

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

INERCIÁLNÍ JEDNOTKA PRO MOBILNÍ ROBOTIKU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID KRAUS

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAVU MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY
A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics
0.1.1.1

INERCIÁLNÍ JEDNOTKA PRO MOBILNÍ ROBOTIKU

INERTIAL MEASUREMENT UNIT FOR MOBILE ROBOTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DAVID KRAUS
ING. JOSEF VEJLUPEK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Kraus

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Inerciální jednotka pro mobilní robotiku

v anglickém jazyce:

Inertial measurement unit for mobile robots

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sběr a vyhodnocování dat o poloze robotu pro mobilní roboty, se zaměřením na vzdušné roboty.

Cíle bakalářské práce:

- 1/ řešerše v oblasti snímačů vhodných pro danou aplikaci
 - 1.1/ akcelerometry
 - 1.2/ gyroskopy
 - 1.3/ magnetometry
 - 1.4/ tlakové snímače
- 2/ řešerše v oblasti algoritmů pro IMU
- 3/ návrh a výroba IMU (elektronika)
- 4/ návrh a výroba testovacího zařízení pro ověření a srovnání algoritmů (potřeba opakovatelnostiměření)
- 5/ návrh, implementace a srovnání algoritmů

Seznam odborné literatury:

Patočka M., Vorel P.: Řídicí elektronika - pasivní obvody

Patočka M., Vorel P.: Řídicí elektronika - aktivní obvody

Patočka M., Vorel P., Kerlin T.: Řídicí elektronika - laboratorní cvičení

www.analog.com

www.invenesece.com

www.microchip.com

www.frescale.com

www.st.com

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Vejlupek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16. 11. 2011

L.S

prof. Ing. Jindřich Petruška, Csc.
Ředitel ústavu

Prof. RNDr. Miroslav Doupovec, Csc.
Děkan fakulty

Anotace

Bakalářská práce Inerciální jednotka pro mobilní robotiku se zabývá problematikou určování polohy pomocí inerciálních senzorů. První část práce je rešerší dostupných senzorů a metod zpracování informací z nich získaných. Druhá část práce se zabývá vybraných metod a senzorů v simulaci a nasazení na reálném HW.

Klíčová slova

Inerciální měřicí jednotka, akcelerometr, gyroskop, magnetometr

Annotation

Bachelor thesis Inertial measurement unit for mobile robots is focused on problem determination of position using inertial sensors. First part is review of available sensors and methods of processing data from sensors. Second part is implementation of chosen method and sensors in simulation and use it at real HW.

Key words

Inertial measurement unit, IMU, accelerometer, gyroscope, magnetometr

KRAUS, D.: Inerciální jednotka pro mobilní robotiku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Vejlupek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně na základě rad a pokynů vedoucího práce a že jsem veškeré literární zdroje uvedl v seznamu použité literatury.

V Brně dne:

David Kraus

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Josefu Vejlupkovi za vedení a cenné rady.

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Rešerše.....	10
2.1 Senzory.....	10
2.1.1 Gyroskopy.....	10
2.1.1.1 Mechanické gyroskopy.....	10
2.1.1.2 Optické gyroskopy.....	11
2.1.1.3 MEMS gyroskopy.....	11
2.1.2 Akcelerometry.....	12
2.1.3 Magnetometry.....	13
2.1.4 GPS.....	13
2.1.5 Senzory tlaku.....	14
2.2 Matematické vyjádření natočení systému v prostoru.....	15
2.2.1 Eulerovy úhly.....	15
2.2.2 Rotační matice.....	16
2.2.3 Quaternion.....	17
2.3 Algoritmy řešení problémů IMU.....	18
2.3.1 Complementary filtr.....	19
2.3.2 Algoritmy IMU a MARG.....	20
2.3.3 Algoritmy s více akcelerometry.....	21
3 Zpracování algoritmů.....	22
3.1 Návrh simulace senzorů.....	22
3.1.1 Simulace akcelerometru.....	22
3.1.2 Simulace gyroskopu.....	23
3.1.3 Simulace magnetometru.....	23
3.2 Implementace řešení.....	24
3.2.1 Implementace algoritmu IMU pro simulaci	24
3.2.2 Implementace algoritmu MARG pro simulaci.....	25
3.2.3 Implementace pro HW.....	25
4 HW řešení IMU.....	27
5 Návrh měřicího standu.....	28
6 Experiment	30
7 Závěr.....	31
8 Seznam použitých zdrojů.....	32
9 Seznam příloh.....	34

1 Úvod

Z rozvojem techniky se různé stroje a zařízení ze sféry science-fiction nejen začínají stávat skutečností, ale dokonce je jejich realizace v možnostech menších týmů a s malým rozpočtem.

Mezi takovéto dříve nepředstavitelné objekty patří i bezpilotní letouny, často označované jako UAV (Unmanned aerial vehicle). UAV zažívají v posledních pár letech obrovský rozmach, například profesionální konstrukce používané armádou rozměry srovnatelné s pilotovanými letouny (General Atomics MQ-9 Reaper, Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk) nebo z druhé strany spektra open sources projekty vytvořené skupinou nadšenců (ArduPilot, OpenPilot), které umožňují z jednoduchého RC modelu vytvořit částečně nebo plně autonomní UAV.

Všechny projekty, ať malé nebo velké, mají společnou jednu věc. Pro řízení jakéhokoli objektu potřebujeme informace o jeho stavu. Na množství a kvalitě těchto informací závisí, jestli a jak přesně budeme schopni daný stroj řídit.

IMU (Inertial Measurement Unit) je zařízení, které měří relativní polohu objektu. Pro měření se používají akcelerometry, gyroskopy a případně další senzory. Teoreticky se ze změřených dat dá pomocí integrace jednoduše zjistit poloha od počátečního bodu. Reálně se ve výpočtech vyskytují různé chyby (zaokrouhlovací, šum ze senzorů), které tento úkol velmi znesnadňují.

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši možností jak získat a zpracovat informaci o poloze objektu a vybrané metody v praxi vyzkoušet, vytvořit IMU a vyhodnotit výsledky měření.

2 Rešerše

2.1 Senzory

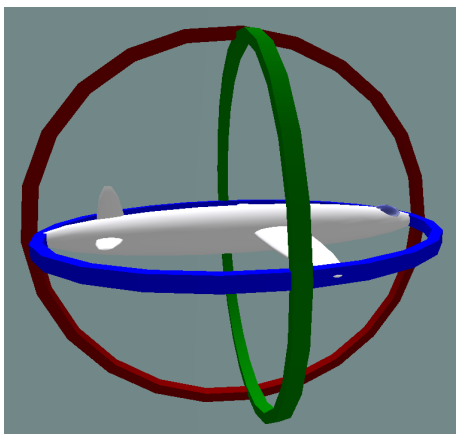
Základem IMU jsou inerciální senzory, což jsou akcelerometry a gyroskopy. Pro další zpřesnění informací se používají další senzory, například magnetometr, GPS lokátor a barometrické senzory.

2.1.1 Gyroskopy

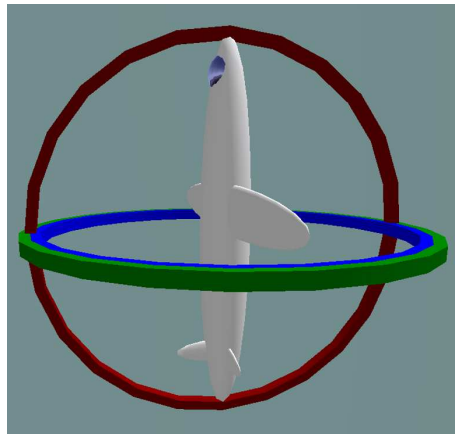
2.1.1.1 Mechanické gyroskopy

První inerciální navigační systémy obsahovaly mechanický gyroskop (setrvačník) roztočený na velké otáčky. Tyto systémy využívaly skutečnosti, že rotující předmět má snahu zachovat osu své rotace (zákon zachování momentu hybnosti [1]). Setrvačník byl uložen na kardanovém závěsu s velmi přesnými ložisky pro dosažení minimálního tření. Na každé ze tří os rotace kardanového závěsu je senzor natočení a jejich odečtením se získá natočení rámu soustavy oproti počáteční poloze. Tyto systémy měly několik problémů, které se dařilo s větším či menším úspěchem řešit.

Jeden z problémů byl efekt zvaný Gimbal lock, kdy nevhodné natočení jednotlivých obručí vůči sobě způsobí ztrátu měření jedné osy rotace (dvě osy rotace jsou rovnoběžné). Obdobný problém nastává i při popisu systému pomocí Eulerových úhlů, viz kap. 2.2.1.



Normální stav



Systém v „Gimbal Lock“

Zdroj: Wikipedia < http://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal_lock >

Mechanické gyroskopy se dnes už téměř nepoužívají pro svou vysokou cenu a možnou nepřesnost, případně poruchovost z důvodu velkého množství pohyblivých součástí, jsou nahrazovány senzory pracujícími na odlišném principu.

2.1.1.2 Optické gyroskopy

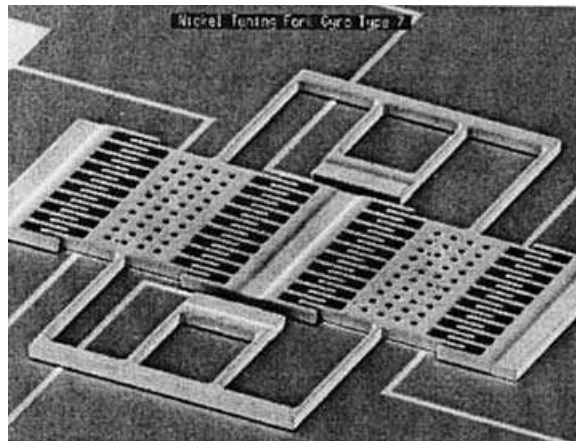
Náhradou mechanických gyroskopů jsou často velmi přesné gyroskopy pracující na principu Sagnacova jevu. V gyroskopu je uzavřená optická dráha, do které se z obou stran pustí paprsek světla (laser). Pokud se gyroskop otáčí, paprsek z jedné strany optické dráhy urazí o něco delší dráhu než paprsek ze strany druhé, z výsledné interference obou paprsků se dá určit úhlová rychlost optické dráhy.

Tyto senzory dosahují velmi vysokých přesností, ale bohužel jsou to přístroje příliš složité, a tedy velmi drahé. To je vylučuje z použití v malých UAV.

2.1.1.3 MEMS gyroskopy

Nejčastěji používané a z hlediska dostupnosti, ceny a funkce nejvhodnější jsou gyroskopy vyrobené technologií MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Tyto senzory nejčastěji pracují na principu Coriolisova jevu.

Rotační pohyb je nahrazen malým periodicky se opakujícím pohybem (vibrací) a je měřena síla v kolmém směru. Tenhle princip má více způsobů realizace (tuning fork, piezoelectric place viz [2] nebo další zdroje).



MEMS gyroskop, provedení Tuning Fork

Zdroj: [3]

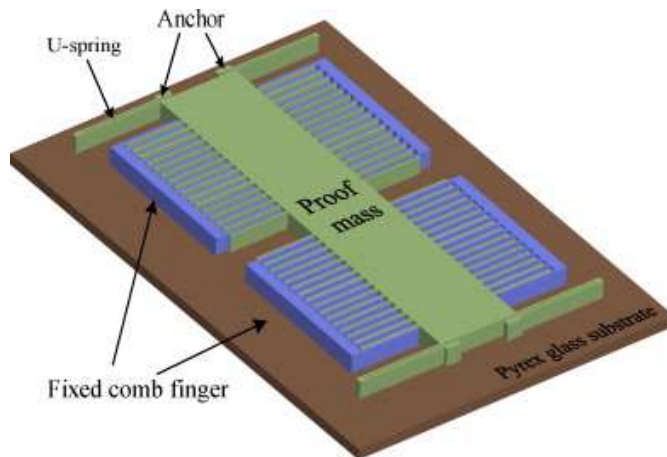
2.1.2 Akcelerometry

Další důležitou částí IMU jsou akcelerometry. Akcelerometr je snímač měřící zrychlení na něho působící. Akcelerometr měří celkové zrychlení, nelze z něj tedy přímo rozpoznat jednotlivé složky výsledného vektoru: gravitační zrychlení, lineární zrychlení, normálové a tečné zrychlení.

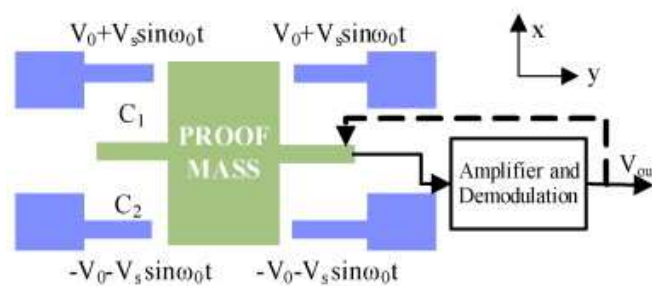
Moderní akcelerometry jsou také vyráběny pomocí technologií MEMS. Princip senzoru je jednoduchý. Zařízení se dá představit jako závaží o známé hmotnosti připevněné na pružině se známou tuhostí. Pokud změříme výchylku, můžeme zrychlení jednoduše vypočítat podle vzorce

$$F = k \cdot x, F = m \cdot a \rightarrow a = \frac{k \cdot x}{m} \quad (1)$$

Tato výchylka může být měřena pomocí různých metod. Nejčastější jsou kapacitní nebo odporové snímače.



(a)



(b)

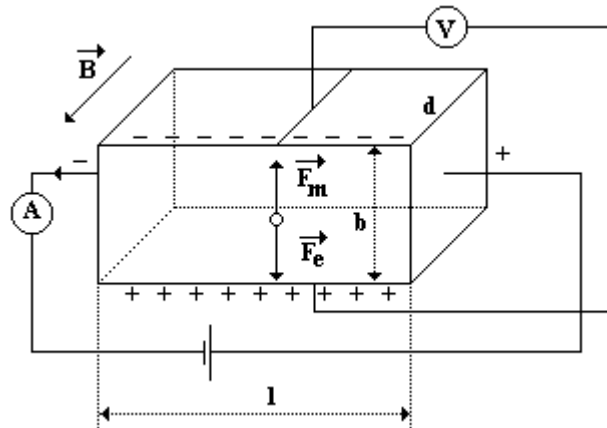
(a) schéma reálného provedení MEMS akcelerometru

(b) náčrt principu MEMS akcelerometru

Zdroj : [4]

2.1.3 Magnetometry

Vhodným doplněním akcelerometrů a gyroskopů jsou magnetometry – senzory měřící velikost a směr magnetického pole. Tyto senzory pracují na různých principech, jeden z nich je Hallův jev. Pokud do magnetického pole vložíme destičku z vhodného materiálu (polovodiče) a necháme jí procházet proud, na jejích stranách naměříme tzv. Hallovo napětí. Toto napětí je vyvoláno vychýlením nosičů náboje magnetickým polem.



Zobrazení základního principu Hallova jevu

Zdroj:[5]

2.1.4 GPS

Dalším užitečným senzorem je přijímač systému GPS. Systém GPS (Global position systém) byl původně vojenský systém na určení polohy kdekoli na světě, budovaný pro americkou armádu. Je tvořen 24 družicemi obíhajícími Zemi ve výšce 20 000 km na 6 oběžných drahách. Tyto družice na palubě nesou atomové hodiny s přesným časem, na kterém je celý systém založen. V pravidelných intervalech vysílá družice signál, ve kterém jsou zaznamenány její poloha, čas vyslání signálu a přibližná poloha dalších družic. Pokud přijímač „vidí“ dostatečné množství družic (min. 3 pro 2D polohu, 4 pro 3D), z polohy družic a času letu signálu dopočítá svoji polohu. Přesnost systému GPS, dostupná dnes pro civilní sektor, je v řádu metrů, což nestačí pro řízení UAV, ale jako další prvek používaný pro navigaci je tento systém velmi vhodný.

2.1.5 Senzory tlaku

Senzory tlaku se dělí na tři základní skupiny pole tlaků, které měří:

- **Absolutní** – měřený tlak je vztažen vůči vakuu
- **Diferenciální** – měří rozdíl 2 přivedených tlaků
- **Mano-metrický** – měřený tlak je vztažen k tlaku atmosférickému

převzato z [6].

Další možné dělení je podle způsobu měření například piezoelektrické, piezoodporové, kapacitní nebo další různé konstrukce. Moderní tlakové snímače jsou dodávány s vestavěnými kompenzacemi a kalibrovány výrobcem.

Tlakové senzory se dají využít pro doplnění informace, jak se letoun (UAV) pohybuje vůči okolnímu vzduchu. Mezi jednoduše zjistitelné veličiny patří dopředná rychlost, která je vypočtena z rozdílu statického (barometrického) tlaku vzduchu a dynamického tlaku vzduchu. Ze statického tlaku vzduchu je také možné získat barometrickou výšku, protože průběh změny tlaku s výškou je známý. Poslední důležitou hodnotou, kterou můžeme získat, je vertikální rychlost, kterou pilotům skutečných letadel ukazuje přístroj zvaný variometr. Vertikální rychlost je závislá na změně statického tlaku vzduchu za čas.

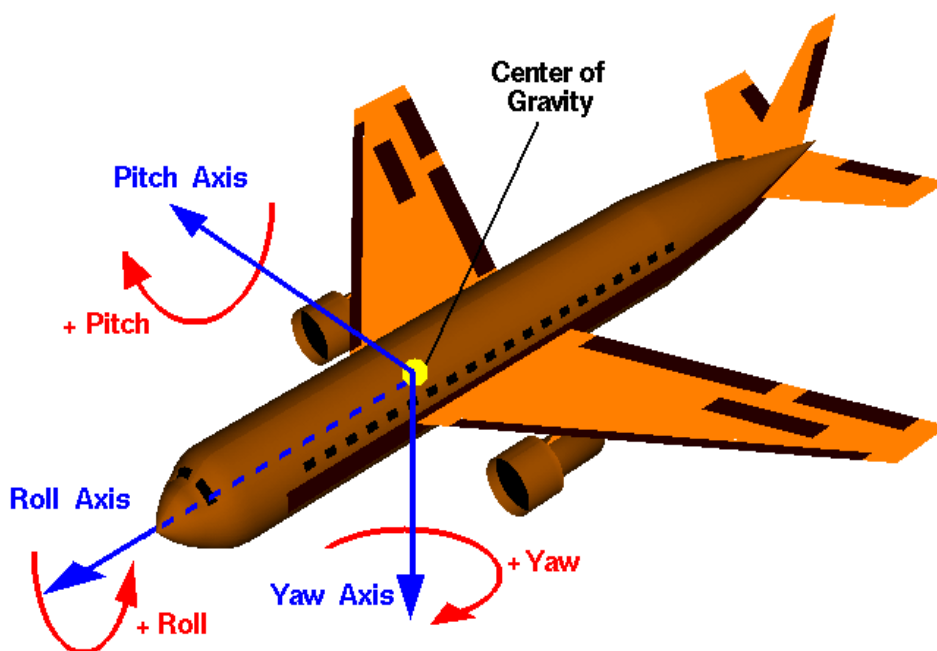
2.2 Matematické vyjádření natočení systému v prostoru

Pro vyjádření natočení se používá několik metod, každá má svá pro a proti, zde uvedu základní vlastnosti a principy některých metod.

2.2.1 Eulerovy úhly

V letectví pravděpodobně nepoužívanější vyjádření natočení objektů v prostoru. Natočení je vyjádřeno pomocí tří úhlů:

- pitch – rotace kolem příčné osy
- roll – rotace kolem podélné osy
- yaw – rotace kolem svislé osy



ilustrace jednotlivých úhlů aplikovaných na letadlo

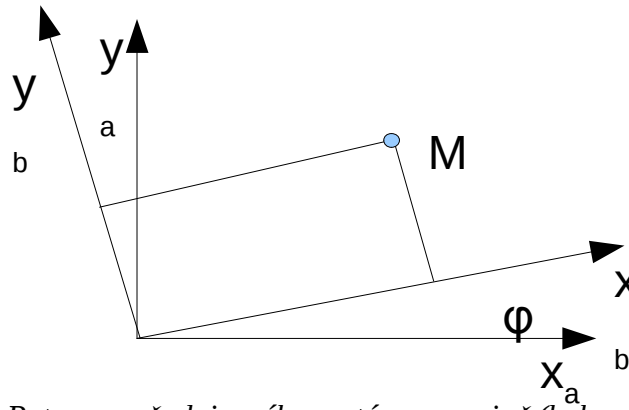
Zdroj: [7]

Toto označení odpovídá také úhlům měřeným pomocí mechanických gyroskopů, a trpí stejným problémem (singularitou) - Gimbal lock.

Výhodou Eulerových úhlů je relativní jednoduchost při představení si výsledné polohy objektu.

2.2.2 Rotační matice

Rotační matice definuje transformaci z jednoho souřadného systému do druhého. Pro názornost principu uvedeme odvození rotační matice v rovině. převzato z [8]



Rotace souřadnicového systému v rovině (kolem osy z)

Rotaci systému můžeme považovat za vzájemné natočení dvou souřadnicových systémů, z nichž jeden reprezentuje počáteční polohu a druhý polohu koncovou. Pokud známe souřadnice bodu M v jednom souřadnicovém systému, jednoduše dopočítáme souřadnice v systému druhém pomocí následujících rovnic:

$$x_a = \cos(\phi) \cdot x_b - \sin(\phi) \cdot y_b \quad (2)$$

$$y_a = \sin(\phi) \cdot x_b + \cos(\phi) \cdot y_b \quad (3)$$

Po přepsání těchto rovnic do maticového tvaru dostaneme

$$\mathbf{r}_a^M = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{ba} \mathbf{r}_b^M \quad (4)$$

Kde $\mathbf{r}_a^M$ a $\mathbf{r}_b^M$ jsou polohové vektory bodu M v jednotlivých souřadnicových systémech a $\mathbf{R}_{ba}$ je rotační matice ze systému b do a.

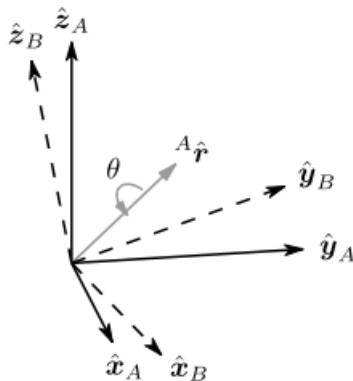
Analogicky se sestojí rotační matice v prostoru, která má rozměr 3x3. Obecný tvar rotační matice je složitější, protože v prostoru je rotace dána třemi úhly, v rovině jen jedním.

Výhodou rotační matice je, že absolutně určuje rotaci tělesa a není náchylná na gymbal lock.

Nevýhodou rotační matice je její relativně velká paměťová a výpočetní náročnost, i pokud se využije souměrnost kolem hlavní diagonály, je potřeba 6 různých hodnot. Další nevýhodou je, že intuitivně nejsme schopni nebo intuitivně nelze z rotační matice zjistit natočení tělesa.

2.2.3 Quaternion

Quaternion je čtyřrozměrné komplexní číslo, které může být použito pro reprezentaci natočení. Natočení jednoho souřadného systému vůči jinému může být vyjádřeno pomocí rotace kolem obecné osy.



Orientace souřadnicového systému B jako rotace souřadnicového systému A o úhlu θ kolem osy ${}^A\hat{\mathbf{r}}$. Převzato z [9]

$${}^A_B\hat{\mathbf{q}} = [q_1 q_2 q_3 q_4] = [\cos(\frac{\theta}{2}) \quad -r_x \sin(\frac{\theta}{2}) \quad -r_y \sin(\frac{\theta}{2}) \quad -r_z \sin(\frac{\theta}{2})] \quad (5)$$

Kde θ je úhel otočení kolem osy ${}^A\hat{\mathbf{r}}$, hodnoty r_x, r_y, r_z jsou složky jednotkového vektoru ${}^A\hat{\mathbf{r}}$ promítnuté do jednotlivých os.

Násobení quaternionů se řídí Hamiltonovým pravidlem [9], [10]. Pro značení této operace budeme používat symbol $\otimes$. Zápis Hamiltonova pravidla v maticovém tvaru:

$$a \otimes b = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4] \otimes [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4] = \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 \\ a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 + a_4 b_1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

Třírozměrný vektor lze rotovat z jednoho souřadnicového systému do druhého pomocí následujícího vztahu:

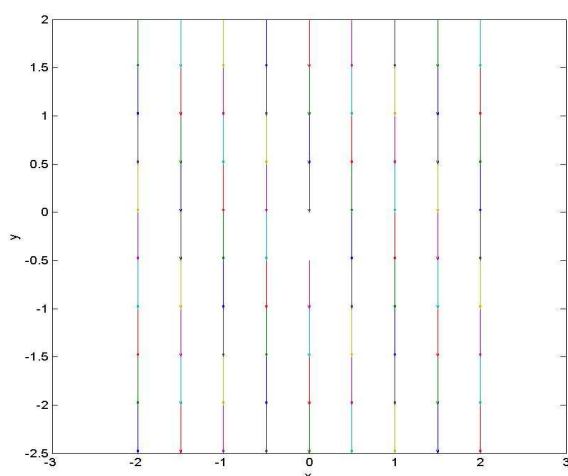
$$\mathbf{v}^B = {}^A_B\hat{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{v}^A \otimes {}^A_B\hat{\mathbf{q}}^t \quad (7)$$

$\mathbf{v}^a$ respektive $\mathbf{v}^b$ je vektor vyjádřený v souřadném systému A respektive B. Pro vytvoření čtyřrozměrného vektoru je doplněna na prvním místě 0.

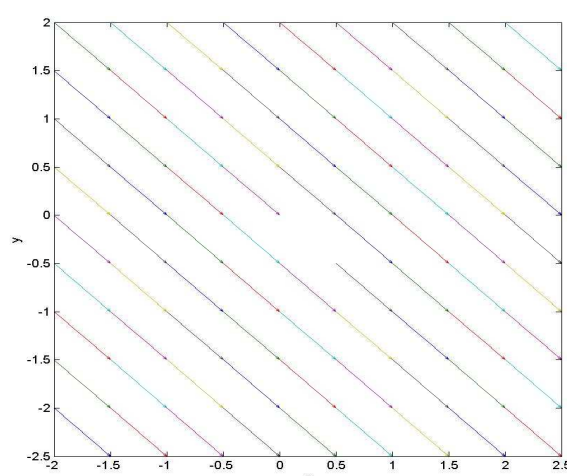
2.3 Algoritmy řešení problémů IMU

Pouhá surová data ze senzorů jsou zatížena často dosti velkou chybou, je potřeba je dále zpracovat, aby byla použitelná pro řízení. Každý senzor je náchylný na určitý druh chyb.

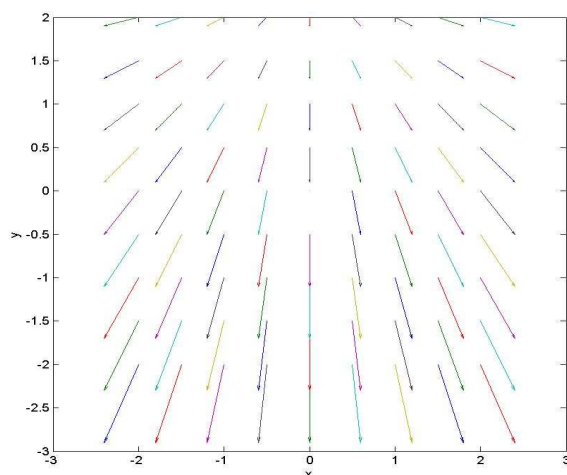
Akcelerometr – mimo „standardní“ bílý šum je akcelerometr ovlivněn vibracemi, které závisejí na jeho upevnění a na tom, v jakém prostředí je použit. Další významný faktor, pokud akcelerometr chceme použít k určení náklonu pomocí průmětu gravitačního zrychlení do jednotlivých os akcelerometru, je dostředivé, lineární a úhlové zrychlení, jak ukazují následující grafy. Na grafech je vektorové pole zrychlení, které by naměřil senzor v jednotlivých bodech. Pokud je přítomna rotace, její osa prochází počátkem soustavy souřadné.



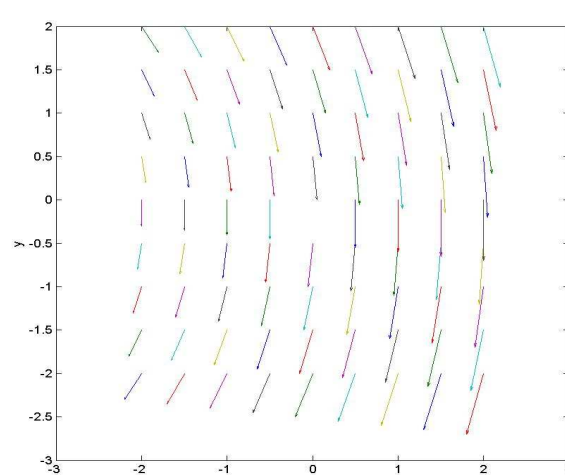
soustava v klidu v tíhovém poli



soustava v tíhovém poli zrychlující ve směru osy x



soustava v tíhovém poli otáčející se rychlostí ω



soustava v tíhovém poli s úhlovým zrychlením α

Úkolem algoritmů je potlačit všechny nebo některé negativní vlivy, aby co nejméně ovlivňovaly měřenou veličinu.

Gyroskop – teoreticky je možné pouhou integrací hodnot naměřených gyroskopem zjistit natočení soustavy v každém okamžiku. Bohužel z reálných dat zatížených chybou měření se i velmi malá odchylka vlivem integrace výrazně projeví na naměřených datech.

2.3.1 Complementary filtr

Základní myšlenku sloučení dat ze senzorů představuje Complementary filtr. Data z gyroskopů jsou spolehlivá pouze v krátkém časovém úseku, po delší době jsou zatížena velkou chybou. Naopak akcelerometry jsou v průměru za delší dobu spolehlivé, ale jednotlivá měření mohou být zatížena šumem. Complementary filtr využívá stability akceleroetrů, a zároveň rychlé a relativně přesné okamžité reakce gyroskopů.

Princip filtru uvedeme na jednoduchém případu měření náklonu v 1 ose, kdy budeme předpokládat že náklon určíme pomocí průmětu gravitačního zrychlení do vodorovné osy x. Úhel α , o který je senzor natočen, získáme pomocí rovnice:

$$\alpha = \sin^{-1}(acc_x) \quad (8)$$

Kde:

acc_x hodnota naměřená akceleroetrem v ose x [g]

Pokud budeme uvažovat malé úhly natočení, použijeme zjednodušení $\sin(x) = x$. Hodnotu natočení pomocí gyroskopu dostaneme jednoduchou numerickou integrací:

$$\alpha = \alpha + d_t * gyro \quad (9)$$

Sloučení rovnic (8) a (9), a zároveň použití low-pass a high-pass filtru pro využití pouze relevantních dat vyjádříme:

$$\alpha = (weight_{gyro}) \cdot (\alpha + gyro * dt) + (1 - weight_{gyro}) \cdot (acc_x) \quad (10)$$

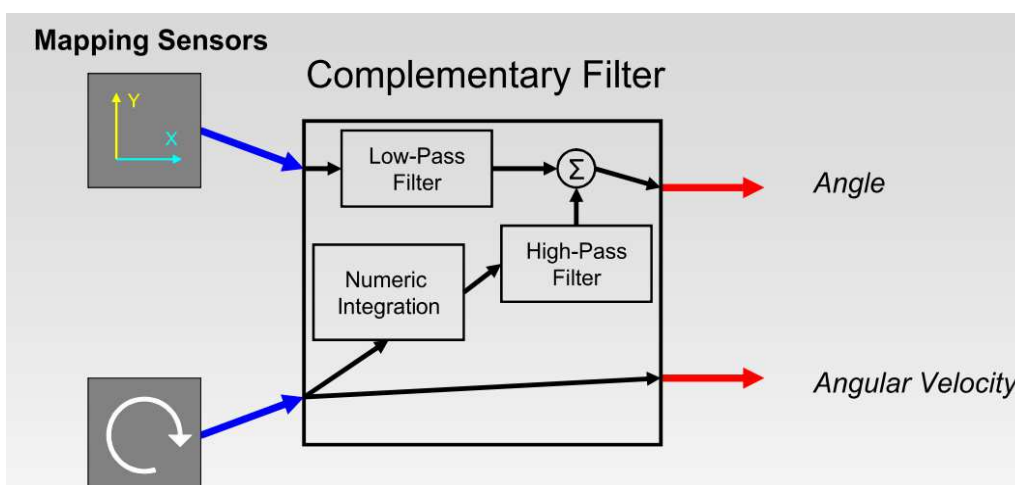
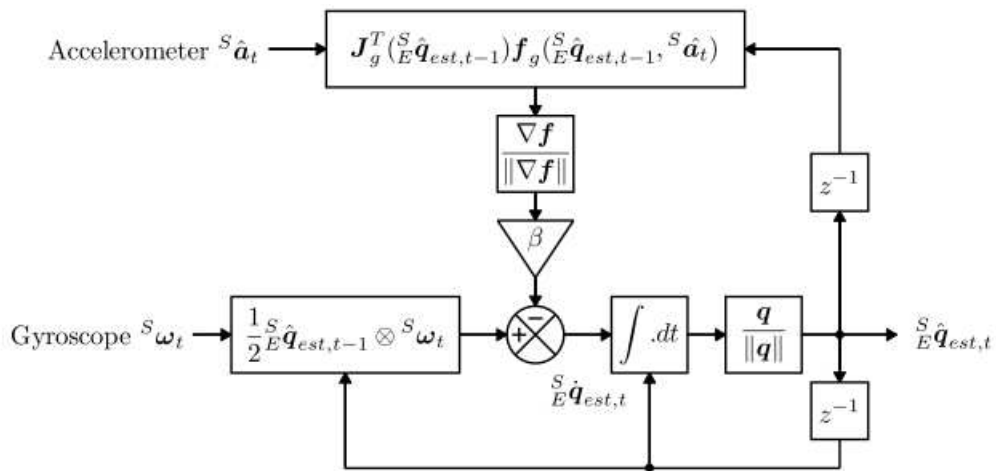


Schéma jednoduchého complementary filtru Zdroj [11]

Pokročilejším využitím principu complementary filtru se zabývá [12]. V článku je vysvětleno základní zpracování dat z AD převodníku a výpočet natočení z průmětů gravitačního zrychlení do jednotlivých os. Určitou nevýhodou tohoto algoritmu je, že výstupem nejsou úhly natočení, ale jen vyfiltrované zrychlení.

2.3.2 Algoritmy IMU a MARG

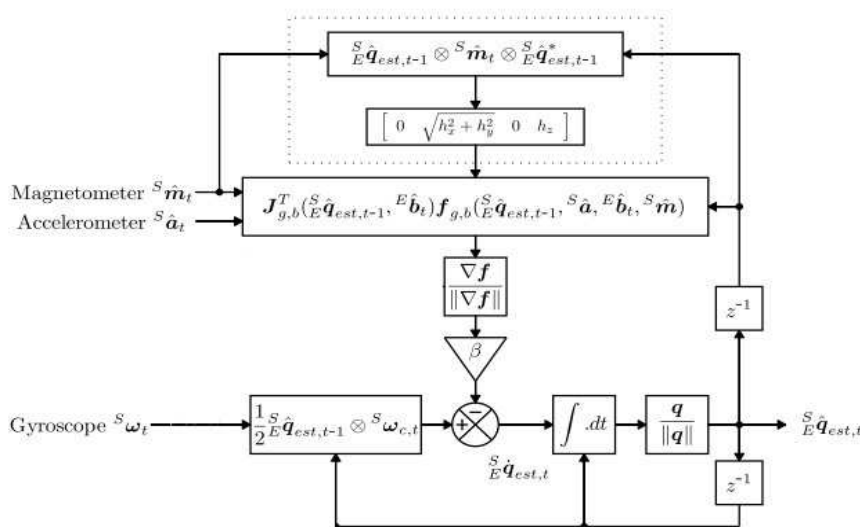
Algoritmus IMU popsáný v [9] má obdobnou základní myšlenku jako complementary filtr: data z akcelerometru využít pro dlouhodobou stabilitu a gyroskop pro potlačení šumu akcelerometru a jeho náchylnosti na vibrace. Pouze pomocí akcelerometru a gyroskopu nejsme schopni zjistit rotaci systému kolem vertikální osy.



Blokový diagram implementace filtru IMU Zdroj:[9]

Jeden ze základních prvků algoritmu je zjištění polohy z akcelerometrů. Pro vyjádření polohy v quaternionu potřebujeme zjistit kompletní řešení - natočení kolem všech os. Tuto informaci nejsme schopni jen z akcelerometrů a gyroskopů získat, protože nemáme informaci o natočení kolem vertikální osy. Jedním z možných řešení tohoto problému je použití optimalizačního algoritmu, který určí nejpravděpodobnější řešení. Vstup do tohoto algoritmu je rozdíl odhadu polohy z předcházejícího kroku a polohy zjištěné aktuálním čtením dat z akcelerometru. Autorem práce byl zvolen algoritmus gradient descent (metoda největšího spádu), který byl implementován pomocí Jakobiánu a charakteristické funkce. Další část algoritmu vypočítá změnu quaternionu z minulé pozice a hodnoty získané z gyroskopu. Po váhovém součtu se provede integrace quaternionu, následnou normalizací se quaternion stane jednotkovým vektorem, který reprezentuje nový odhad natočení.

Druhá časť algoritmu pracujúci s gyroskopom zostala stejná jako v IMU.



2.3.3 Algoritmy s více akcelerometry

Další variantou použití více akcelerometrů jsou „gyro-free“ IMU, například [14], [15]. O nahrazení gyroskopů se pokoušejí z důvodů nižší ceny a spotřeby dokonce v projektu EcoIMU [15] dosáhly menšího driftu úhlové rychlosti s akcelerometry než s použitím gyroskopu.

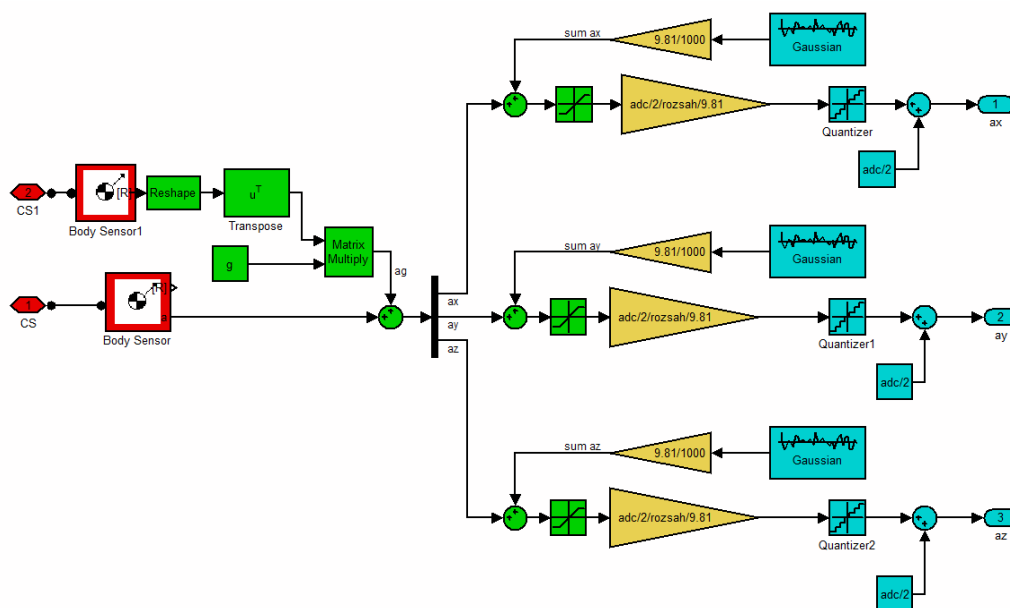
3 Zpracování algoritmů

3.1 Návrh simulace senzorů

Pro ověření chování jednotlivých algoritmů byly navrženy modely senzorů akcelerometru gyroskopu a magnetometru. Tyto senzory byly navrženy pro připojení na model postihující dynamiku soustavy. Tento model byl vytvořen pomocí knihovny SimMechanics v MATLAB/Simulink. Tento nástroj byl zvolen s ohledem na jednoduché vytvoření všech základních pohybů, které jsou vhodné pro testování algoritmů.

3.1.1 Simulace akcelerometru

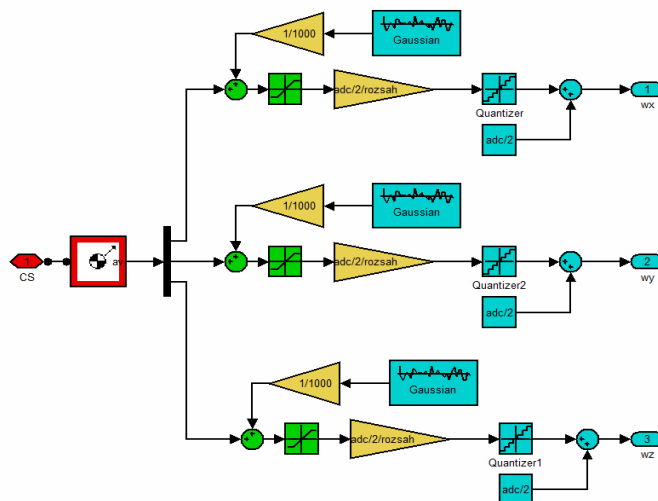
Knihovna SimMechanics obsahuje blok Body Sensor, ze kterého lze získat zrychlení tělesa (Body), ke kterému je senzor připojen. Bohužel tento virtuální senzor snímá pouze zrychlení vyvolané pohybem v souřadném systému senzoru (local), nesnímá složku gravitačního zrychlení. Tuto složku musíme doplnit pomocí rotace vektoru gravitačního zrychlení g , pomocí rotační matice získané také z Body Sensor, který snímá natočení v souřadné soustavě absolutní (world). K takto získané hodnotě zrychlení v jednotlivých osách senzoru přičteme šum pro simulaci šumu senzoru převedený na správné jednotky. Dalším krokem je konverze sečtených hodnot zrychlení v m/s^2 a konverze na vyjádření hodnoty v g . Takto vyjádřené hodnoty zrychlení omezíme saturací pro vyjádření rozsahu senzoru. Hodnotu zrychlení převedeme na hodnotu, která odpovídá výstupu z AD převodníku senzoru. Tento typ výstupu byl zvolen z důvodu jednoduchého přechodu ze simulace k reálnému experimentu. Všechny důležité hodnoty jsou editovatelné pomocí masky subsystému.



Vnitřní struktura subsystému simulace akcelerometru

3.1.2 Simulace gyroskopu

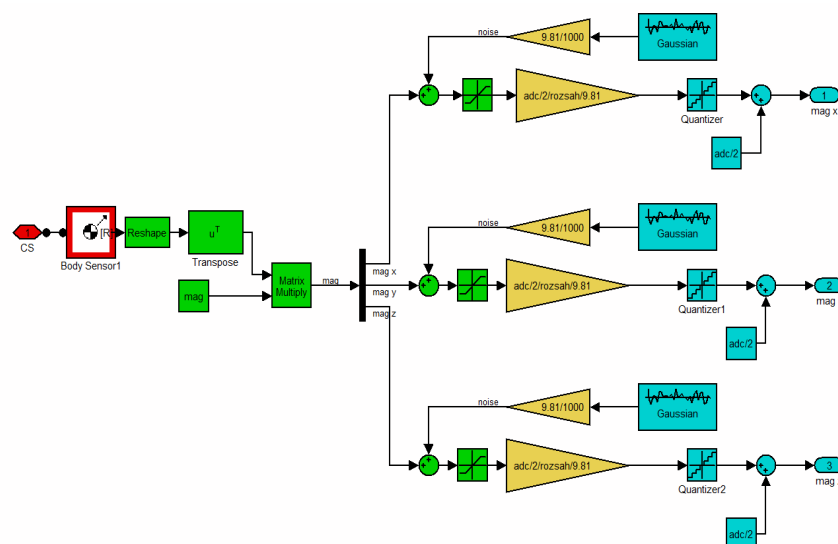
Simulace gyroskopu je vytvořena obdobně jako simulace akcelerometru. Je jednodušší, protože z bloku Body Sensor přímo dostaneme velikost úhlové rychlosti. Tuto pouze omezíme pomocí bloku saturace a převedeme na hodnotu, která odpovídá výstupu AD převodníku senzoru.



Vnitřní struktura subsystému simulace akcelerometru

3.1.3 Simulace magnetometru

Model magnetometru je z velké části shodný s modelem akcelerometru. V modelu zůstala pouze část s rotací vektoru vyjadřující dané pole, v tomto případě magnetické. Po provedení průmětu vektoru magnetického pole do souřadného systému senzoru (provedeno pomocí rotační matice) znovu data zpracujeme, aby výstup byl co nejvíce podobný výstupu z AD převodníku.



Vnitřní struktura subsystému simulace akcelerometru

3.2 Implementace řešení

3.2.1 Implementace algoritmu IMU pro simulaci

Algoritmus popsaný v kapitole 2.3.2, převzatý z [9], byl upraven a přepsán tak, aby splňoval podmínky pro použití Embedded MATLAB Function. Tento typ funkce byl zvolen z důvodu následného automatického generování kódu v jazyce ANSI C.

Vstupní data pro tento algoritmus byla generována pomocí výše popsaných modelů senzorů, které byly připojeny na model vytvořený pomocí bloků knihovny SimMechanics. Pro ověření správnosti chování algoritmu byly vytvořeny modely pro jednoduché pohyby (rotace kolem jedné osy, rotace kolem 2 os, translace).

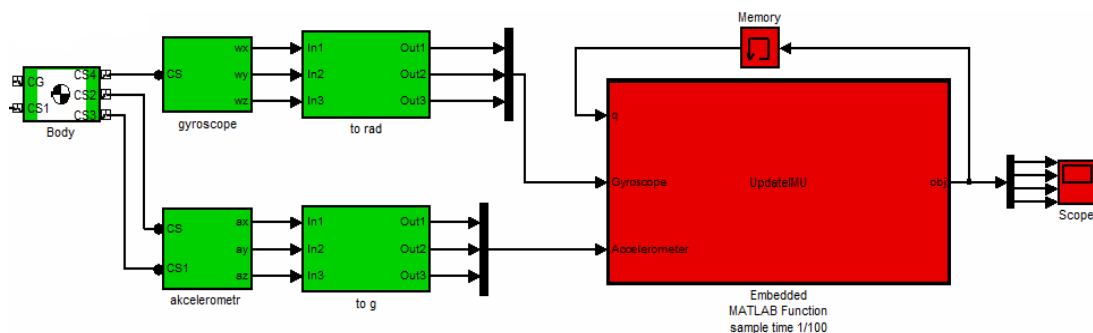
Vygenerovaná data byla pomocí dalších vytvořených bloků převedena z hodnoty AD převodníku na hodnotu s fyzikálním rozměrem, který potřebuje algoritmus IMU na vstupu (zrychlení v g , úhlová rychlost v rad/s). Tento převod byl vytvořen pomocí jednoduchého vztahu:

$$a_r = (a_{adc} - adc/2) \cdot sens \quad (11)$$

kde :

- a_r - zrychlení reálné v g
- a_{adc} - hodnota zrychlení naměřená AD převodníkem
- adc - nejvyšší hodnota AD převodníku
- $sens$ - citlivost AD převodníku

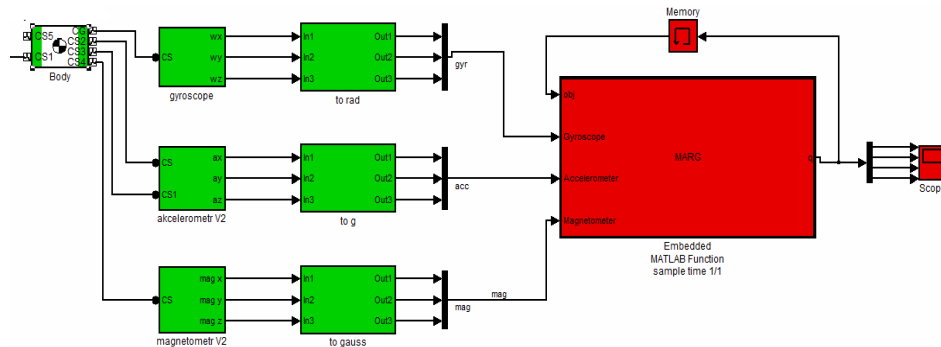
Všechny veličiny byly analogicky upraveny na správné jednotky, následně byly přivedeny na vstup bloku Embedded MATLAB Function s funkcí IMU. Algoritmus potřebuje předcházející odhad polohy, který na vstup přivedeme pomocí bloku Memory. Počáteční podmínka, vyjadřující počáteční polohu, musí být zvolena co nejbližže skutečné počáteční poloze, případně musí být před měřením nechán algoritmu dostatečně dlouhý čas na nalezení skutečné polohy. Výstupem funkce je odhad polohy vyjádřený quaterionem, který je přiveden do bloku Scope a následně uložen do Workspace pro případné další zpracování. Výsledky byly vizualizovány pro potvrzení funkčnosti algoritmu.



Model implementace IMU v Simulinku

3.2.2 Implementace algoritmu MARG pro simulaci

Algoritmus MARG byl implementován obdobně jako IMU. Pomocí bloku Embedded MATLAB Function byl implementován algoritmus MARG [9], na jehož vstup byla přivedena všechna data z akcelerometru, magnetometru a gyroskopu ve správných jednotkách.



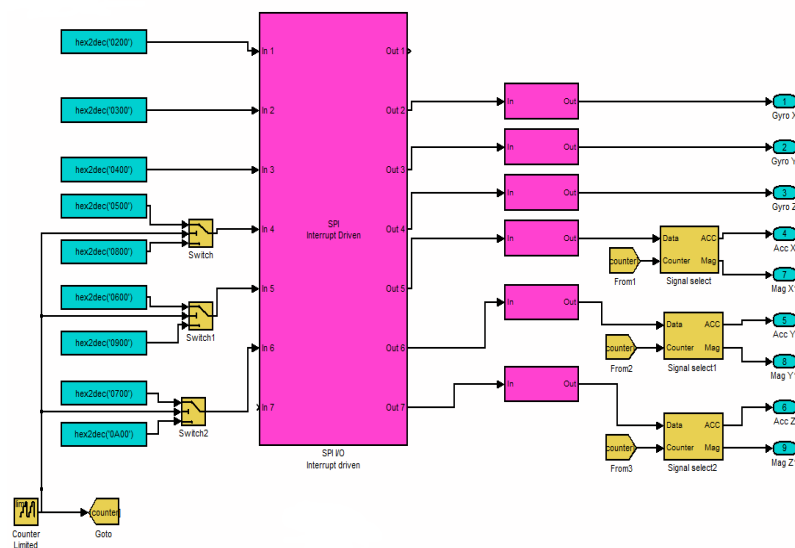
Model implementace IMU v Simulinku

3.2.3 Implementace pro HW

Celý model byl vytvářen s ohledem na jednoduché přenesení ze simulace na skutečný námi zvolený HW (viz kap. 4). To znamenalo dodržet podmínky, aby bylo možné použít nástroje Embedded Target for dsPIC [16], který automaticky generuje z modelu Simulinku ANSI C pro mikrokontroléry typu dsPIC.

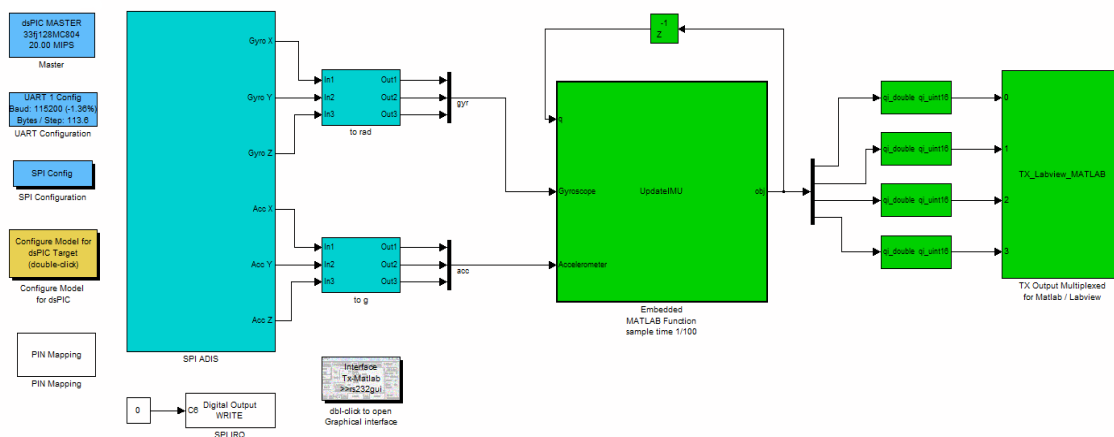
Úprava výše uvedeného modelu, určeného pro simulace, spočívala v přidání bloků z knihovny Embedded Target for dsPIC pro základní konfiguraci mikrokontroleru (bloky Master, Pin Mapping, Configure Model for dsPIC Target) a dalších bloků pro konfiguraci komunikačních periférií UART a SPI (UART Configuration, SPI Configuration).

Komunikace mikrokontroléru (viz výše) se senzorem byla realizována pomocí bloku SPI Interrupt Driven. Tento blok byl nastaven s ohledem na postupy stanovené v datasheetu [17]. Bohužel v datasheetu jsou uvedeny chybné adresy jednotlivých pamětí, správné byly převzaty z [18], stejně jako zpracování přijatých dat. Dále bylo zjištěno, že jsme schopni přenést ze senzoru ADIS pouze 6 hodnot. Pro implementaci algoritmu MARG jsme potřebovali přenést hodnot 9. Z toho důvodu bylo rozhodnuto upravit SPI komunikaci. Blok SPI ADIS MARG přenáší hodnotu gyroskopu při každé iteraci, hodnoty magnetometru a akcelerometru při každé druhé iteraci. Při kroku, kdy algoritmus nemá data aktuální, použije hodnotu z minulého měření. Tímto způsobem přenosu zajistíme, že rychlost reakce na změnu, která je závislá na gyroskopu, nebude ovlivněna a na dlouhodobou stabilitu bude stačit i menší frekvence čtení dat z akcelerometru a magnetometru. Přepínání bylo řízeno pomocí bloku Counter limited a switch. S ohledem na toto přepínání musely být upraveny bloky starající se o správné vyhodnocení znaménka získané hodnoty a nahrazení ztracených dat převzatých z [18].



Vnitřní struktura bloku SPI ADIS MARG

Pro komunikaci s PC byl použit UART/RS232, který byl implementován pomocí bloku TX_Labview_Matlab také z knihovny Embedded Target for dsPIC [16]. Tento blok přijímá data jen ve formátu uint16. Výstup z algoritmu IMU je ve formátu double, proto musíme data před přenosem konvertovat.



Implementace modelu IMU pro HW, použit blok SPI ADIS pro přenos pouze 6 hodnot

4 HW řešení IMU

Pro testování jednotlivých algoritmů bylo potřeba vybrat vhodné senzory. Po prozkoumání nabídky dostupných senzorů a po konzultaci s vedoucím práce byl zvolen senzor firmy Analog Devices ADIS16405.

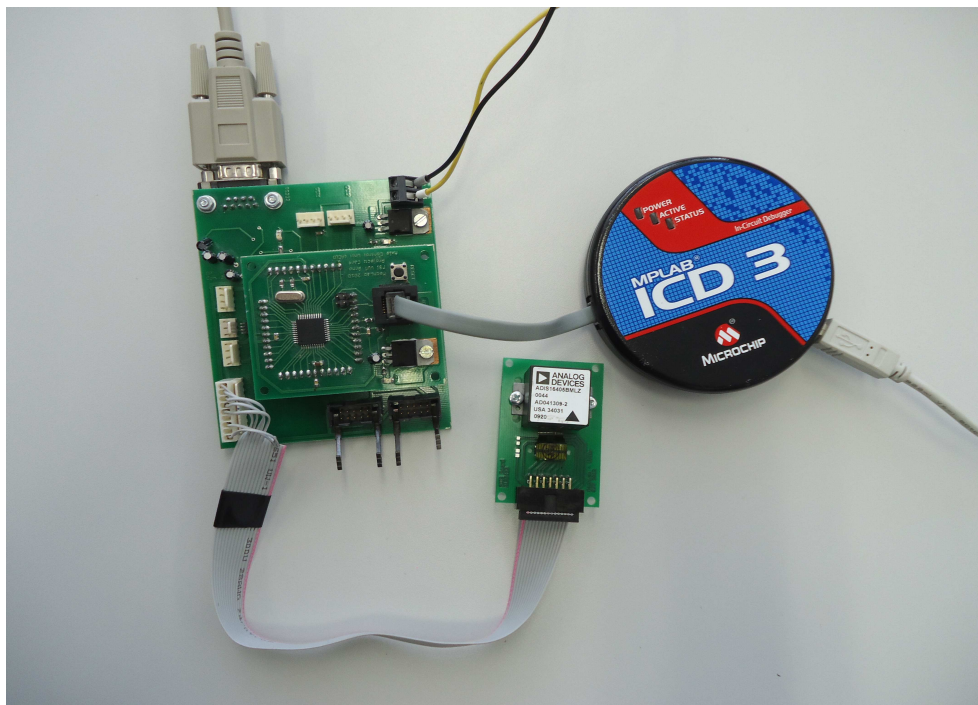
Hlavní důvody pro zvolení tohoto senzoru byly:

- malý šum na gyroskopu
- všechny tři senzory v jednom pouzdře
- jednoduchá komunikace přes SPI

Nevýhodou tohoto senzoru je rozsah gyroskopu pouze 300 °/s, který se musí zohlednit při testování, aby nedošlo k saturaci výstupu ze senzoru.

Pro vyčtení dat ze senzoru byla použita deska ACU44 vyvinutá v rámci diplomové práce Ing. Vejlupek [18]. Tato deska je osazena mikrokontrolérem (viz výše) dsPIC33FJ128MC804, který programujeme pomocí prostředí MPLAB a debuggeru ICD3. Mikroprocesor obsahuje sběrnici SPI, pomocí které komunikujeme se senzorem ADIS. Data zpracováváme programem vytvořeným automatickým generováním kódu z modelu v MATLAB/Simulink pomocí bloků Embedded Target for dsPIC [16]. Zpracovaná data posíláme pomocí UART/RS232 do počítače, kde je můžeme dále vyhodnotit.

Po domluvě s vedoucím práce nebylo nutné vytvářet návrh nového hardware, byly použity hotové ACU44 a deska pro připojení (redukce) senzoru ADIS s jednotkou ACU44.



Jednotlivé části IMU

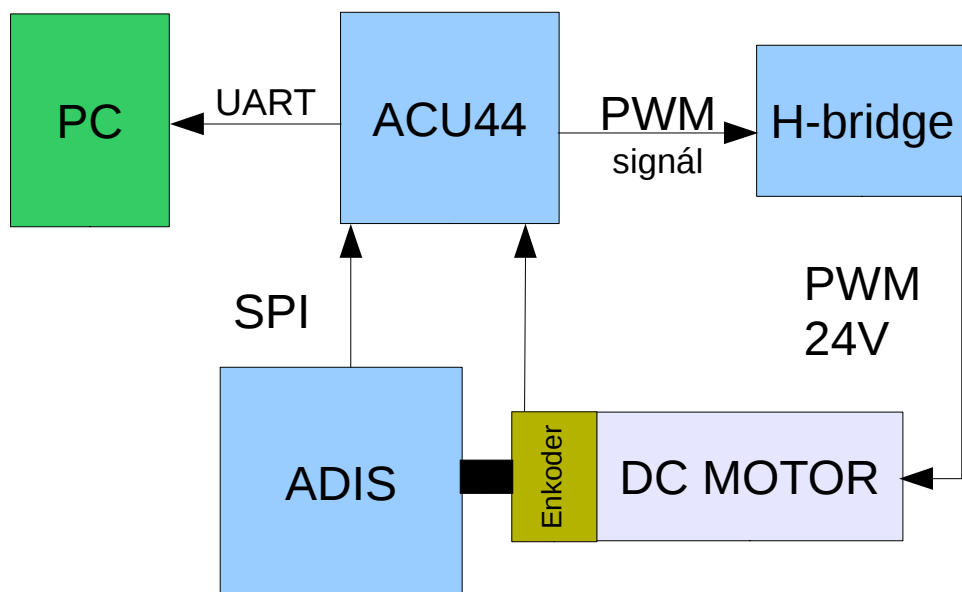
5 Návrh měřicího standu

Pro měření skutečného chování algoritmu byla zvolena jednoduchá rotace kolem jedné osy. Pro možnosti opakování experimentu byl senzor připevněn na motor Transmotec PD52103-24-39-OE, který byl uchycen na stole s výstupní osou vodorovnou. Motor je stejnosměrný, komutátorový s napájecím napětím 24 V. V těle motoru jsou také zabudovány planetová převodovka s převodem 1:39 a optický enkodér s rozlišením 2000 tiků na otáčku, což nám dává 78 000 tiků na otáčku za převodovkou. Tiky z enkodéru byly zpracovávány pomocí jednotky ACU44, po propojení byl vyroben kabel podle následujícího rozložení pinů. Piny A+ a B+ jsou komplementární s A-, B-, proto zůstaly nezapojeny.

enkodér		ACU44	
PIN	Funkce	PIN	Funkce
1	Vdd 5V	1	GND
2	A+	2	3,3
3	B+	3	A
4		4	B
5	GND		
6	A-		
7	B-		
8	GND		

Rozložení pinů na propojovacím kabelu ACU44 a enkodéru

Buzení motoru zajišťoval H-můstek vytvořený v rámci [18], řízený pomocí PWM signálu z ACU44.



Blokové schéma realizace měřicího standu

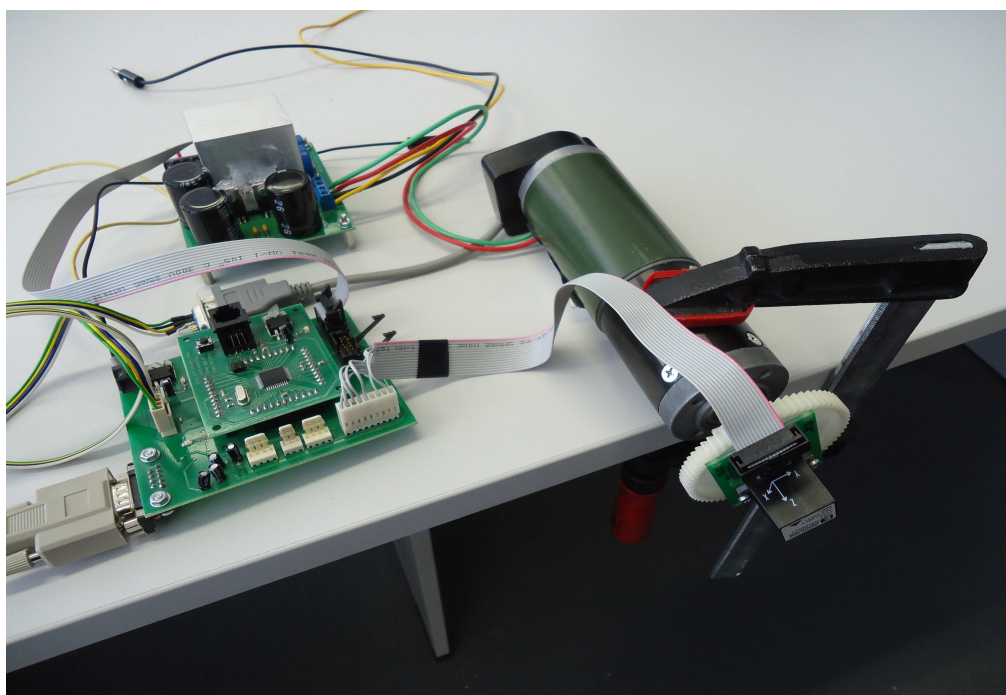


Foto měřicího stanoviště

6 Experiment

Pro provedení experimentu na navrženém stanovišti byl do modelu v Simulinku doplněn blok Motor Drive Control pro řízení a vyhodnocení rotace motoru, převzatý z [18]. Vstupem do bloku je hodnota PWM se znaménkem, směr rotace změní blok v závislosti na znaménku, druhým vstupem je Disable motoru. Výstupem bloku jsou počet tiků enkodéru a proud protékající motorem. Protože je jednotka ACU44 určena pro řízení dvou motorů, jsou všechny tyto porty na bloku dvakrát.

Navrhli jsme experiment pro ověření dynamických vlastností IMU. Motorem budeme otáčet střídavě na obě strany a sledovat změnu natočení z algoritmu, kterou budeme porovnávat se skutečnou změnou natočení známou z počtu tiků enkodéru.

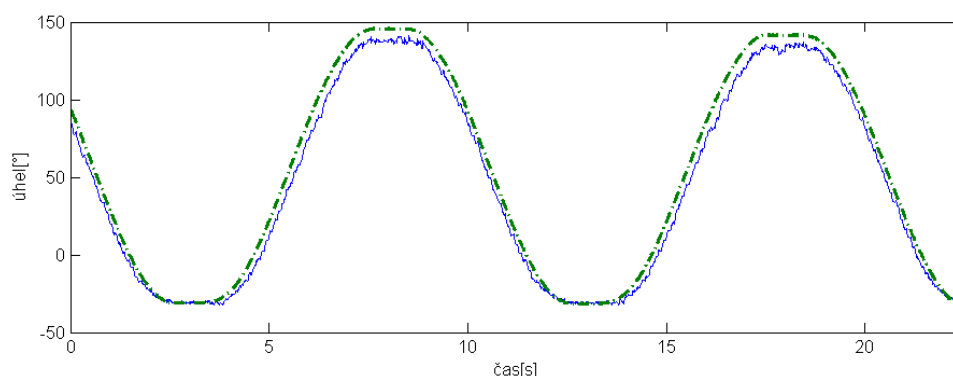
Abychom mohli zjistit reálné hodnoty úhlu, musíme quaternion vypočtený algoritmem MARG převést na vyjádření polohy pomocí Eulerových úhlů, což provedeme pomocí funkce *quatern2euler*, převzaté z [9]. Protože známe počet tiků enkodéru na otáčku výstupního kola (79 000), můžeme tuto hodnotu také jednoduše převést na úhel:

$$\alpha = \frac{n_{max}}{360} \cdot n \quad (12)$$

Kde

α	- úhel otočení
n_{max}	- počet tiků na otáčku
n	- počet tiků

Protože vybraný motor v kombinaci s převodovkou má velké množství tiků na otáčku, hrozí přetečení hodnoty čítače. Musíme zvolit vhodnou velikost a směr úhlu natočení, aby k přetečení nedošlo, nebo data následně upravit. Tyto dvě hodnoty následně porovnáme.



Graf naměřených dat, plná čára - data z MARG, čerchovaná čára - úhel odečtený pomocí enkodéru

Hodnoty odhadů polohy vytvořené algoritmem MARG odpovídají poloze skutečné. Mírná odchylka je způsobena nedokonalým zarovnáním osy rotace se souřadným systémem senzoru. Na grafu je dobře vidět, že nedochází k žádnému fázovému posunu, který by byl způsoben zpožděním algoritmu.

7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vybrat, navrhnout a ověřit zařízení a algoritmus pro určování natočení pomocí inerciálních senzorů. Pro zpřesnění výpočtů a možnosti určení natočení kolem vertikální osy bylo rozhodnuto použít magnetometr. Po provedení rešerše dostupných senzorů byl vybrán senzor od firmy Analog Devices ADIS16405. Hlavními důvody pro výběr senzoru byly obsah potřebných senzorů v jednom pouzdře a gyroskopy s malým šumem. Po upřesnění požadavků na testování metody vedoucím práce v průběhu vypracování BP nebyly GPS a tlakové senzory použity. Jejich rozlišení je přinejlepším v řádu metru, což by se při zvolených testovacích metodách projevilo jen přidáním šumu do výsledků. Na testování senzorů měl být použit pájecí robot/manipulátor Janome JSR 4400. Tento robot bohužel nebyl spolupracovníkem, který ho má na starosti, zprovozněn do konce vypracování BP. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda testování pomocí jednoduchého motoru s enkodérem.

Pro kontrolu chování byly navrženy modely senzorů, jