIS16255 vid'. obr.4.5.



Obrázok 4.5 Grafické znázornenie teplotných závislostí pre kompenzovaný a nekompenzovaný gyroskop [13]

Teraz v nasledujúcom obrázku zobrazím grafické znázornenie závislosti zmeny teploty čipu gyroskopu a offsetu na jeho výstupe.



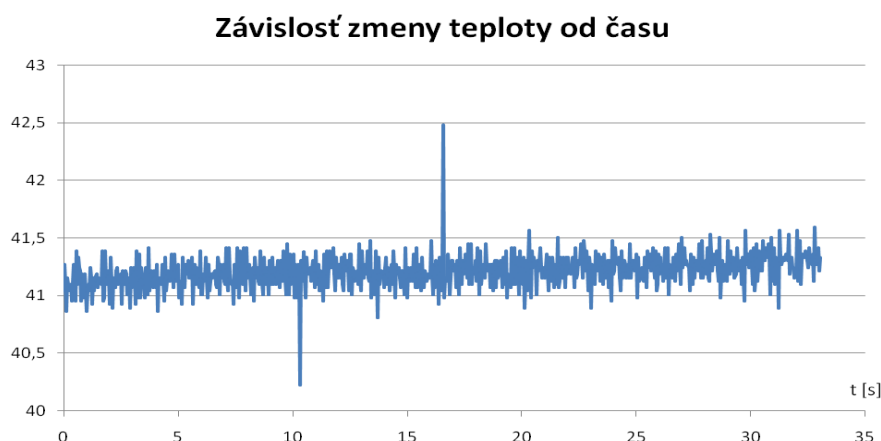
Obrázok 4.6 Závislosť zmeny teploty na zmene offsetu.

Na obrázku 4.6 vidíme skutočnú zmenu offsetu v závislosti na zmene teploty na čipe v rozsahu od $34,6^{\circ}\text{C}$ do 41°C . Vynesené hodnoty offsetu iba podotýkam, že sú vlastne priemerné hodnoty offsetu v určitom časovom intervale. Ako je na danej závislosti možné vidieť, zmenou teploty v uvedenom rozsahu sa zmenila aj stredná hodnota offsetu v rozsahu od $-1,31868^{\circ}/\text{s}$ do $-1,4652^{\circ}/\text{s}$. Táto zmena strednej hodnoty offsetu ale vyvolá počas integrácie výstupného signálu chybu $8,7^{\circ}$ v čase integrovania 1 minúta a to je naozaj relatívne veľká chyba.

Z uvedeného vyplýva nasledovné:

- Pred začiatkom merania offsetu je vhodné vyčkať približne 2 minúty na ustálenie teploty na čipe gyroskopu (počas nábehu na pracovnú teplotu je snímač veľmi citlivý na zmeny teploty).
- Po ustálení teploty meriame offset v čase 300s a vyhodnotíme jeho strednú hodnotu.
- Je potrebné dôkladne analyzovať vplyv teploty na offset gyroskopu a na základe získaných hodnôt vytvoriť matematickú korekciu nameraných hodnôt priamo v MCU.

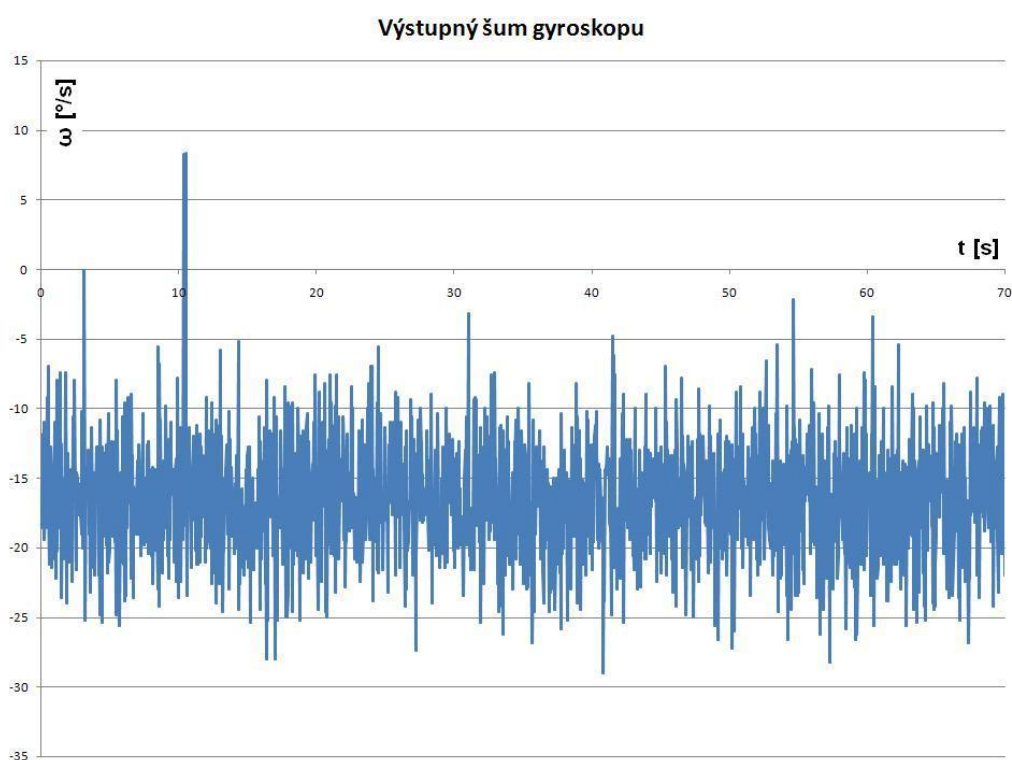
Na ďalšom obrázku už môžeme vidieť ako minimálne sa mení teplota na čipe gyroskopu po uplynutí času približne 10 minút. Iba podotýkam, že malý viditeľný rastúci trend teploty v čase je po dobe 10min naozaj ustálený a jeho prípadne zvýšenie je iba dôsledok zvýšenia okolitej teploty, alebo v dôsledku prenosu tepelnej straty zo stabilizátora napájacieho napätia na gyroskop.



Obrázok 4.7 Zmena teploty po uplynutí času 10min.

4.5 METÓDY FILTRÁCIE VÝSTUPNÉHO SIGNÁLU

Okrem opísaných parazitných vplyvov je ešte na záver nutné si pripomenúť, že nestačí iba eliminovať parazitné vplyvy, ale je nutné zvoliť tiež metódu filtrovania (určenia) výstupnej hodnoty signálu v danom časovom okamžiku, nakoľko výstupný signál je silno zašumený.



Obrázok 4.8 Grafické znázornenie šumu na výstupe gyroskopu

Nakoľko sa jedná takmer o biely šum – jeho smerodajná odchýlka je podľa výrobcu $0,48^\circ/\text{s rms}$, tak by sa možno zdalo jednoduché použiť obyčajné priemerovanie na dosiahnutie skutočnej hodnoty. Možnosti filtrácie si uvedieme v nasledujúcej kapitole.

4.5.1 Priemerovanie

Túto metódu možno zaradiť medzi najjednoduchšie metódy k odstráneniu vplyvu bieleho šumu na meraný signál. Je dôležité ale povedať, že tento spôsob odstránenia bieleho šumu je vhodný iba pre prípad, že sa meraná veličina nemení, zostáva konštantná (meranie offsetu pri nulovej uhlovej rýchlosti). Matematické vyjadrenie je ukázané na rovnici (4.1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

$\bar{x}$ - je výsledný aritmetický priemer

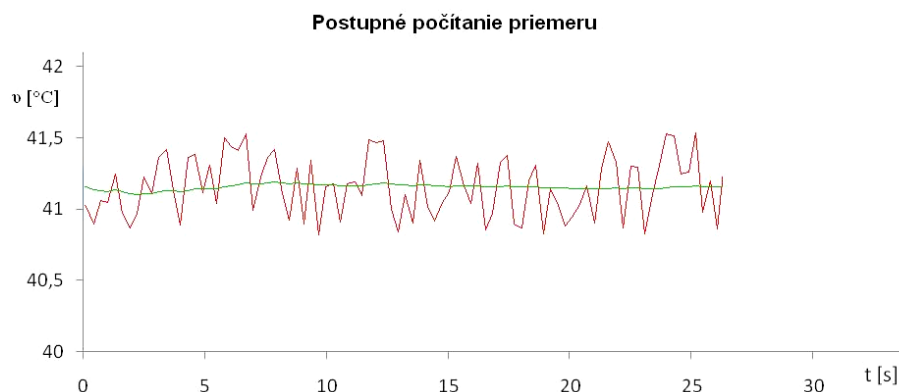
n – počet nameraných vzorkov

x_i – samotný vzorok

Logický z tohto zápisu vyplýva, že aritmetický priemer takýmto spôsobom možno počítat, iba ak v SRAM pamäti MCU máme dostatočne veľkú pamäť pre uloženie všetkých nameraných hodnôt. Tento fakt neprichádza do úvahy nakoľko jednoduché 8bit MCU majú vnútornú pamäť SRAM maximálne niekoľko kB. Je teda nutné upraviť (4.1) tak, aby sme priemer mohli počítat postupne. [32]

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} + \frac{1}{n} \cdot (y_n - \bar{x}_{n-1}) \quad (4.2)$$

Takéto postupné počítanie priemeru nám názorne popisuje výpočet priemeru v kroku n ako úpravu priemeru z kroku n-1 určitým korelačným členom skladajúcim sa z dvoch častí: z váhy, ktorú predstavuje člen $1/n$ a z druhej časti, ktorú predstavuje rozdiel nového merania a pôvodného priemeru. Odchýlka nového merania od pôvodného priemeru je teda základom pre získanie priemeru nového. Čím viac meraní už máme v priemere integrovaných, tým menší má táto odchýlka vplyv. Rekurzívnym výpočtom priemeru sme sa síce zbavili nutnosti pamätať si všetky doposiaľ získané dáta a môžeme postupne integrovať nové merania, ale stále odhadujeme iba konštantnú veličinu. Ak toto znázorníme v grafe, obr.4.9 tak vidíme, že vlastne sa snažíme nameranými dátami preložiť vodorovnú priamku



Obrázok 4.9 Postupné počítanie priemeru [32]

4.5.2 Priemerovanie pre pomaly meniacu sa hodnotu

Predchádzajúca metóda priemerovania (preloženie nameraných hodnôt priamkou) by nám v prípade meniacej sa hodnoty nepomohlo. Musíme teda zvoliť inú metódu. Riešením takéhoto prípadu je použitie *plávajúceho priemeru*.

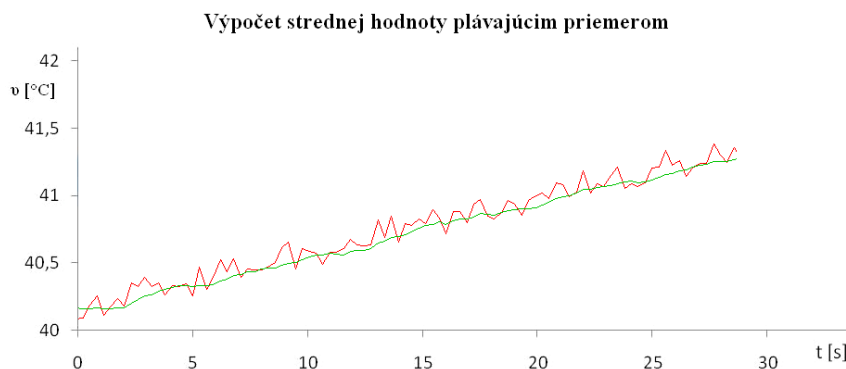
Plávajúci priemer je vlastne priemer z niekoľko posledných nameraných hodnôt. Rekurzívnym zápisom výpočtu plávajúceho priemeru tiež možno dosiahnuť, aby zložitosť výpočtu nezávisela od dĺžky priemerovacieho okna a to nasledovne:

$$\overline{x}_n = \frac{(\overline{x}_{n-1} \cdot k - y_{n-1} + y_n)}{k} \quad (4.3)$$

V tomto vzťahu reprezentuje člen $\overline{x}_{n-1} \cdot k$ súčet posledných k meraní. V ďalšom kroku od tohto súčtu teda odčítame najstaršie meranie. V ďalšom kroku od tohto súčtu teda odčítame najstaršie meranie x_{n-k} a naopak pripočítame nové meranie x_n , čím získame súčet posledných k meraní. Vydelením hodnotou k teda získame priemer z posledných k meraní. Aj tento uvedený výpočet 4.3 si môžeme prepísať ako súčet posledného priemeru a určitej korekcie a to nasledovne:

$$\overline{x}_n = \overline{x}_{n-1} + \frac{1}{k} \cdot (y_n - y_{n-k}) \quad (4.4)$$

Váha určujúca vplyv korekčnej zložky je teraz konštantná a odpovedá prevrátenej hodnote dĺžky priemerovacieho okna. Veľkosť korekcie je daná rozdielom najnovšieho a najstaršieho merania. Plávajúci priemer teda prekladá vodorovnou priamkou poslednými k meraniami obr.4.10. Rekurzívnym výpočtom 4.4 sme opäť dostali konštantnú zložitosť výpočtu.



Obrázok 4.10 Príklad filtrácie s použitím plávajúceho priemeru pre $k = 8$ [32]

4.5.3 Odhad plávajícího priemeru

Pokiaľ si nechceme pamätať resp. nemáme na to v mikrokontroléri dostatok voľnej pamäti, musíme sa nejakým spôsobom pokúsiť tieto dáta niečím nahradiť teda nejakým spôsobom ich odhadnúť. Najlepším odhadom najstaršieho merania, ktoré by sme chceli z výpočtu odstrániť, je posledná hodnota priemeru. Miesto vlastného merania, teda odčítame posledný priemer. Úpravou 4.5 teda dostaneme nasledovné:

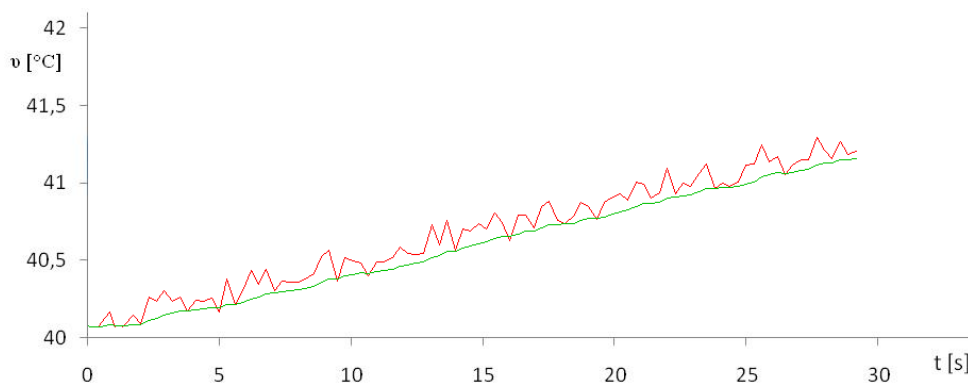
$$\overline{x}_n = \frac{(\overline{x}_{n-1} \cdot k - \overline{x}_{n-1} + y_n)}{k} \quad (4.5)$$

A pre upravený vzorec z 4.5 platí zase nasledovný zápis:

$$\overline{x}_n = \overline{x}_{n-1} + \frac{1}{k} \cdot (y_n - \overline{x}_{n-1}) \quad (4.6)$$

Touto úpravou získame jednoduché, rýchle a praktické riešenie, ktoré bude vo väčšine prípadov dostačujúce. Popisované riešenie sa niekedy nazýva aj priemerovanie s exponenciálnym zabúdaním, pretože výsledná hodnota obsahuje napríklad aj naše prvé meranie y_0 . Jeho váha je však $\left(\frac{k-1}{k}\right)^n$ a teda exponenciálne klesá. Graficky si tento spôsob výpočtu možno pozrieť na obr.4.11 kde bol opäť spôsob výpočtu aplikovaný na zmenu teploty v čase $t = 30s$ na čipe gyroskopu.

Výpočet strednej hodnoty s odhadom plávajúceho filtra

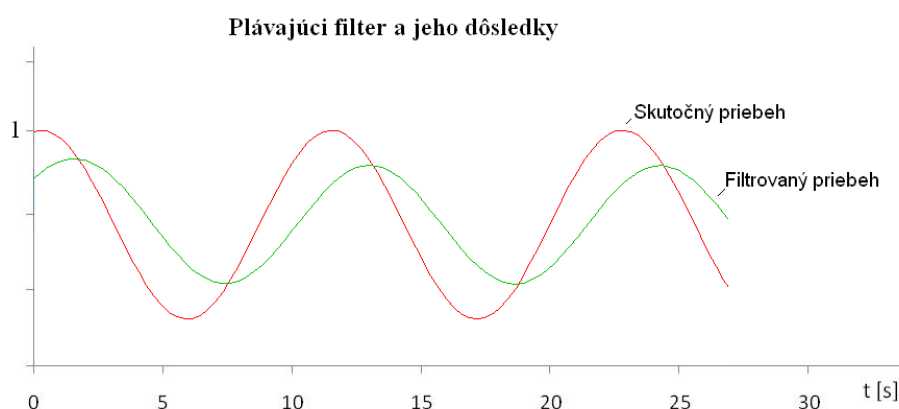


Obrázok 4.11 Použitý odhad plávajúceho filtra s $k = 8$ [32]

4.5.4 Filtrovanie rýchlo meniacej sa hodnoty

Zatiaľ všetky uvedené možnosti filtrácie boli ukázané na konkrétnej zmene teploty na čipe gyroskopu a teda na hodnote, ktorá sa v čase buď nemenila, ale sa

menila len pomaly a nie skokovo. Použité metódy by neboli príliš vhodné pre filtrovanie výstupu gyroskopu, i keď posledný spôsob (plávajúci filter) by ešte bolo možné aplikovať. Teraz si ale skúsime vysvetliť ďalšiu možnosť filtrácie signálu ktorá počíta s možnou rýchlou zmenou výstupnej hodnoty. V prípade, že by sme sa ale rozhodli pre rýchlo meniacu sa hodnotu použiť plávajúci filter, tak musíme počítať so skutočnosťou, že priemerovaná hodnota bude v skutočnosti zaostávať „plávať“ za skutočnou hodnotou a navyše nám bude zaobľovať špičky obr.4.12.



Obrázok 4.12 Dôsledok použitia plávajúceho filtra [32]

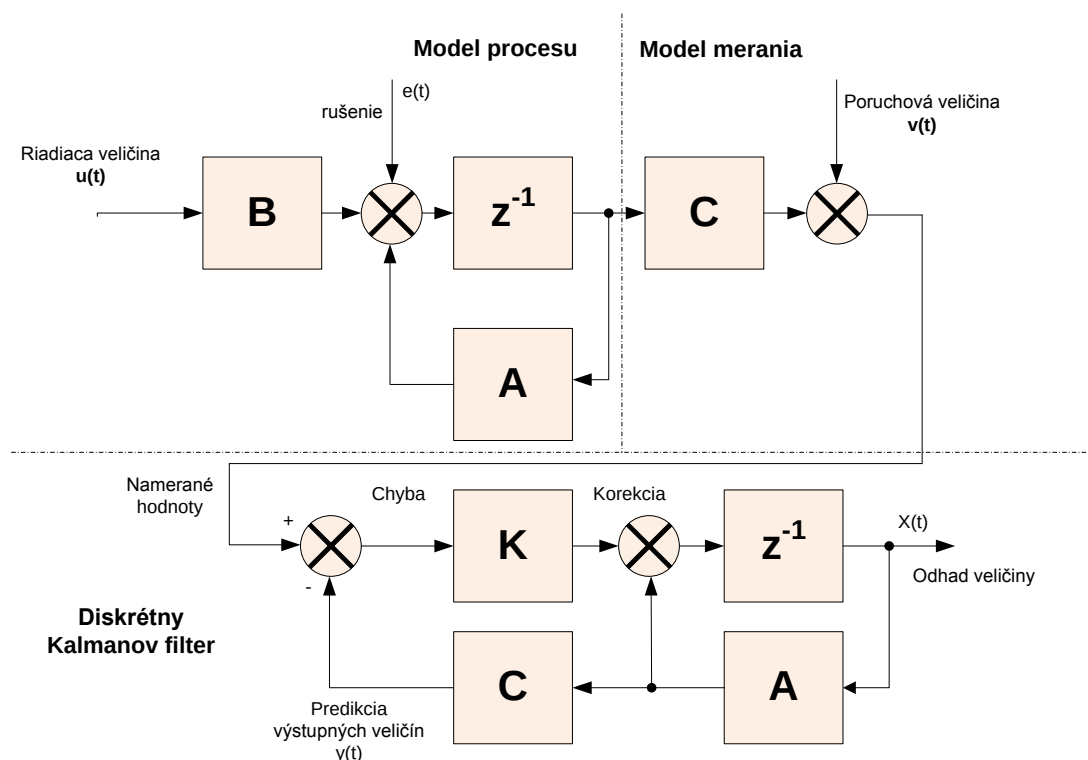
Toto chovanie je spôsobené jedným predpokladom, ktorý je v plávajúcom priemery schovaný a to je, že hodnota je v rámci priemerovacieho okna konštantná. Pokiaľ ale máme signál, ktorý sa v rámci priemerovacieho okna výrazne zmení, dôjde k zmieňovanej degradácii – teda k strate informácie.

Kľúčom k riešeniu tohto problému je použitie zložitejšieho modelu chovania a to napríklad tak, že namiesto konštantnej budeme očakávať hodnotu lineárne sa meniacu – namiesto jedného parametru teda odhadovať dva parametre „a“ a „b“ $y = ax+b$. Riešením tohto nášho problému by mohlo byť použitie kalmanového filtra.

4.5.5 Kalmanov filter

Je jedným z najvýznamnejších algoritmov pre filtráciu je odhad stavových veličín na základe informácie o vstupoch, výstupoch, nemerateľných poruchách, šumoch merania a modelu systému. Jedná sa o pozorovateľov stavu stochastického systému, kde stochastickou časťou rozumieme rozšírenie deterministického modelu o šum procesu a šum merania. Základný predpoklad je, že oba šумы budú biele.

Potom sa jedná o stredne kvadratický odhad stavových veličín. Celý proces kalmanového filtru možno popísať obrázkom 4.13.



Obrázok 4.13 Súvislosť medzi kalmanovým filtrom a modelom systému

Ešte je potrebné vysvetliť, že matice A , B , C sú známe matice systému, ktorý tiež vieme popísať nasledujúcou rovnicou:

$$x(t-1) = Ax(t) + Bu(t) + v(t) \quad (4.7)$$

$x(t)$ – stavová veličina

$u(t)$ – riadiaca veličina

$y(t)$ – výstupná veličina

$v(t)$, $e(t)$ – poruchové veličiny – nekorelované diskkrétne biele šумы s kovariančnými maticami Q a R definovanými:

$$\left\{ \begin{bmatrix} v(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Cieľom je predikcia postupnosti odhadov stavov $x(t)$ a odpovedajúce postupnosti kovariančných matic chýb odhadu:

$$P(t) = E \begin{bmatrix} x(t) - \hat{x}(t) & x(t) - \hat{x}(t) \end{bmatrix}^T \quad (4.9)$$

V aplikáciách meracej techniky predstavuje $x(t)$ priamym meraním ťažko zistiteľnú hodnotu meranej veličiny. Predikčnú povahu kalmanovej filtrácie najlepšie vyjadruje vzťah pre odhad nasledujúcich stavov $x(t)$ z predchádzajúcich na základe merania (odhad a posterioria)

$$\hat{x}(t|t) = \hat{x}(t|t-1) + K(t)A^{-1}[y(t) - \hat{y}(t|t-1)] \quad (4.10)$$

$$K(t) = AP(t|t-1)C^T[CP(t|t-1)C^T + R]^{-1} \quad (4.11)$$

Kde $K(t)$ je kalmanové zosilnenie.

Nakoľko pre predikciu hodnoty kovariančnej matice chyby odhadu na základe jej hodnoty v predchádzajúcom kroku platí

$$P(t+1|t) = AP(t|t)A^T + Q \quad (4.12)$$

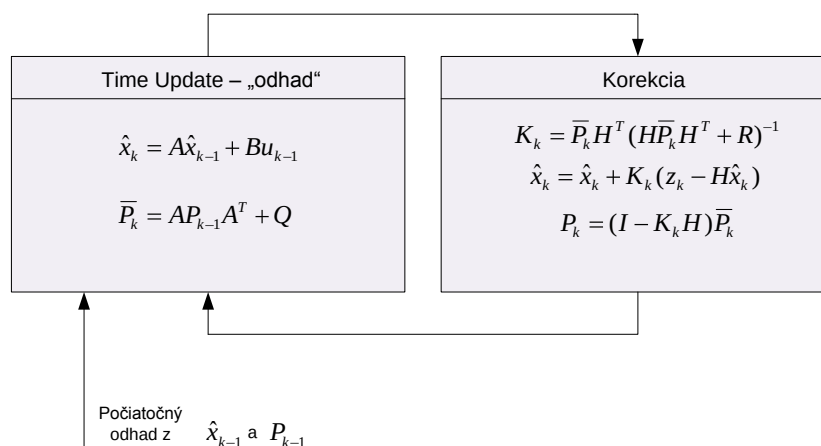
Možno ukázať, že kalmanovo zosilnenie v štatisticky ustálenom stave je úmerné pomeru kovariančných matíc Q a R t.j.

$$K(t) = AP(t|t-1)C^T[CP(t|t-1)C^T + R] \approx QR^{-1} \quad (4.13)$$

Vývoj kovariančnej matice chyby odhadu je určený Riccatiho rovnicou:

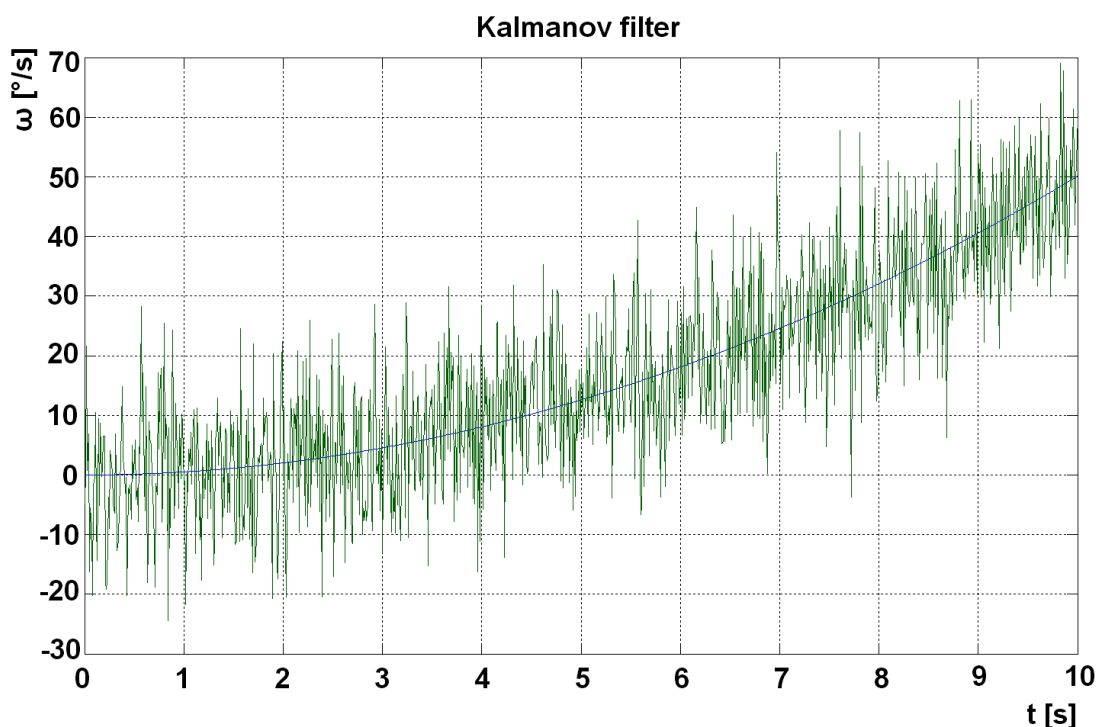
$$P(t+1|t) = AP(t|t-1)A^T - K(t)[C^TP(t|t-1)C + R]K(t)^T + Q \quad (4.14)$$

Iné jednoduchšie vyjadrenie fungovania kalmanového filtra môžeme vidieť na obr.4.14 kde jednoducho na vývojovom grafe je naznačený odhad meranej veličiny a následne jej korekcia.



Obrázok 4.14 Iný spôsob vyjadrenia kalmanového filtra

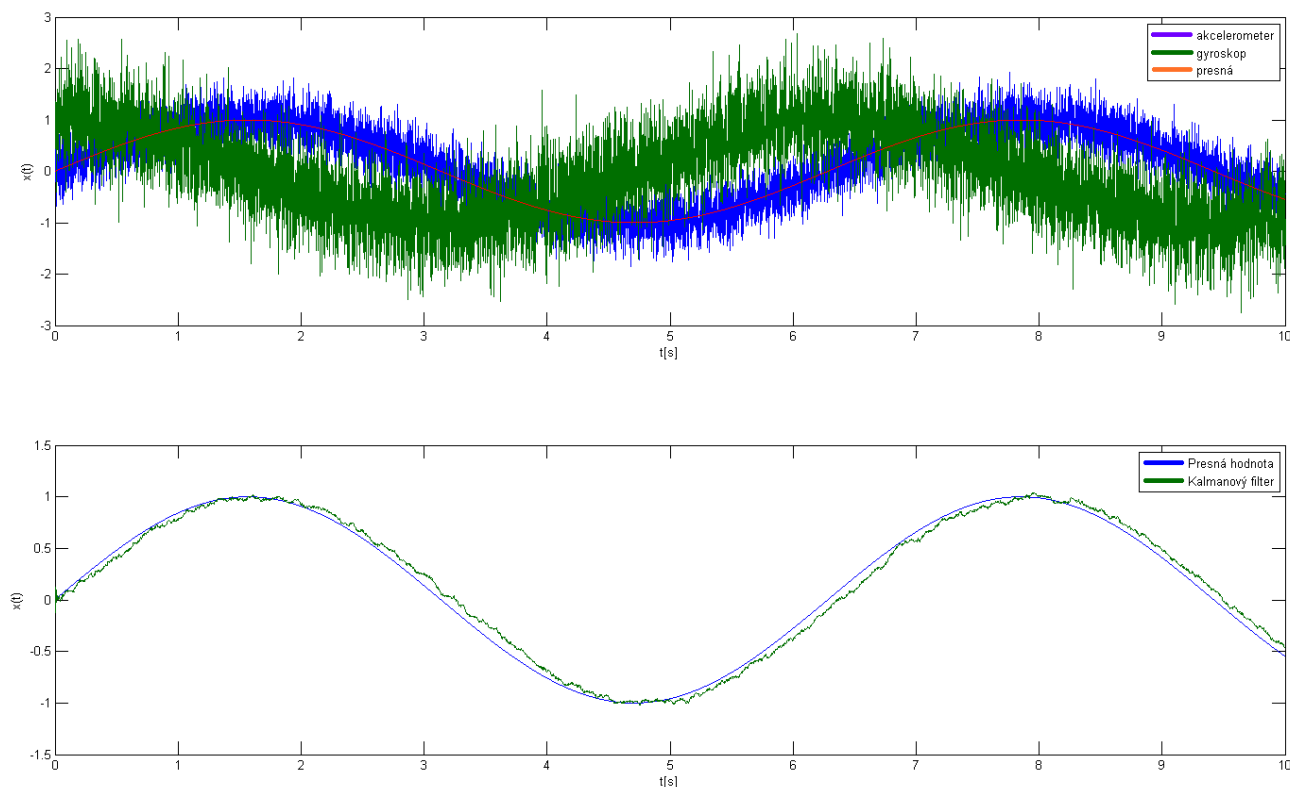
Keď si prevedieme obr.4.14 na jednoduchú simuláciu v matlabe (súbor priložený ako príloha), možno presne vidieť, ako sa správa kalmanov filter pri vstupnom balíku zašumených dát, ktoré boli generované pomocou funkcie random v matlabe a majú rastúci (meniaci sa) charakter



Obrázok 4.15 Aplikovanie kalmanového filteru na biely šum

Na obrázku 4.15 vidíme zelenou farbou meranú veličinu silne zašumenú bielym šumom a modrý priebeh vyfiltrovaná meraná veličina.

Kalmanov filter ale možno použiť aj trochu upraveným spôsobom. Ak máme informáciu o uhlovom natočení napríklad z dvoch zdrojov – akcelerometre a gyroskop, potom môžeme s použitím kalmanovho filteru vytvoriť fúziu týchto dát a zároveň ich aj filtrovať. Tento princíp vytvorený v m-file som našiel v [22]. Po jeho úprave a implementácii do MCU som sa ale rozhodol, že nebudem v MCU používať kalmanov filter z dôvodu nutného pomalého vzorkovania signálu, nakoľko kalmanov filter spôsobuje značne dlhé čakanie počas jeho výpočtu. Avšak v zdrojovom programe som ho za komentovaný ponechal. Na obrázku 4.16 je možné vidieť ako tento filter s funkciou fúzie dát pracuje.



Obrázok 4.16 Fúzia dvoch meraných veličín pomocou kalmanovho filtru

4.6 ZHRNUTIE

V tejto kapitole som podrobne rozobral spôsoby filtrácie nameraných údajov a minimalizáciu negatívnych vplyvov na gyroskop. Z uvedeného vyplýva, že pre klasický 8bit MCU môžeme použiť bez problémov plávajúci filter pre filtráciu šumu na výstupe gyroskopu. V prípade, ak nám stačí nižšia vzorkovacia frekvencia približne 50ms, tak môžeme použiť na takúto filtráciu kalmanov filter. Okrem toho je potrebné zdôrazniť, že pre každý iný typ gyroskopu je nutné urobiť dôkladnú analýzu nameraných údajov a potom vytvoriť vhodný spôsob korekcie dát. Všetky uvedené grafy a analýzy boli vytvorené prostredníctvom gyroskopu ADIS16255.

5. NÁVRH MERACIEHO SYSTÉMU PRE MERANIE UHLOVÉHO NATOČENIA

5.1 ÚVOD K NÁVRHU MERACEJ PLATFORMY

V predchádzajúcich kapitolách som uviedol spôsoby merania uhlového natočenia v rôznych osách. V tejto kapitole zhrniem návrh meracej platformy pre meranie uhlových natočení s použitím rôznych metód, pričom sa detailnejšie budem zaoberať návrhom merania s využitím MEMS gyroskopu.

Najskôr v nasledujúcich kapitolách bude popísaný výber snímačov a následne celá HW aj SW konštrukcia.

Výsledný produkt, ako vyplýva zo zadania diplomovej práce je schopný v reálnom čase s určitou vzorkovacou periódou poskytovať na výstupe informáciu o uhlovom natočení s určitou časovou stálosťou.

5.2 VOĽBA SNÍMAČOV

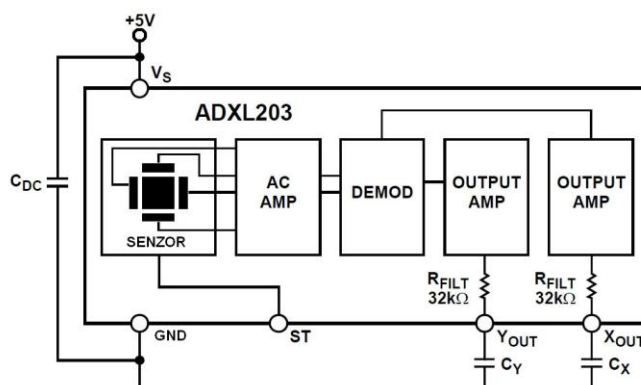
Zaoberať sa budem so signálmi zo snímačov magnetometra, akcelerometru a gyroskopu. Magnetometer a akcelerometer som použil pre názornosť a porovnanie s gyroskopom.

5.2.1 Akcelerometer

Použité akcelerometru ako snímač náklonu už bolo v úvode popísané. Princíp priamo vychádza zo statického merania zložiek gravitačného zrýchlenia a následného výpočtu uhlu. Je nutné si uvedomiť, že gravitačné zrýchlenie má hodnotu $1g$ čo je hodnota blízka aj rôznym otrasom, vybrácam alebo iným translačným zrýchleniam. Tento fakt je nutné zohľadniť pri filtrovaní signálu z akcelerometru. Z praktických meraní je teda nutné znížiť frekvenčný rozsah snímaču na jednotky Hz. Je nutné si uvedomiť aj fakt, v akej aplikácii chceme takýto snímač použiť a teda aj to, akú šírku pásma potrebujeme od daného snímaču. Trh tiež poskytuje veľké množstvo snímačov od rôznych výrobcov, s rôznymi technológiami a teda aj s rôznou kvalitou výstupného signálu. Na odporúčanie od vedúceho tejto práce ale aj iných odporúčaní som sa rozhodol použiť snímač zrýchlenia od firmy Analog Devices.

5.2.1.1 ADXL203

Jedná sa o dvoj osí MEMS akcelerometer s citlivosťou $\pm 1,7g$. Tento patrí medzi veľmi často používané akcelerometre označované tiež aj „high precision“. Výstupný signál je analógový a pomerový vzhľadom k napájaciemu napätiu. Poskytuje vysoké rozlíšenie až 1mg pri šírke pásma 60Hz. Celkovú šírku pásma výrobca udáva až 2,5kHz. Snímač sa predáva štandardne v puzdre typu LCC E-8 (obr.5.2). Detailnejší popis je možné vidieť v katalógovom liste výrobcu [31]. Na obr.5.1 je možné vidieť blokovú schému s doporučeným zapojením.



Obrázok 5.1 Bloková schéma ADXL203[31]

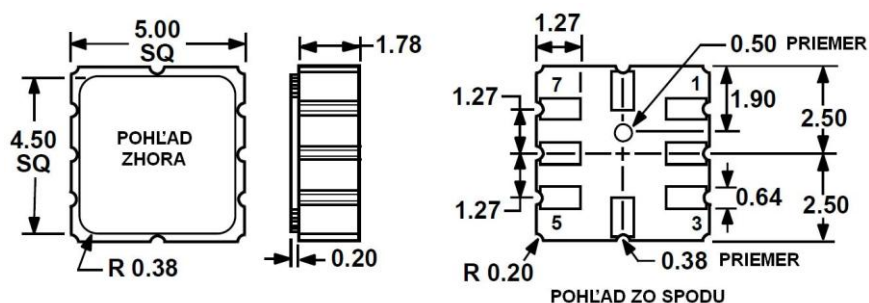
Na blokovej schéme je možné vidieť, že výstupné signály v sebe už obsahujú odpor R_{FILT} , ktorý nám umožní jednoducho vytvoriť jednoduchý RC filter typu dolná priepusť a to iba pripojením externého kondenzátora C_X prípadne C_Y . Konkrétne hodnoty vypočítame podľa nasledujúcej rovnice

$$F = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.1)$$

Pričom platí, že $R = 32k\Omega$ a vypočítaná frekvencia je frekvencia, pri poklese amplitúdy o 3dB. Pre príklad v tabuľke 2 uvádzam niekoľko hodnôt kapacít kondenzátora. V prípade potreby je tiež možné použiť nejaký iný typ filtrácie (aktívnej filtrácie) alebo SW filtrácie priamo v mikropočítači (v závislosti od výkonovej možnosti MCU). Na obr.5.3 je detailné zobrazenie snímaču.

Šírka pásma [Hz]	C_X [nF]
1	4700
10	470
100	47
500	10

Tabuľka 2 Výber kondenzátora v závislosti od frekvencie filtru



Všetky jednotky sú uvedené v [mm]

Obrázok 5.2 Puzdro LCC E-8 [31]



Obrázok 5.3 Detailný pohľad na snímač ADXL203 [31]

5.2.2 Voľba magnetometra

Snímače magnetického poľa Zeme nám primárne dokážu určiť uhol natočenia (najčastejšie v ose z) z výpočtu odklonu od magnetického pólu. Ich výhody a nevýhody už boli bližšie popísané v úvodných kapitolách. Elektronické kompasy ako produkty magnetických snímačov vyrába mnoho výrobcov. S alebo bez kompenzácií parazitných vplyvov prípadne s čiastočnou kompenzáciou a podobne.

Pôvodne bolo mojím cieľom použiť niektorý zo snímačov od firmy Honeywell, ale z určitých dôvodov sa mi to nepodarilo a keďže ide iba o principiálne skúmanie v laboratórnych podmienkach a za účelom porovnania s gyroskopom mi bol učený vedúcom diplomovej práce elektronický kompas CMPS03.

5.2.3 Kompas CMPS03

Tento elektronický kompas je popísaný v časti 3.2.4.12. Na obr.5.4 je jeho detailné zobrazenie. Nevýhoda tohto kompasu spočíva hlavne v tom, že dokáže merať iba dve zložky magnetického poľa Zeme a teda nedokážem urobiť SW kompenzáciu náklonu.

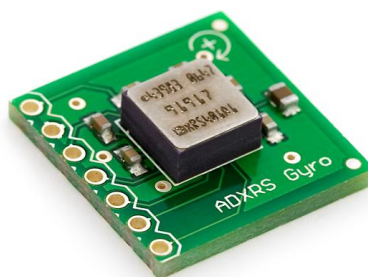


Obrázok 5.4 CMPS03 [30]

5.2.4 Voľba MEMS gyroskopu

Z uvedenej ponuky gyroskopov na trhu (Tab.1) je podľa mojich zistení najlepšia voľba výber z gyroskopov značky Analog Devices. Jedná sa o najprepracovanejšie gyroskopy a tiež aj najrozšírenejšie a podľa rôznych diskusií na internete aj najspoľahlivejšie. Dokonca sa mi podarilo nájsť, že tieto gyroskopy boli použité aj pri konštrukcii inerciálnych jednotiek pre bezpilotné špionážne lietadlá. Táto firma vyrába gyroskopy s rezonátorom využívajúci vplyv coriolisovej sily pri translačnom pohybe. Ich základná ponuka sa delí na gyroskopy s analógovým a digitálnym výstupom. Každá skupina má svoje výhody a nevýhody. Analógové gyroskopy (obr.5.5) majú nevýhodu nutnosti pripojenia externého A/D prevodníku a tým sa aj zvyšuje možnosť vstupu šumu v prípade ak nebude navrhnutá doska plošného spoja správne. Ich nevýhoda tiež spočíva v tom, že nedokážeme si SW

zmeniť ich citlivosť a podobne. Naopak ich výhodou je, že by mali mať teoreticky stabilnejší ofset a nižší šum, pretože na jednom čipe sa nenachádza mikroprocesor určený k priebežnému spracovaniu dát a navyše majú vyššiu šírku pásma. Z uvedeného vyplývajú naopak výhody a nevýhody digitálnych gyroskopov. Je teda na nás resp. na aplikácii aký gyroskop zvolíme. Zo zisťovania na internete sa mi podarilo zistiť, že najčastejšie sa v praxi používajú analógové gyroskopy, avšak toto zistenie je asi značne ovplyvnené tým, že digitálne gyroskopy sú relatívne

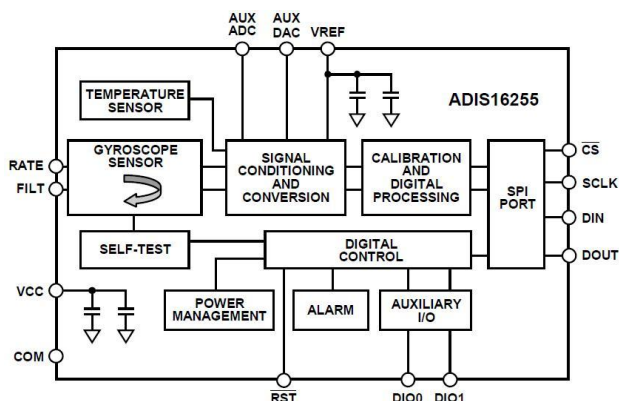


Obrázok 5.5 Analógový gyroskop fy. ANALOG DEVICES z rady ADXR5 [13]

novinkou na trhu tejto značky a z toho vyplývajúca absencia recenzií, či diskusií o skúsenosti s týmito gyroskopmi. Taktiež to môže byť spôsobené tým, že sa občas objavovali články, ktoré kritizovali výrobcu za to, že zbernica SPI po ktorej sa posielajú dáta je nestabilná. Neskôr tieto tvrdenia vyvrátim mojou aplikáciou a zisteniami.

Nakoľko ako som už spomenul je v praxi veľmi zaužívaný analógový typ gyroskopov, ja sa pokúsim o vytvorenie platformy pre meranie práve digitálnych gyroskopov a prípadne ich porovnanie. Rozhodol som sa teda o gyroskopy rady ADIS16xxx. Jedná sa o plne digitálnu radu gyroskopov v cenovej ponuke od 35\$ do 635\$ za kus. Tento veľký cenový rozptyl je spôsobený kvalitou prevedenia či počtom meraných osí. Táto veľká rada digitálnych gyroskopov poskytuje na výber aj také snímače, ktoré majú extrémne nízky šum, teplotnú kompenzáciu, extrémne precízne prevedenie či 9 inerciálnych snímačov v jednom puzdre. Ja som sa rozhodol konkrétne pre obvod *ADIS16255*. Tento gyroskop ako jeden z mála poskytuje teplotnú kompenzáciu priamo na čipe, zmenu citlivosti od $\pm 80^\circ/\text{s}$ až do $\pm 320^\circ/\text{s}$

voliteľne v 3 krokoch a na viac aj voliteľný frekvenčný filter. Jeho bloková schéma je na obr.5.6.



Obrázok 5.6 Bloková schéma gyroskopu ADIS16255 [13]

Medzi prednosti tohto gyroskopu patrí:

- Zmena vstupnej citlivosti v troch krokoch
- 14bit rozlíšenie A/D prevodníku
- Meranie teploty priamo na čipe a meranie napätia čipu
- Kalibrovaný pre rozsah teploty od -40°C do +85°C
- Kontrolovaná rýchlosť vzorkovania
- Zabudovaný nastaviteľný alarm
- Vlastný test čipu
- SPI zbernica
- Možnosť mechanického preťaženia až do 2000g
- Externý analógový a digitálny vstup

	Pri	Min	Typ	Max	Jednotka
Napájacie napätie:		4,75	5	5,25	V
Napájací prúd:			44		mA
Citlivosť:	$\pm 320^\circ/\text{s}$		0,07326		$^\circ/\text{s}/\text{LSB}$
	$\pm 160^\circ/\text{s}$		0,03663		$^\circ/\text{s}/\text{LSB}$
	$\pm 80^\circ/\text{s}$		0,01832		$^\circ/\text{s}/\text{LSB}$
Tepl. koef.:			25		ppm/ $^\circ\text{C}$
Nelinearita:			0,1		% z FS
Šum:	$\pm 320^\circ/\text{s}$		0,48		$^\circ/\text{s rms}$
Frekv. rozsah:			50		Hz

Tabuľka 3 Základné parametre gyroskopu ADIS16255 [13]

Firma Analog Devices ponúka tento typ gyroskopu v miniatúrnom puzdre LGA. Tento typ puzdra má všetky vývody z čipu na spodnej strane umiestnené tak, že je prakticky nemožné v domácich podmienkach napájať čip na DPS. Okrem samotného čipu firma ponúka osadený čip na DPS s vývodmi v konektore ale za cenu dvojnásobnej ceny gyroskopu. Ja som sa rozhodol práve pre tento „vývojový kit“ obr.5.7. Jeho nevýhodou je ale osadenie konektormi, ktoré majú štandardne netypizovaný rozchod medzi vývodmi 2mm. Bolo preto zložité nájsť „protikus“ k týmto konektorom. Jediné riešenie bolo zakúpiť konektory od firmy GM electronic ktorá ponúka podobný typ konektorov, avšak nie 2x6 ale 2x10. Vyriešiť sa to dá dvomi spôsobmi, buď mechanicky odstrániť 2x4 vývody z konektoru, alebo gyroskop zasunúť do stredu konektoru 2x10 tak, ako som to aj ja urobil.



Obrázok 5.7 Gyroskop ADIS16255 osadený vo vývojovej doske [13]

Technické parametre ako aj puzdro gyroskopu už bolo uvedené, teraz popíšem ostatné vlastnosti resp. funkcie samotného gyroskopu.

Gyroskop komunikuje s nadriadeným MCU prostredníctvom SPI zbernice. K tejto zbernici bude ešte venovaná samostatná kapitola.

Snímač je navrhnutý pre 5V napájacie napätie a má zabudovanú napäťovú referenciu 2,5V. Nejedná sa o pomerový snímač, čo je dobré, pretože malé kolísanie napájacieho napätia z rozsahu prípustných hodnôt (viď tab.3) neovplyvní zmenu výstupu a teda nespôsobí nepresnosť v meraní. Prístup k dátam je podobný ako prístup do bežných sériových pamätí EEPROM. Je teda pre každú meranú veličinu priradená adresa na ktorú sa v určitých časových intervaloch aktualizujú namerané dáta. Medzi základné merané veličiny ktoré je možné z gyroskopu vyčítať patria:

napájacie napätie, výstup z gyroskopu, digitalizovaná hodnota externého analógového vstupného signálu, teplota na čipe a uhlové natočenie. Pre príklad uvádzam tab.4, v ktorej je presné určenie dátových adries, rozlíšenie, formát dát a škálový koeficient.

Podľa uvedenej tabuľky Tab.4 si môžeme všimnúť, že jednotlivé merané veličiny majú rôzne bitové rozlíšenie a rôzny výsledný formát. S najvyšším rozlíšením možno zobraziť uhlové natočenie vypočítavané priamo gyroskopom, alebo dáta gyroskopu. Okrem výstupov uvedených v tabuľke Tab.4 môžeme získať

Názov	Funkcia	Adresa	Rozlíšenie [bit]	Formát dát	Škálový koeficient/LSB
ENDURANCE	Čítač vnútornej Flash pamäti	0x01, 0x00	16	Binárne	1 „count“
SUPPLY_OUT	Napájacie napätie	0x03, 0x02	12	Binárne	1,8315 mV
GYRO_OUT	Výstupné dáta z gyroskopu	0x05, 0x04	14	Dvojkový doplnok	0,07326 °/sec
AUX_ADC	Dáta z analógového vstupu	0x0B, 0x0A	12	Binárne	0,6105 mV
TEMP_OUT	Teplotný snímač na čipe	0x0D, 0x0C	12	Dvojkový doplnok	0,1453 °C
ANGLE_OUT	Uhol natočenia	0x0F, 0x0E	14	Binárne	0,03663°

Tabuľka 4 Význam a umiestnenie jednotlivých výstupných meraných veličín

[13]

z gyroskopu aj iné informácie ako sú alarm alebo iné špeciálne funkčné registre. Význam a presné adresy týchto registrov sem nebudem uvádzať nakoľko sú detailne popísané v [13] a ja ich v práci ani nebudem (okrem niektorých) vôbec využívať. Avšak medzi dôležité registre gyroskopu patria nasledovné registre:

GYRO_OFF jedná sa o register umiestnený na adrese 0x15 a 0x14 s rozlíšením 0,01835°/s/LSB s formátom v dvojkovom doplnku. Tento register je pre nás veľmi dôležitý, pretože od jeho hodnoty bude odpočítaná každá nameraná hodnota uhlovej rýchlosti z gyroskopu. Tento register je nutné aktualizovať vždy po vykonaní resetu obvodu alebo po pripojení k napájaciemu napätiu. Gyroskop je konštruovaný s určitou presnosťou ktorá za navyše závislá od počiatkovej kalibrácie ktorá práve spočíva v naplnení správnej hodnoty tohto registra. Algoritmus plnenia je jednoduchý. Po zapnutí napájacieho napätia a jeho ustálení či resete obvodu necháme niekoľko sekúnd merať pri $\omega = 0^\circ/\text{s}$ nameranú hodnotu uhlovej rýchlosti. Vypočítame priemernú ω_0 a touto hodnotou správne naplníme register GTRO_OFF.

GYRO_SCALE toto slovo nám umožňuje korigovať offset škálového faktora. Adresa na ktorú zapisujeme túto korekciu je 0x17 a 0x16 v rozsahu 0 až 1,9995% v binárnom tvare.

Oba tieto registre vychádzajú z korekcie z prenosovej funkcie ktorá by v ideálnom prípade mala byť lineárna a popísaná rovnicou (5.2)

$$y = m \cdot x + b \quad (5.2)$$

Kde (6.5) je zároveň prenosovou funkciou snímača.

SMPL_PRD register určuje rýchlosť samplovania vzorkov podľa nasledujúceho vzťahu:

$$T_s = T_B \times (N_s + 1) \quad (5.3)$$

Kde T_s je perióda vzorkovania [s]

T_B je bazový čas [s] voliteľný buď 1,953ms alebo 60,54ms

N_s je násobiaci koeficient []

Počiatkové nastavenie je maximálnych 256 vzorkov za sekundu. Adresa tohto registra je 0x37 a 0x36 s východiskovou hodnotou 0x0001. Horných 8bitov je nepoužitých bezvýznamných, 7.bit určuje T_B : 0 = 1,953ms a 1 = 60,54ms. Zvyšných 7 bitov 6:0 je určených pre N_s . Výslednú rýchlosť vzorkovania v [SPS] (sample per second) sa vypočíta ako:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (5.4)$$

SENS/AVG ide o register, ktorý nám umožňuje SW zmenu rozsahu v troch rozsahoch a navyše je možné zapnúť a nastaviť aj digitálnu filtráciu signálu vyšších harmonických s použitím FIR filtra. Tento register je uložený na adresách 0x39 a 0x38 s defaultne nastavenou hodnotou 0x0402 v binárnom tvare. Bity 15:11 sú nepoužívané, pomocou bitov 10:8 meníme dynamický rozsah a to nasledovne:

100 – 320°/s (prednastavená hodnota)

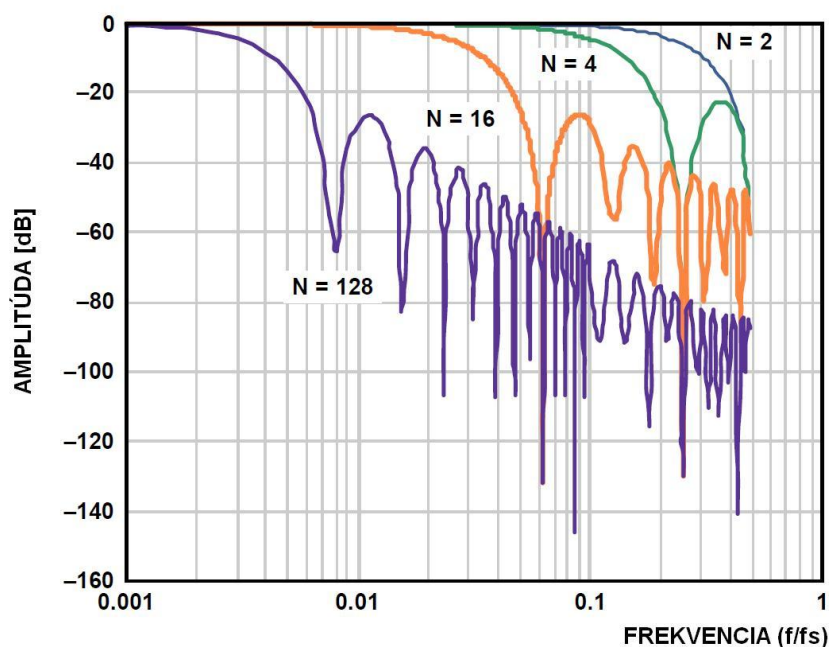
010 – 160°/s

001 – 80°/s

Bity 7:4 nie sú využívané a nemajú žiadnu funkciu a zvyšné 4 bity 3:0 sa používajú k nastaveniu filtra. Konkrétne k nastaveniu okna vo FIR filtri obr.5.8. $N = 2^M$

Nominálna hodnota dynamického rozsahu pre šírku pásma je 50Hz. Register SENS/AVG nastavuje konkrétne okno v danom filtri v rozsahu $N = 2^M = 1, 2, 4, 16, 32, 64$ a 128.

$$H_B(f) = H_A^2(f) \Rightarrow H_A(f) = \frac{\sin(\pi \times N \times f \times t_s)}{N \times \sin(\pi \times f \times t_s)} \quad (5.5)$$



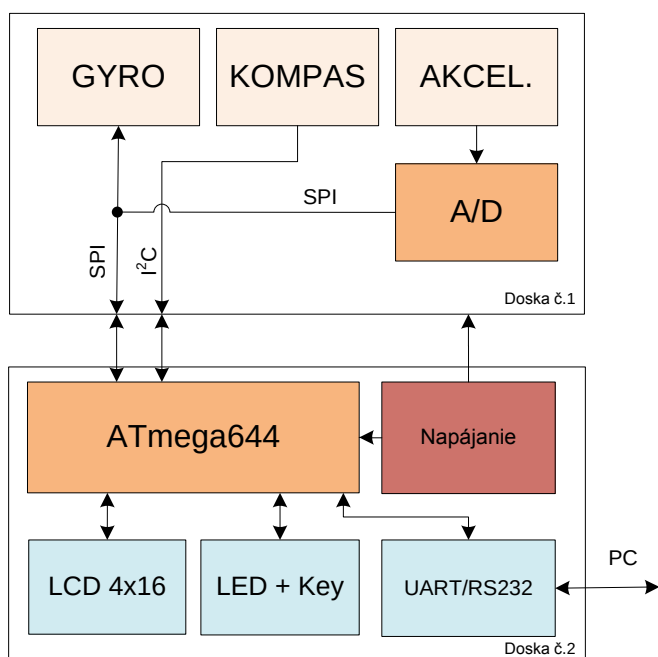
Obrázok 5.8 FIR filter pre gyroskop ADIS16255 [13]

STATUS – tento register umiestnený na adrese 0x3D a 0x3C poskytuje informácie o stave gyroskopu nasledovne: bity 15:10 sú bezvýznamné, bit 9 a bit 8 poskytuje informáciu o alarmoch 1 = aktívny 0 = neaktívny, 7:6 bezvýznamné bity, bit 5: príznakový bit „self“ testu čipu 1 = error 0 = test ok, bit 4: signalizácia prekročenia rozsahu meranej uhlovej rýchlosti, 3: signalizácia chybovej komunikácie v SPI zbernici, 2: control register update failed, 2: prekročenie napájacieho napätia nad 5,25V 0: pokles napájacieho napätia pod hodnotu 4,75V.

5.3 NÁVRH HW

Keď si to zhrnieme, tak budeme potrebovať spracovávať (aspoň čiastočne) signály z 3 snímačov. Elektronický kompas bude komunikovať cez I²C zbernicu, gyroskop cez SPI zbernicu spolu s A/D prevodníkom, ktorý bude prevádzať signál z akcelerometrov. Okrem toho budem zobrazovať niektoré potrebné údaje na LCD displeji a posielat' namerané dáta po sériovej linke RS-232 do PC.

Je teda potrebné vytvoriť akýsi prevodník signálov s ich čiastočnou úpravou a vyhodnotené dáta poslať do PC na ich ďalšie spracovanie. Ako riadiaci MCU som použil ATmega644 od firmy Atmel (dôvod voľby a vlastnosti budú popísané ďalej). Celá bloková schéma je zobrazená na obr.5.9.



Obrázok 5.9 Bloková schéma zariadenia

Celé zariadenie je navrhnuté na dvoch samostatných doskách plošných spojov. Toto oddelené prevedenie má tú výhodu, že analógová časť bude oddelená od procesorovej časti čo sa tiež prejaví v zníženom šume, ktorý by mohol prenikať z MCU do AD prevodníka. Ale hlavná príčina je taká, že MCU je programovaný cez SPI zbernicu na ktorú používa aj gyroskop s A/D prevodníkom. Ku konfliktu by mohlo dôjsť v prípade programovania MCU, kedy sa mení „úloha“ MCU z master na

slave, prípadne keby sa s tým daný programátor nevedel vyrovnat' (vychádzam z vlastnej skúsenosti keď som mal podobný problém s SPI zbernicou). V takomto prípade sa jednoducho pred programovaním MCU doska so snímačmi jednoducho odpojí nakoľko je sú spojené jednoradým konektorom.

Schéma celého zariadenia je uvedená v prílohe pod číslom 1. Ako je na nej možno vidieť, napájací obvod tvorí jednoduchý lineárny 5V stabilizátor 7805. Celý obvod vrátane MCU je napájaný jednotným napätím 5V. Na obsluhu a informáciu užívateľa som použil 2 tlačidlá, 2 LED diódy a štandardný znakový LCD displej 4x16. Komunikácia s PC prebieha prostredníctvom sériovej asynchrónnej linky RS232 pričom možno použiť bez problémov prevodník RS232/USB (odskúšaných niekoľko prevodníkov s pozitívnym výsledkom). Ako prevodník pre akcelerometre som použil obvod od firmy Analog Devices (popísaný nižšie) AD7706.

5.3.1 ATmega644

Tento MCU je 8bit mikrokontrolér s RISC architektúrou. Výpočtový výkon je 20MIPS pri taktovaní 20MHz. Disponuje s 64kB Flash vnútornou pamäťou programu, 2kB EEPROM a 4kB vnútornou SRAM pamäťou. Programovacie periférie obsahuje dve, JTAG a SPI. Okrem iného obsahuje 10bit A/D prevodník, PWM kanál atď. Bližšie informácie sú uvedené v katalógovom liste [38].

Hlavnou prednosťou prečo som si vybral práve tento MCU je rýchlosť (najvyššia z pomedzi 8bit MCU) ale hlavne aj veľkosť SRAM pretože v programe používam veľké množstvo premenných typu floating point (32bit).

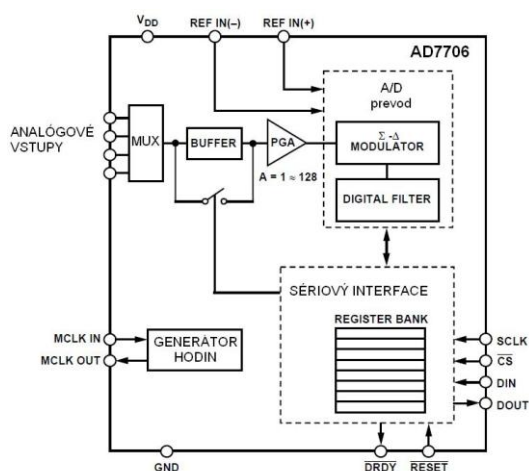
MCU je priamo taktovaný externým oscilátorom – kryštálom o frekvencii 14,7456MHz. Túto frekvenciu som nevolil náhodne, ale s ohľadom na sériovú linku UART, ktorá komunikuje s PC s rýchlosťou 115200Baud/s a s cieľom dosiahnuť nulovú chybovosť spôsobovanú práve často nevhodnou voľbou kryštálu. Pri tejto frekvencii je MCU schopný dosiahnuť teoreticky 0,0% chybovosť spôsobenú časovaním.

5.3.2 AD7706

A/D prevodník je produktom firmy Analog Devices. Ide o 16bit 3 kanálový prevodník typu sigma – delta. Prevodník komunikuje s okolím prostredníctvom SPI

zbernice. Napájacie napätie je možné použiť v rozsahu 3 – 5V. Je možné pripojiť externý zdroj referenčného napätia pre kladné aj záporné napätie. Ako je na blokovej schéme možno vidieť obr.5.10 obvod potrebuje pre svoju funkciu externý kryštálový oscilátor o frekvencii 2,4567MHz. Daný prevodník je na trhu k dispozícii v rôznych puzdrách DIP16, SOIC16 a TSSOP16.

Softwarovo možno nastaviť pre každý kanál rôzne parametre ako napríklad vstupné zosilnenie, či frekvenčný filter a rýchlosť vzorkovania.



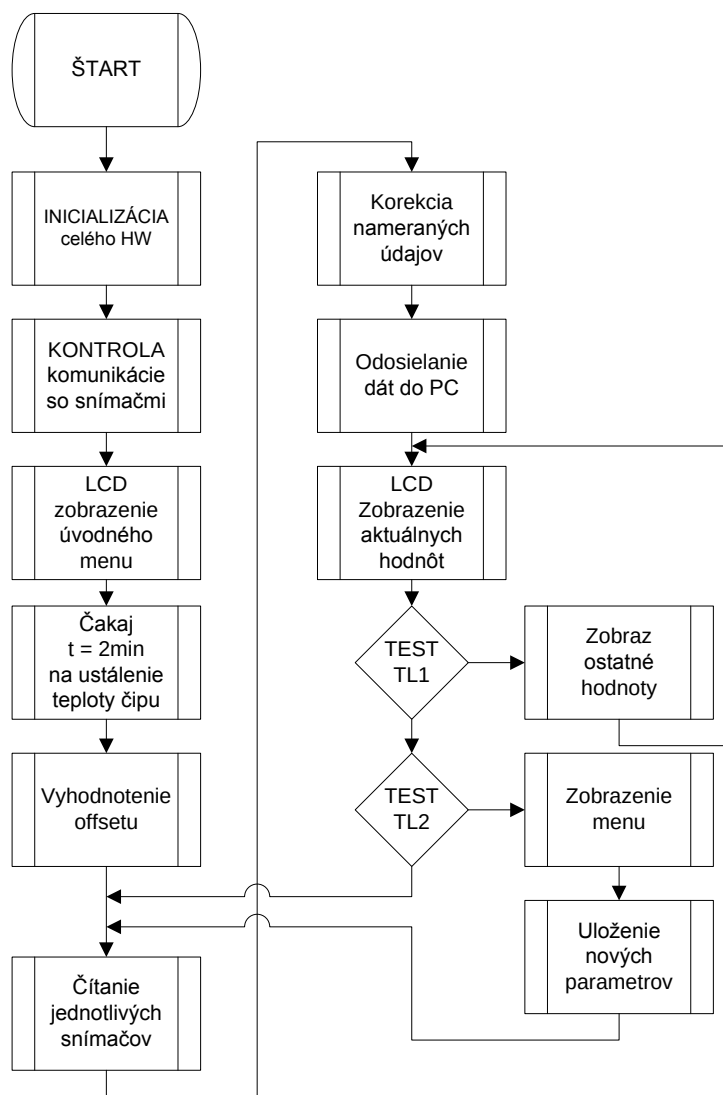
Obrázok 5.10 Bloková schéma AD7706 [29]

5.4 SW RIEŠENIE

V tejto časti bude popísaný program do MCU ATmega644. Program je písaný v jazyku C a kompilovaný prekladačom CodeVisionAVR V2.03. Programovanie samotného MCU bolo prevádzané programátorom AVRISP mkII fy. ATMEL obr.5.11. Jedná sa programátor, ktorý je pripojený k PC cez USB2.0 rozhranie.



Obrázok 5.11 AVRISP mkII programátor [15].



Obrázok 5.12 Vývojový diagram

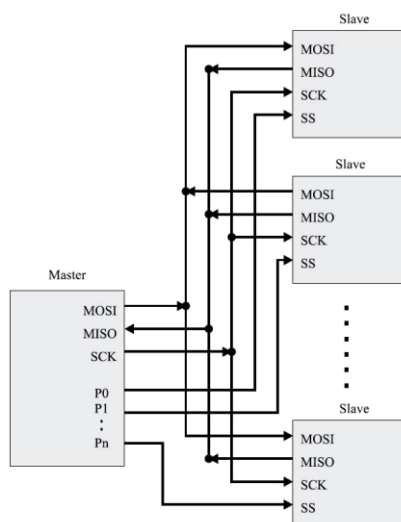
Na obrázku 5.12 je možné vidieť vývojový diagram celého SW MCU. Jednotlivé časti vývojového diagramu je možné vidieť aj v zdrojovom programe. Teraz sa budem zaoberať len tými najdôležitejšími časťami. Na začiatku sa vykoná inicializácia celého HW, to znamená mikrokontroléra, A/D prevodníku a jednotlivých snímačov. Rutina označená ako „Čakaj $t = 2 \text{ min}$ “ je v tomto prípade potrebná z toho dôvodu, aby sa ustálila aspoň čiastočne teplota na čipe gyroskopu, ktorá ako budeme ďalej vidieť neustále stúpa v istom rozsahu. Práve počas týchto 2 minút je stúpanie najvyššie a teda aj vplyv na zmenu offsetu je značný. Ďalej nasleduje práve vyhodnotenie offsetu, vyčítanie údajov zo snímačov, ich korekcia, odosielanie do PC alebo iného zariadenia komunikujúceho cez sériovú linku RS232

a nakoniec nasleduje zobrazenie údajov na displeji a kontrola stlačenia tlačidiel. V prípade stlačenia TL1 sa na displeji zobrazia ďalšie menej potrebné údaje ako je napájacie napätie a podobne. V prípade stlačenia TL2 sa dostaneme do jednoduchého menu v ktorom si môžeme nastaviť citlivosť či zapnúť kalmanov filter.

Čo sa týka jednotlivých častí programu tak sú dostatočne okomentované v súbore main.c priloženého na CD. Bude ale vhodné, ak ešte bližšie v tejto práci popíšem komunikáciu SPI zbernice, pretože som viac krát videl v diskusných fórach, že s ňou iní užívatelia mali problémy. Teoreticky ju popíšem v tejto práci, ale konkrétne fungovanie bude popísané v spomínanom súbore main.c

5.4.1 Obsluha zbernice SPI

Rozhranie SPI je predovšetkým určené k pripojeniu externých AD prevodníkov alebo EEPROM pamätí alebo k prepojeniu mikrokontrolérov navzájom. Jedná sa o sériovú rýchlu zbernicu ovládanú 4 vodičmi. V HW konfigurácii sa to robí tak, že môže byť paralelne pripojených k SPI zbernici niekoľko zariadení s tým, že jedno zariadenie bude MASTER a zvyšné budú SLAVE obr.5.13.



Obrázok 5.13 SPI HW usporiadanie [28]

Popis dátových vstupov a výstupov v SPI:

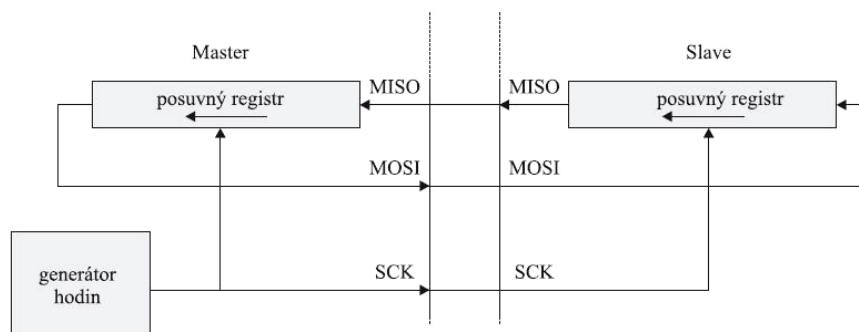
MOSI – jedná sa o dátový výstup z obvodu MASTER (**M**aster **O**ut **S**lave **I**n). Tento dátový výstup je pripojený ku všetkým MOSI v slave obvodoch.

MISO – je to dátový vstup obvodu MASTER (**M**aster **I**n **S**lave **O**ut) a je pripojený ku všetkým výstupom MISO v slave obvodoch.

SCK – je výstup z hodinového signálu, pričom jeho generátorom je vždy MASTER obvod.

SS – nazývaný tiež **Slave Select** je konfigurovaný ako vstup na každom SPI zariadení. Ak je v neaktívnej úrovni, tak je rozhranie SPI daného obvodu neaktívne a jeho výstup MISO je vo vysokej impedancii. Jednoducho povedané, týmto vstupom možno jednoducho vyberať ktoré zo SPI zariadení bude komunikovať s nadradeným zariadením MASTER v prípade, ak na jednej zbernici je použitých niekoľko zariadení.

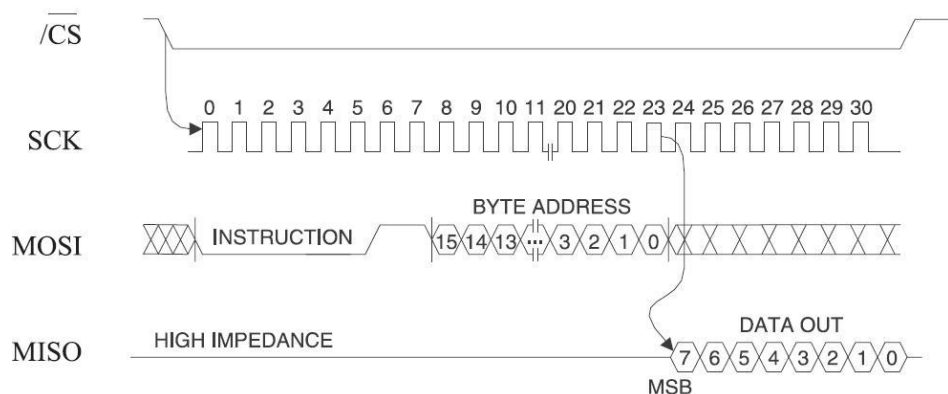
Prenosy na zbernici SPI prebiehajú vždy medzi obvodom MASTER a jedným z obvodov SLAVE. V skutočnosti to funguje tak, že po vytvorení alebo začatí komunikácie si môžeme MASTER a SLAVE obvod predstaviť ako dva kruhové posuvné registre zapojené v sérii. Pre predstavu si možno na obr.5.14 pozrieť ako to v skutočnosti je.



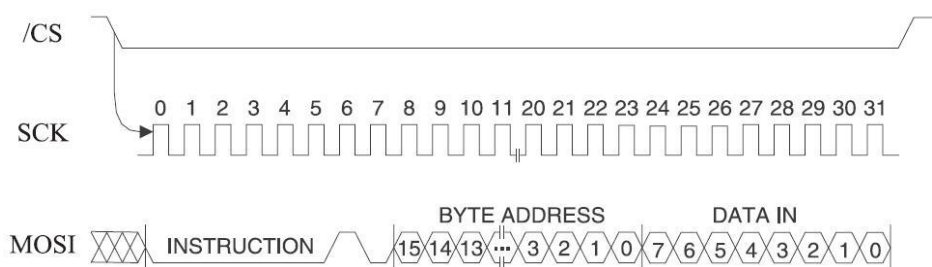
Obrázok 5.14 Prenos dát cez dva kruhové registre v SPI zbernici [28]

Ako je možno na obr.5.14 vidieť, dáta z obvodu SLAVE sú vysielané do obvodu MASTER, pričom dáta pred tým uložené v obvode MASTER sa presúvajú do SLAVE. Táto skutočnosť je veľmi dôležitá, pretože si je nutné uvedomiť, že ak MASTER vyšle do SLAVE pamäti príkaz k vyčítaniu niekoľkých pamäťových buniek, tak na prvú adresu mu SLAVE skutočne odpovie až po odoslaní druhej adresy, pre vyčítanie druhej pamäťovej bunky mu SLAVE odpovie až po prijatí tretej adresy atď. a po odoslaní poslednej adresy mu SLAVE vlastne zašle obsah

predposlednej pamäťovej bunky... Jednoduché pochopiť tento proces je možné v nasledujúcich dvoch obrázkoch.



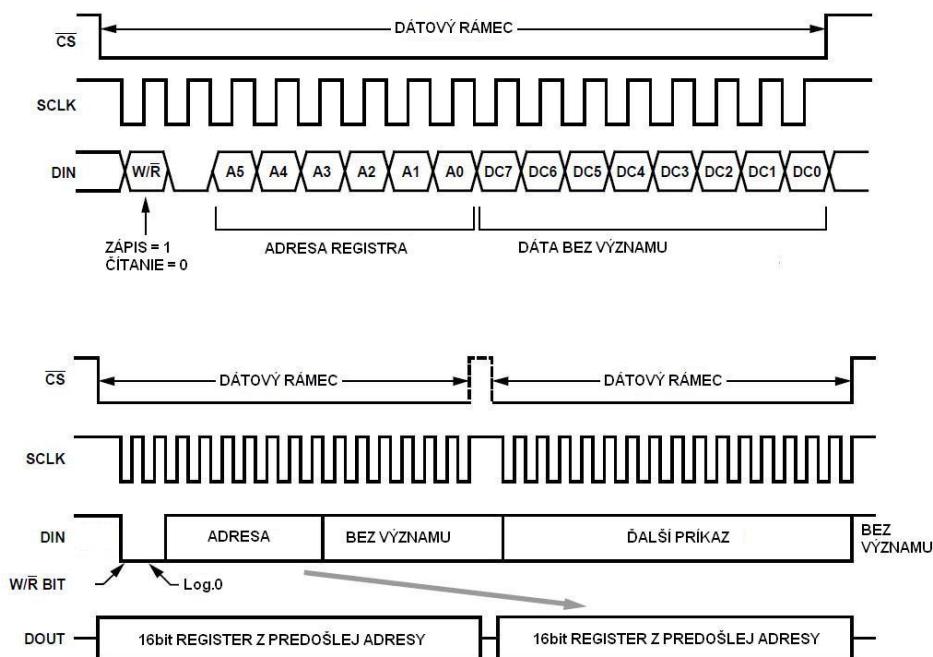
Obrázok 5.15 Pamäťová bunka na základe adresy [13].



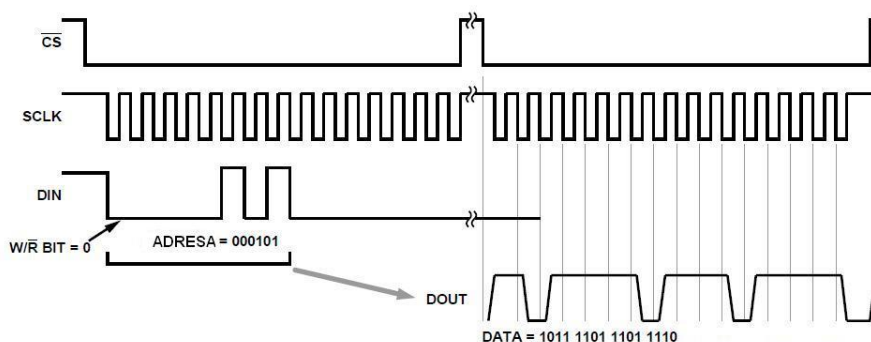
Obrázok 5.16 Zápis do pamäti na základe adresy [13].

Na predchádzajúcich obrázkoch (Obr.5.15 a 5.16) je možno vidieť, ako prebieha komunikácia po SPI zbernici. Na obrázkoch je ukázaná komunikácia s SPI EEPROM pamäťou. Takmer zhodne funguje aj R/W iných SPI zariadení. Rozdiel môže byť iba v dĺžkach slov, či pridaní špeciálnych kontrolných/riadiacich dát. Čo sa týka rýchlosti SPI zbernice, tak je to hlavne závislé od pripojených zariadení a od možnosti riadiaceho mikroprocesora. V praxi je bežné používanie rýchlosti niekoľko jednotiek MHz, no nevylučuje sa aj vyššie taktovanie.

Čo sa týka konkrétneho dátového prenosu cez SPI zbernicu medzi gyroskopom ADIS16255 a riadiacim MCU, vyzerá to konkrétne podľa nasledujúceho obr.5.17 a zároveň obr.5.18.



Obrázok 5.17 Presun dátových rámcov cez SPI a ADIS16255 [13]



Obrázok 5.18 Príklad jedného čítacieho cyklu z gyroskopu [13]

Oba obrázky obr.5.17 aj obr.5.18 vyjadrujú jak v skutočnosti prebieha komunikácia medzi MCU a gyroskopom vrátane riadiacich bitov a podobne. Na obr.5.18 možno vidieť konkrétny príklad ako to vyzerá počas jedného cyklu vyčítania dát z gyroskopu. Ako je z obr.5.18 vidieť, komunikácia začína inicializovaním gyroskopu prostredníctvom /CS ktorý inicializuje MCU. Tento inicializačný bit zostáva v aktívnom stave počas prenosu prvých 16 bitov dát a to konkrétne týchto: ako prvý bit je informácia o tom, či sa bude z gyroskopu vyčítavať alebo zapisovať, ako druhý bit je povinne bit = 0 a za ním nasleduje adresa ale v tvare: ako prvá adresa sa udáva nižšia polovica vyššieho bajtu. Teda ak chceme

vyčítat napr. ako je na obrázku register GYRO_OUT ktorý je na adrese 0x05, 0x04 tak adresa ktorú zašleme do gyroskopu bude v tvare 000101b a zvyšných 10 bitov bude bez významných a /CS potom uvoľníme a pri nasledujúcom preposlaní adresy nám gyroskop odpovie dátami na predchádzajúci dotaz.

Na obr.5.18 ešte môžeme vidieť aj tvar odpovede gyroskopu, ktorá pozostáva z požadovaných dáta (to sú nižšie 14 alebo 12 bity) a z informačných bitov 15 a 14 ktorých význam je nasledovný: bit 15: označuje zaslané dáta buď ako nové, alebo ako staré dáta a bit 14: udáva či nastala nejaká nová alarmová udalosť. Je nutné si ešte uvedomiť, že dáta pre GYRO_OUT a TEMP_OUT sú v tvare dvojkového doplnku, keďže môžu nadobúdať aj záporných hodnôt. Len pripomeniem, že výpočet dvojkového doplnku sa vypočítava tak, že najvyšší bit je znamienko a vypočítame ho tak, že zápornému číslu negujeme všetky bity a pripočítame +1 a výsledok je v dvojkovom doplnku.

5.4.2 Spracovanie nameraných údajov

Čo sa týka priložených grafov a celého spracovávania nameraných údajov, tak som využil MS Excel 2007 a Matlab R2008a. Výsledky a zhodnotenie sú priložené v prílohách tejto diplomovej práce a tiež v kapitole 6.

5.5 NÁVRH SCHÉM A DPS A MECH. VYHOTOVENIE

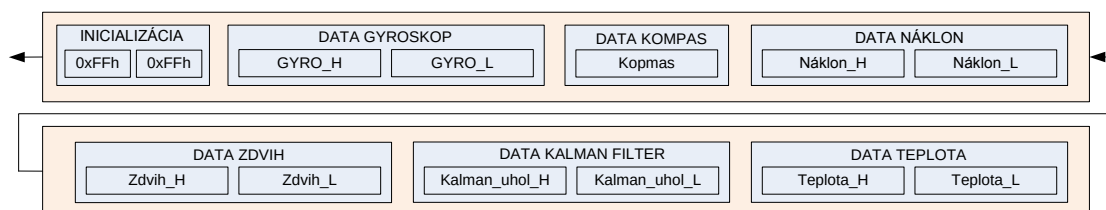
Schéma zapojenia a výkresy plošných spojov (príloha č.1 až 4) boli vytvorené prostredníctvom CAD programu Eagle v 4.16.

Celé zariadenie bolo navrhnuté modulárne – teda tak, že sa skladá z troch samostatných od seba oddeliteľných dosiek plošného spoja (ďalej len DPS). Najvrchnejšia DPS je vlastne LCD displej s konektorom, druhá a zároveň hlavná procesorová doska, na ktorej je umiestený obvod napájania, tlačidlá a mikroprocesor a najspodnejšia doska tvorená A/D prevodníkom a snímačmi. Hotové zariadenie je možné vidieť na obr.5.20.

Všetky snímače sú pripojené k DPS prostredníctvom konektorov aby bolo možné ich v prípade potreby vymeniť. Nakoľko snímače zrýchlenia sú iba v dvojsose prevedení, je nutné jeden zo snímačov vyhotoviť vertikálne. Detaily je možné vidieť na obr.5.21.

5.6 NÁVOD NA OBSLUHU ZARIADENIA

Celé zariadenie sa napája prostredníctvom nestabilizovaného napájacieho napätia 12V. Prúd potrebný pre napájanie je 200mA. Tento zvýšený napájací prúd je z dôvodu zapojeného podsvietenia LED na LCD displeji. Všetky dáta sú vysielané prostredníctvom sériovej linky nasledovným spôsobom.



Obrázok 5.19 Postupnosť dát na RS232

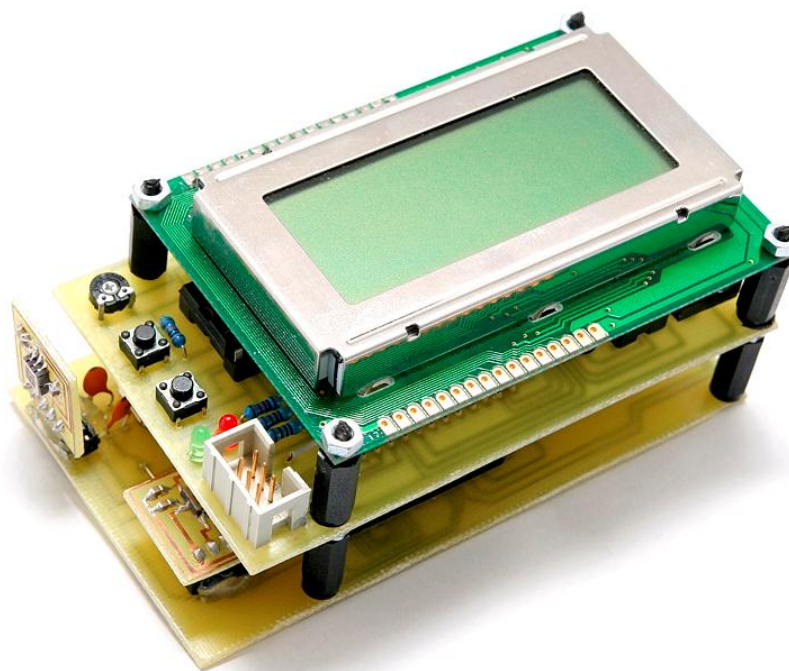
Každý balík dát pre konkrétny snímač predstavuje 2B okrem dát pre kompas, kedy používam iba jednoduchých 8bit na vyjadrenie azimutu 0 – 360°. V nasledujúcej tabuľke sú jednotlivé byty popísané.

	Objem dát [B]	Popis	Scale factor/LSB
GYROSKOP	2	Unsigned int	0,07326 °/s
KOMPAS	1	Char	1,40625°
NÁKLON "bočný"	2	Integer	1°
NÁKLON "zdvih"	2	Integer	1°
TEPLOTA	2	Unsigned int	0,1453°C
KALMAN FILTER	2	Integer	1°
INICIALIZÁCIA	2	Char	-

Tabuľka 5 Popis jednotlivých slov na výstupe RS232

Po pripojení napájacieho napätia sa na displeji zobrazí úvodne menu a následne menu, ktoré nás informuje o prebiehajúcej inicializácii a nastavovaní samotného offsetu. Po ukončení potrebných úvodných procedúr, sa na displeji zobrazia informácie o uhle natočenia podľa gyroskopu, podľa kompasu, jeden z náklonov vypočítaný z akcelerometru a teplota na čipe gyroskopu. Vždy počas zobrazenia týchto informácií je výstupná sériová linka aktívna a teda vysielajú jednotlivé informácie cyklicky rýchlosťou 115200Baud/s, 8bit, 1Stop bit, bez

paritných bitov. Po stlačení TL1 sa dostaneme k ostatným informáciám ako je hodnota napájacieho napätia a uhol natočenia podľa kalmanovho filtra. Po stlačení TL2 sa dostaneme do krátkeho a jednoduchého MENU v ktorom TL1 sa používa ako OK a TL2 na zmenu stavu. V menu možno nastaviť či chceme filtráciu dát s použitím kalmanovho filtra (ak zvolíme off, tak na sériovej linke sa namiesto hodnoty natočenia z kalmanovho filtru vysiela 0x0000h) a tiež nastavujeme citlivosť gyroskopu v rozsahu 80°/s, 160°/s a 320°/s spolu s nastavením príslušného dolno priepustného filtra realizovanom priamo v gyroskope prostredníctvom FIR. Počas toho, ako sme v menu sa zastaví prenos dát zo sériovej linky a tiež všetky výpočty a neprebieha ani zisťovanie dát zo snímačov a teda vyvolanie menu môže slúžiť tiež ako PAUSE merania.



Obrázok 5.20 Pohľad na hotové zariadenie



Obrázok 5.21 Detailný pohľad na akcelerometre pre meranie v 3 osách

6. NAMERANÉ HODNOTY A VYHODNOTENIE

Celý test snímačov uhlového natočenia bol zameraný hlavne na zistenie presnosti zistenia uhlového natočenia – hlavne teda bol testovaný gyroskop. Priebehy ako napríklad zisťovanie linearity a iných charakteristík som v tomto testovaní nerobil, lebo takýchto meraní nájdeme celkom dosť na internete a hlavne teda v katalógových listoch. Mňa skôr zaujíma to, že čo možno v skutočnosti od MEMS gyroskopov očakávať a kde ich možno použiť.

Už v predchádzajúcej kapitole, v ktorej som rozobral možnosti filtrácie dát a spresnenie nameraných údajov som poukázal na to, dáta z gyroskopu musíme dôkladne spracovať ak chceme dostatočne presné výsledky.

Urobil som jednoduchý test. Gyroskop som natočil vo vodorovnej rovine o 90° a následne som sa vrátil na východiskovú hodnotu teda 0° pričom som v skutočnosti prešiel uhlovú dráhu 180° . Test trval veľmi krátky čas a zopakoval som ho niekoľko krát po sebe bez nulovania a teda skúmaným faktorom bola časová stabilita gyroskopu a teda skúmal som či sa vrátim do východiskovej hodnoty 0° . Tento test som robil po čo najlepšej kompenzácií offsetu.

Test č.	ŠTART 0°	90°	STOP 0°
1	0,0	90,0	0,1
2	0,1	90,0	0,0
3	0,0	90,0	0,1
4	0,1	90,2	0,4
5	0,4	90,1	0,1
6	0,1	89,8	0
7	0	90,2	0,4
8	0,4	90,4	0,4
9	0,4	90,5	0,3
10	0,3	90,7	0,5

Tabuľka 6 Zistenie časovej stability 1. metódou

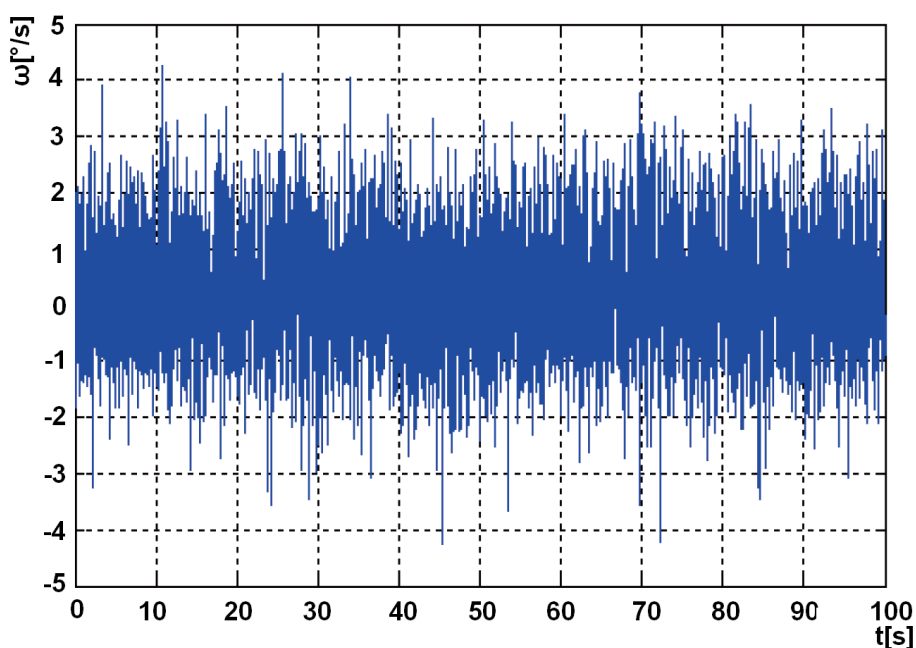
Ako je v tabuľke 6 vidieť, presnosť gyroskopu je výborná pričom najvyššia odchýlka bola nameraná $0,5^\circ$. Je ale nutné si uvedomiť, že tento test trval relatívne krátku dobu približne 30 sekúnd, čo je dosť málo na to, aby sme zhodnotili jeho

presnosť. Nasledujúci test ukazuje na časovú stálosť presnosti gyroskopu pri nulovom uhle otočenia.

Číslo merania	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Čas [min]	0	0,5	1	2	5	7	10	12	14	16
Uhol natočenia [°]	0,0	0,5	0,8	1,3	2,6	3,4	4,1	4,9	5,4	6,1

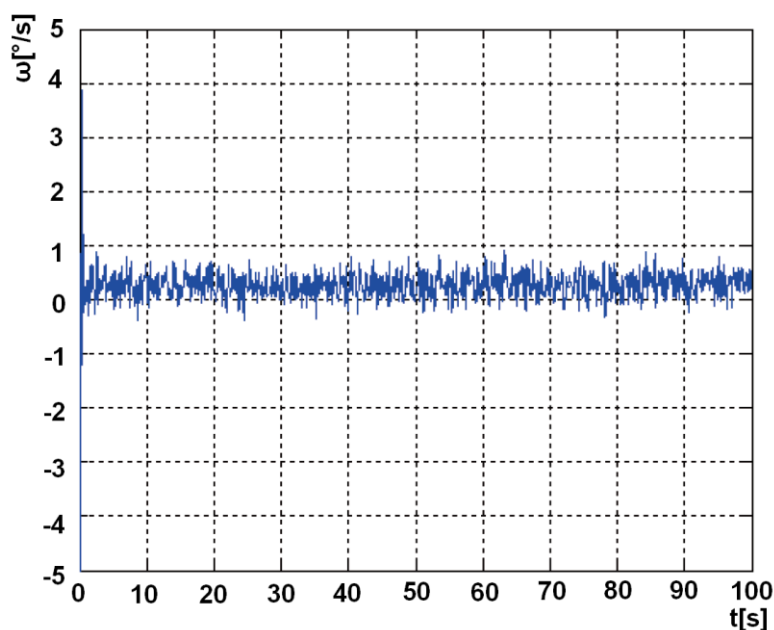
Tabuľka 7 Zistenie časovej stability 2. metódou

V tabuľke 7 vidíme presne predpokladaný jav u MEMS gyroskopov, relatívne v krátkom čase 16min sa nepresnosť posunula na 6,1°. Zo svojich skúsenosti ale môžem povedať, že očakávaná chyba bola väčšia a to z toho dôvodu, že pri podobnom teste kedy som ale používal analógový gyroskop ADXL300 som chybu nedokázal znížiť pod 10° za čas 15min. Uvedený fakt vyplýva určite aj z toho, že výhodou tohto digitálneho gyroskopu je zabudovaný dolno priepustný FIR filter.



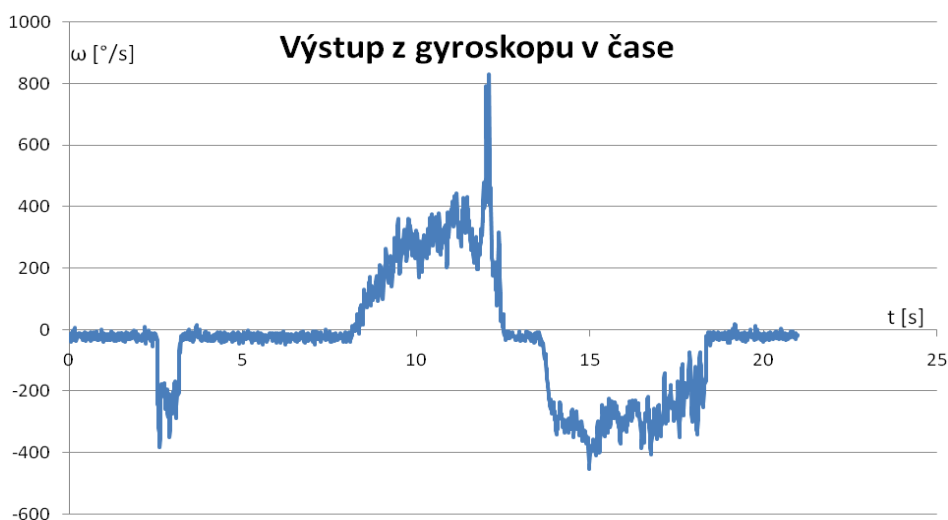
Obrázok 6.1 Výstup MEMS gyroskopu bez dolno priepustnej filtrácie [26]

Rozdiely medzi tým, kedy použijeme a kedy nepoužijeme dolno priepustný filter v gyroskope môžeme vidieť na obrázkoch 6.1 a 6.2. Je úplne evidentné, že bez filtrácie budú dosiahnuté výsledky v danej aplikácii oveľa horšie a teda aj časová stabilita presnosti bude menšia.

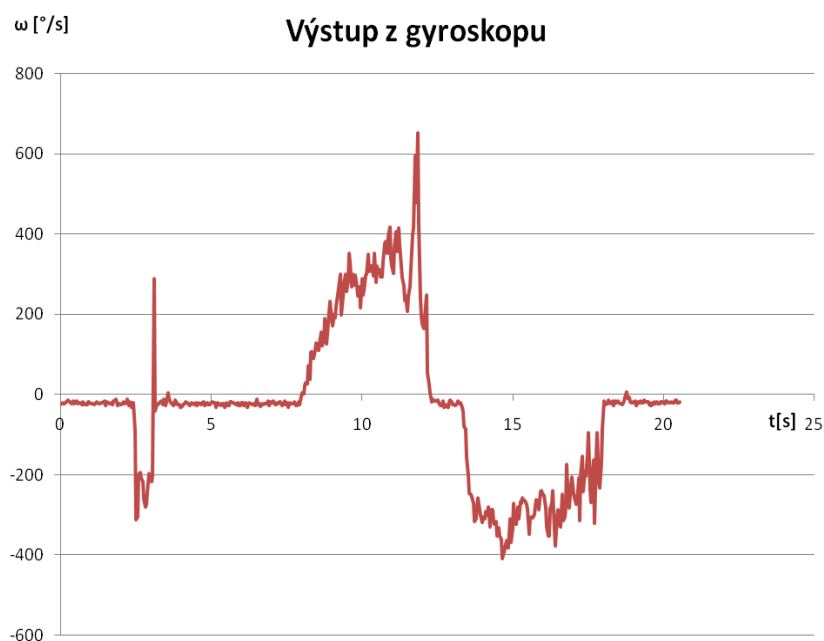


Obrázok 6.2 Výstup MEMS gyroskopu s použitím dolno priepustného filtra [26]

Tento rozdiel môžeme vidieť aj pri ďalšej filtrácii signálu. Na obr.6.3 je ukázaný priebeh výstupu gyroskopu z úlohy kedy sme skúšali časovú stálosť po natočení +/- 90°. Rozdiel medzi obr.6.3 a obr.6.4 je v tom, že v prvom prípade nebol použitý žiadny doplnkový filter signálu a v druhom prípade som použil jednoduchý plávajúci priemer s oknom $k = 4$. Je vidieť, že už pri tak malom „k“ máme výstupný signál lepšie upravený pre ďalšie jeho spracovávanie.

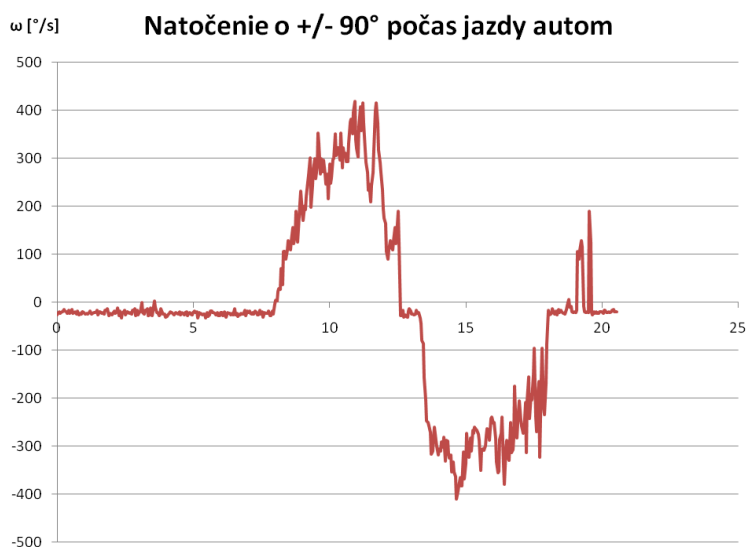


Obrázok 6.3 Nepoužitý plávajúci priemer



Obrázok 6.4 Použitý plávajúci filter

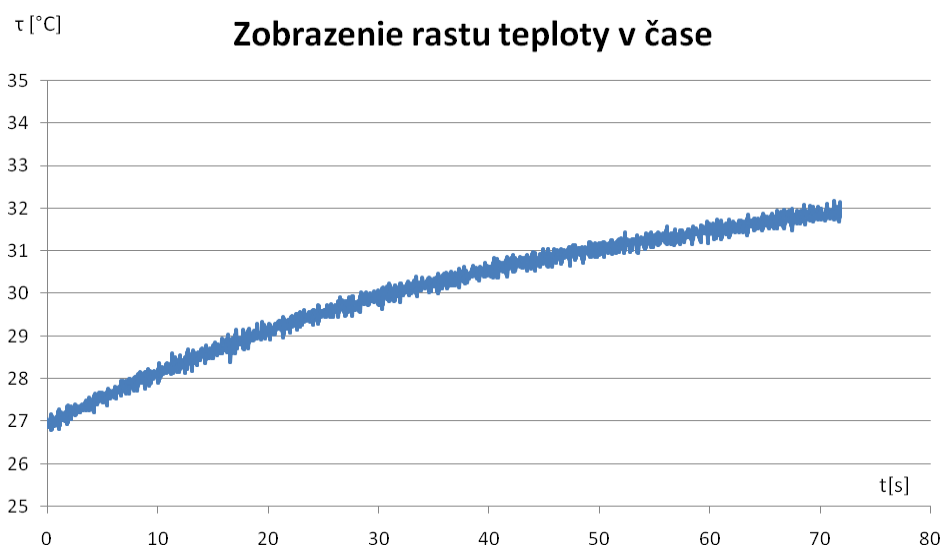
Veľmi zaujímavý príklad je, keď podobný pokus zopakujeme v idúcom aute. Pri inklinometroch a teda pri zisťovaní náklonu z akcelerometrov práve tu nastáva problém vplyvu zrýchlenia v ose merania. Pri gyroskope by podobný príklad nemal nastať a tak si to teda vyskúšame. Výrobca udáva vplyv zrýchlenia v ose kolmej na os merania uhlovej rýchlosti približne $0,2^\circ/\text{s}/\text{g}$. Tento vplyv nie je veľký ale zase je kompenzovateľný (v prípade, že dokážeme merať príslušné zrýchlenie).



Obrázok 6.5 Vplyv zrýchlenia na meranie uhlovej rýchlosti

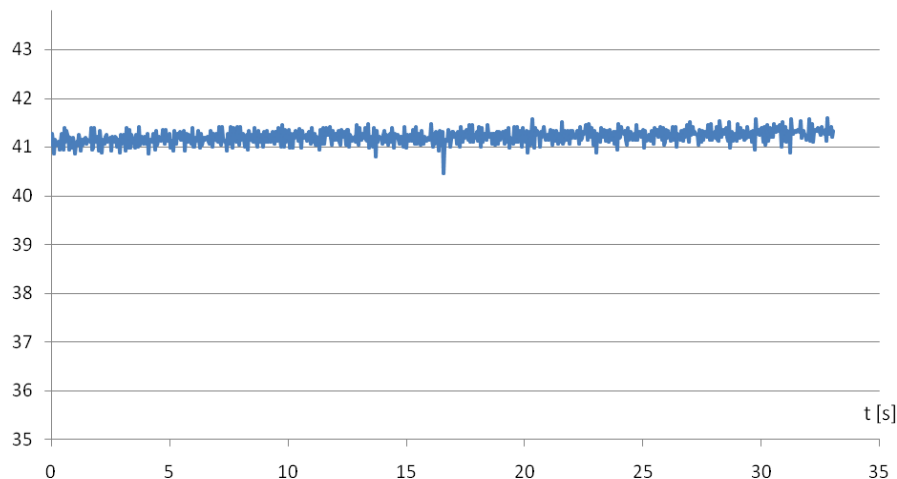
Ako je možné na grafe na obr.6.5 vidieť, vplyv zrýchlenia auta nemá veľký vplyv na presnosť merania uhlového natočenia pri gyroskopoch. Z tohto práve vyplýva záver, že v pohybujúcich sa objektoch, v ktorých chceme presne merať uhlové natočenie je vhodná práve metóda merania s použitím gyroskopov a nie inklinometrov resp. akcelerometrov. Ako dôkaz, tiež môžem uviesť, že práve gyroskopy sa používajú v automobiloch a ich stabilizačných systémoch ESP ako snímače natočenia.

Ďalším vhodným testom je, ako sa mení teplota priamo na čipe gyroskopu po zapnutí napájacieho napätia. Na obr.6.6 je vidieť, ako teplota prudko narastie v čase 70 sekúnd z izbovej teploty na teplotu 32°C. Aj z tohto dôvodu je potrebné počkať pred začatím merania na jej ustálenie a až po uplynutí tejto doby približne celkovo 2 min. vykonať meranie prípadne jej kompenzáciu kedy jej zmena už nie je vysoká. Teplota na čipe sa ustáli pri každom meraní asi na 41,5°C pri okolitej teplote 23,2°C.



Obrázok 6.6 Rast teploty čipu gyroskopu po pripojení napájacieho napätia

Závislost zmeny teploty od času



Obrázok 6.7 Grafické znázornenie ustálenia teploty po čase $t > 2\text{min}$

Nakoniec ešte ukážem tabuľku 8, v ktorej by som chcel zhrnúť využitie jednotlivých metód k určeniu uhlového natočenia na konkrétnych prípadoch z praxe.

	Gyro	Gyro + akcel.	Akcel.	Optický gyroskop	Poznámka
Inerciálna navigácia (azimut)				•	Veľmi dôležitá presnosť
Inerciálna navigácia s GPS (azimut)	•				Gyroskop ako doplnok pri výpadku GPS
Stabilizácia RC modelu	•				Gyroskop veľmi vhodný pre takúto aplikáciu
Automobilové ESP	•				Gyroskop veľmi vhodný pre takúto aplikáciu
Segway				•	Nutnosť vysokej presnosti merania z dôvodu bezpečnosti
Helma virtuálnej reality		•			Kombinácia gyro + akce. + kalman filter
Meranie náklonu nepohyblivých zariadení			•		Stačí obyčajný akcelerometer so šírkou pásma 5Hz

Tabuľka 8 Snímače uhlového natočenia a aplikácie pre ne vhodné

V tabuľke 8 sú len tie najčastejšie praktické príklady kde možno gyroskop nájsť. Neznamená to však, že MEMS gyroskop nenájdeme nikdy napríklad v segway pretože ako som zistil, je na trhu firma Systron Donner ktorá sa hlavne venuje technológiám MEMS a spresnenia meraní. Svedčí o tom napríklad ich model gyroskopu SDG1000, ktorý ma veľmi výborné technické parametre ale tabuľka 8 bola navrhnutá práve pre klasické MEMS gyroskopy rady ADIS a ADXL fy. Analog Devices.

7. ZÁVER A ZHODNOTENIE DOSIAH. CIEĽOV

Zadanie diplomovej práce, znelo preskúmať možnosti snímania natočenia v mobilnej robotike a realizovať systém pre meranie tohto natočenia a následne ho otestovať. Celé zadanie sa podarilo splniť v plnom rozsahu. Na základe informácií od vedúceho práce som sa zameral hlavne na MEMS gyroskopy, ich vlastnosti a ich testovanie. Uviedol som aj iné možnosti (magnetometre a akcelerometre) a spolu s gyroskopom som vytvoril merací systém vhodný pre mobilného robota.

V práci som sa zameral na možnosti filtrovania signálu z gyroskopu a možnostiach spresnenia merania uhlového natočenia a stabilizácie v čase. Podarilo sa mi s istými obmedzeniami (zníženie periódy vzorkovania) aplikovať kalmanový filter na vytvorenie fúzie dát z gyroskopu a akcelerometru.

Nakoniec som z nameraných hodnôt a získaných informácií vytvoril tabuľku 8 v ktorej som prakticky zhrnul možnosti použitia gyroskopov v jednotlivých praktických príkladoch na priblíženie možností ich využitia.

Hlavným zistením v tejto diplomovej práci bolo, že gyroskop je možné použiť v širokej škále aplikácií, v ktorých potrebujeme zistiť uhlové natočenie. Musíme však vziať do úvahy, akú presnosť potrebuje a v akom časovom rozmedzí. Je nutné ale dôkladne si rozanalyzovať daný MEMS gyroskop, ktorý chcem na našu aplikáciu použiť, pretože to bude naďalej kľúčové pri ďalšom spracovaní signálu. Je potrebné taktiež zvoliť vhodný návrh dosiek plošného spoja tak, aby sme minimalizovali vplyv okolitého rušenia ktoré by mohlo ešte viac zarušiť výstupný signál z gyroskopu, ktorý je už dosť zašumený sám o sebe. Presnosť určenia offsetu je pritom najviac kľúčová pre presnosť gyroskopu. Popis určenia gyroskopu som podrobne popísal a aj vyskúšal a pri jej dôkladnom stanovení je rozdiel naozaj značný vo výslednej presnosti. Najlepší spôsob určenia offsetu je podľa mňa dynamické nastavovanie vzhľadom napríklad na zmenu teploty (dodatočná teplotná kompenzácia) a iných vplyvov.

Na záver by som chcel upozorniť na takú vec, že po zistených skúsenostiach by som odporučil podobné zariadenie vyrobiť s použitím signálového procesora, pretože potrebné výpočty sú náročné na výkon riadiaceho MCU a bežný 8bit MCU neposkytuje dostatočný výkon.

8. LITERATÚRA

- [1] MIŠTA, Petr. *Záznam dat ze snímače zrychlení a úhlu natočení*. [Brno] : VUT, 2007. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Stanislav Klusáček.
- [2] DOSKOČIL, Eduard. *Zařízení pro inerciální navigaci*. Praha : CVUT, 2006. 41 s. Bakalářská práce.
- [3] KOPÁČIK, Alojz. *Inerciálne meracie systémy*. Bratislava : SAV, 1998. 81 s.
- [4] LAWRENCE, Anthony. *Modern Inertial Technology*. [s.l.] : [s.n.], [1998?]. 201 s.
- [5] KUBINEC, P. *Magnetické pole zeme* [online]. 2005 [cit. 2008-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.1sg.sk/~pkubinec/magneticke%20pole%20Zeme.pdf>>.
- [6] VOPÁLENSKÝ, Michal. *Magnetické senzory* [online]. 2005 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/bm/mag_pred/MagSenCesky.ppt#256,1,Magnetické_senzory>.
- [7] VOJÁČEK, Antonín. *FLUXGATE SENZORY pro měření mag. polí - 1. část Princip* [online]. 2006 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/ART265-fluxgate-senzory-pro-mereni-mag-poli--1-cast-princip.html>>.
- [8] YAMAHA. *YAS529 MS-3C Magnetic field Sensor* [online]. 2008 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.global.yamaha.com/news/2006/20060726.html>>.
- [9] PHILIPS. *Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52* [online]. 2004 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.nxp.com/acrobat_download/applicationnotes/AN00022_COMP_ASS.pdf>.
- [10] HONEYWELL. *HMC1055* [online]. 2007 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/HMC105X.pdf>.
- [11] *Elektronické kompasy* [online]. 2006 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://wiki.kn.vutbr.cz/robot/index.cgi?kompas>>.
- [12] SOLC, František, ŽALUD, Luděk. *Robotika*. Brno : [s.n.], 2002. 61 s.
- [13] Analog Devices. *ADIS16255* [online]. 2008 [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16250_16255.pdf>.
- [14] BYSTRICKÝ, Radek. *Měření úhlových rychlostí pohybu. In MDS palubních soustav letadel*. [s.l.] : [s.n.], 2007. s. 32-35.
- [15] ATMEL. *ATmega16* [online]. 2007 [cit. 2008-11-01]. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8154.pdf>.
- [16] VBulletin. *Forum RC group* [online]. 2000-2009 [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.rcgroups.com/forums/index.php>>.

- [17] Google. *Internetový vyhledávač* [online]. 2009 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://google.com>>.
- [18] *Stabilizácia obrazu* [online]. 2007 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://clanky.katalog-fotoaparatoV.sk/fotografovanie-upravy-fotografii/1457-stabilizace-obrazu/>>.
- [19] Earospy. *Quadrotor* [online]. 2008 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <http://www.aerospy.at/en/products_demonstrators.html>.
- [20] Segway [online]. 2008 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://co2calculator.wordpress.com/2008/10/>>.
- [21] RÖNNHOLM, P., HAGGRÉN, H.. *Fotogrametrian* [online]. 2003 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/4/4_print_pr.html>.
- [22] HANIŠ, Tomáš. *Stabilizovaná platforma pro UAV*. [s.l.], 2008. 75 s. Diplomová práce.
- [23] TEM. *E-shop* [online]. 2008 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.tme.eu>>.
- [24] Acroname. *Acroname Robotics* [online]. 2008 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.acroname.com/robotics/parts/R117-COMPASS.jpg>>.
- [25] CHUCKPAIWONG, Ittichote . *AD Tilt sensor* [online]. 2007 [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://gear.chuckpaiwong.com>>.
- [26] LIN, Zhao, et al. *MEMS Gyros Test nad Error Compensation Based od DSP*. [s.l.] : [s.n.], 2007. s. 1-4.
- [27] 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.
- [28] DUDÁČEK, K. *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN*. [s.l.] : [s.n.], 2002. s. 1-19.
- [29] ANALOG DEVICES. *Datasheet AD7706* [online]. 2006 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7705_7706.pdf>.
- [30] RIDGESOFT. *Products robotics* [online]. 2009 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <www.ridgesoft.com/usingsensors.htm>.

- [31] ANALOG DEVICES. *ADXL203* [online]. 2006 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL103_203.pdf.
- [32] WINKLER, Zbyněk. *Měření rychlosti* [online]. 2005 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://robotika.cz/guide/filtering/en>.
- [33] KALPANA, Arvind, et al. *Fiber Optic Gyroscope*. [s.l.] : [s.n.], c2008. s. 1-4.
- [34] HÝVNAROVÁ, Irena. *Inklinometry a gyroskopy. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. s. 66, příloh 18. Vedoucí práce. Ing. Zdeněk Havránek.
- [35] LUCZAK, Sergius, et al. Sensing Tilt With MEMS Accelerometers. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2006, no. 6 [cit. 2009-05-01], s. 1-7.
- [36] ANALOG DEVICES. *Datasheet ADIS16255* [online]. 2006 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16250_16255.pdf.
- [38] ATMEL. *Datasheet ATmega644* [online]. 2008 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2593.pdf.

9. ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č.1: Schéma zapojenia mikroprocesorovej dosky

Príloha č.2: Schéma zapojenia dosky snímačov

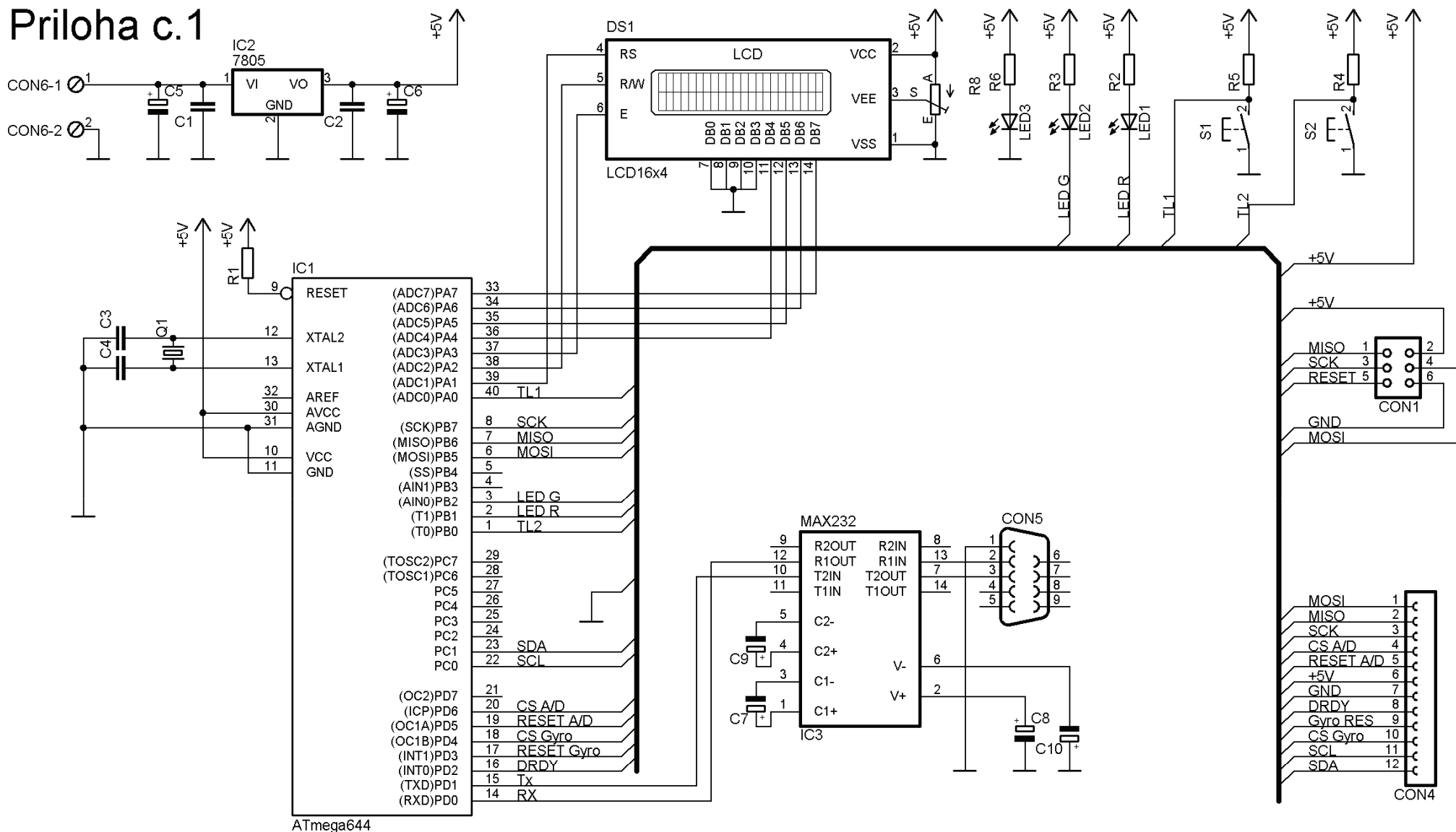
Príloha č.3: Výkresy dosiek plošných spojov

Príloha č.4: Výkresy dosiek plošných spojov

Príloha č.5: CD s obsahom:

- program do mikrokontroléru napísaný v jazyku C
- výkresy dosiek plošných spojov a schéma zapojenia
- elektronická verzia diplomovej práce
- katalógové listy jednotlivých snímačov a MCU
- zdrojové kódy kalmanovho filtru pre Matlab

Priloha c.1



Mikroprocesorova doska

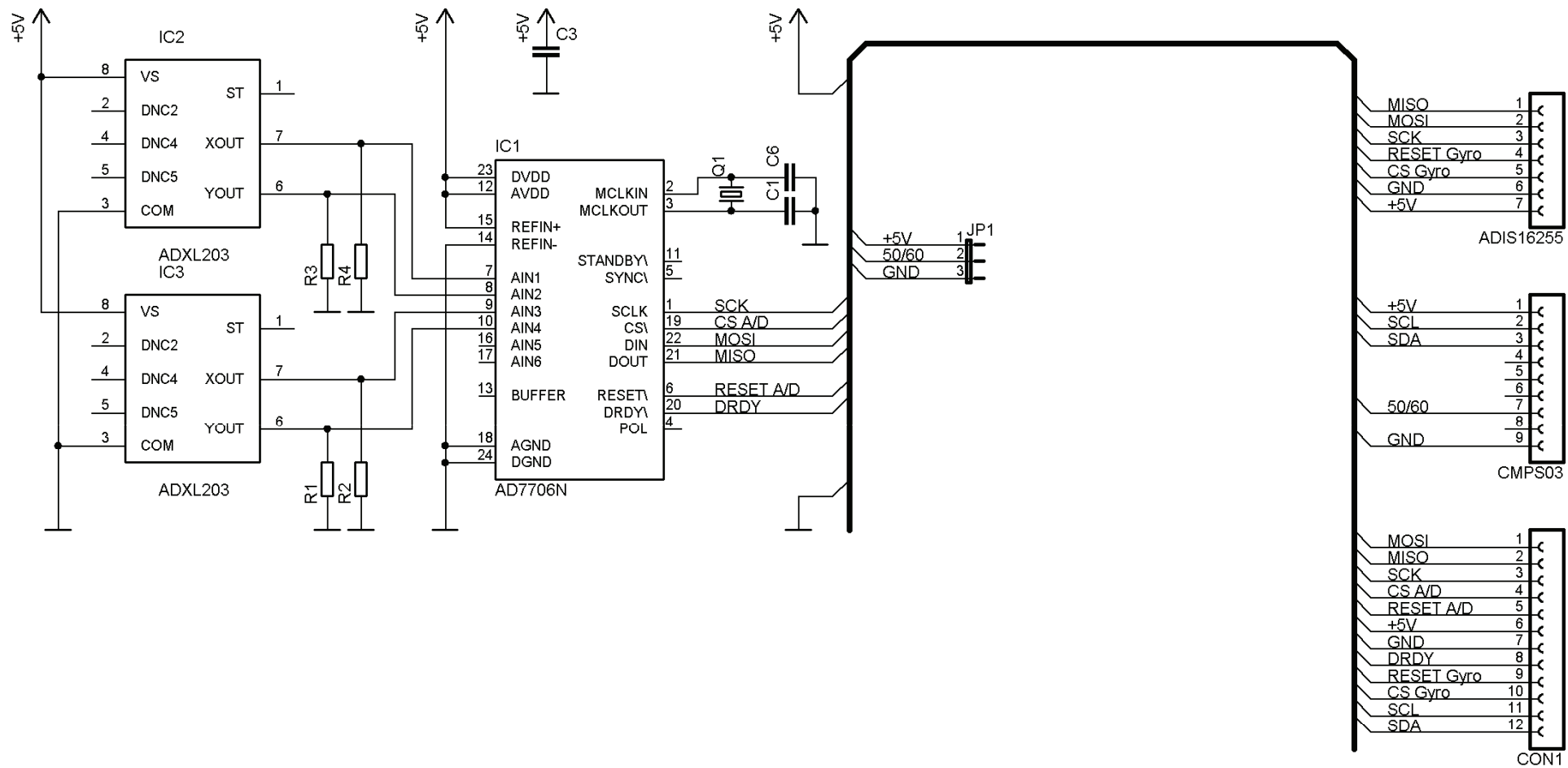
Priloha c.1

Board_1

15.05.2009 18:34:26

Sheet: 1/1

Priloha c.2



Doska so snimacmi

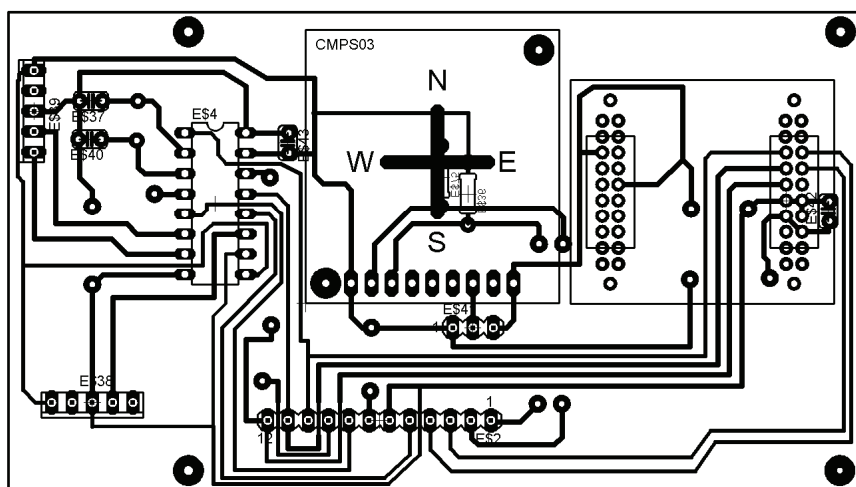
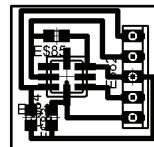
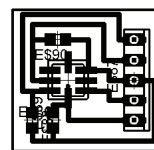
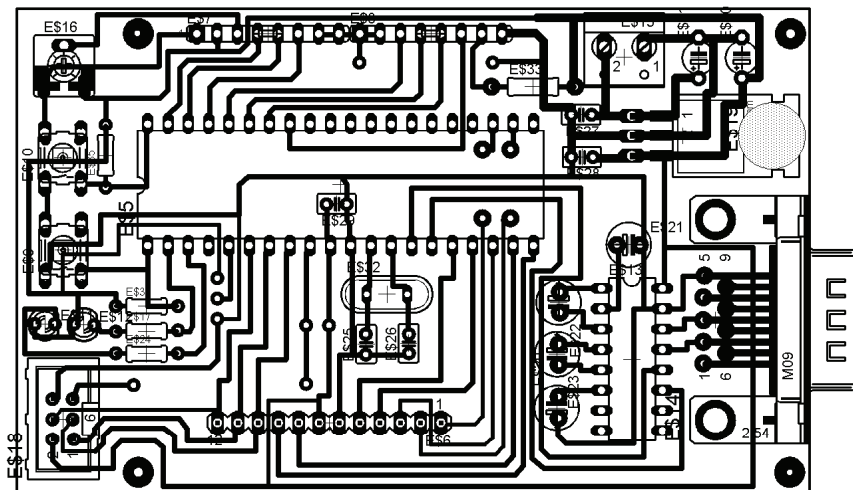
Priloha c.2

board2

15.05.2009 18:37:32

Sheet: 1/1

Priloha c.3

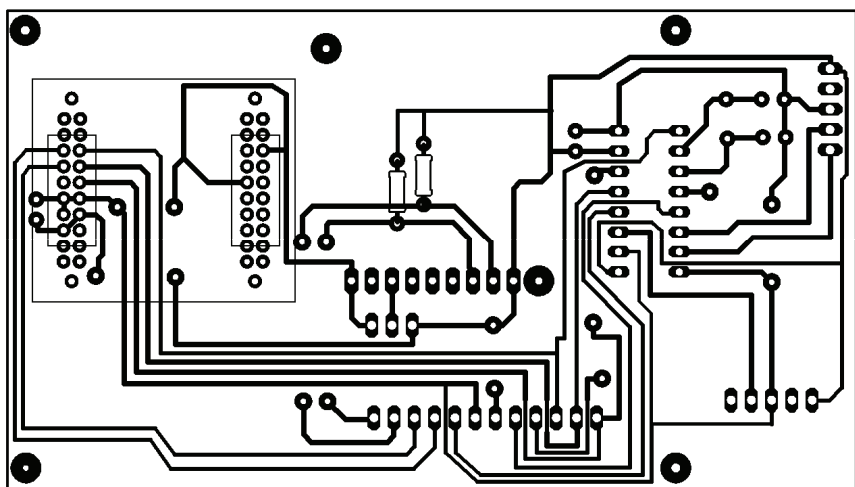
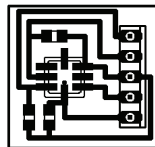
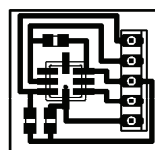
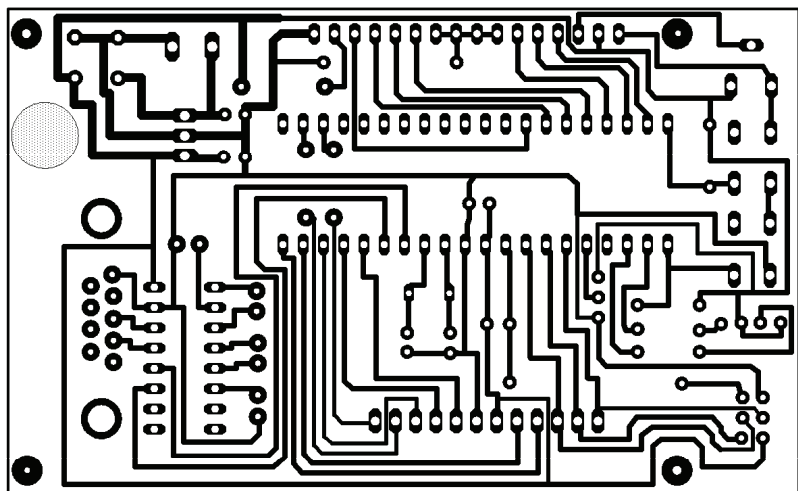


DPS_Botton

14.05.2009 23:03:04

Sheet:

Priloha c.4



DPS_Botton

14.05.2009 22:54:47

Sheet: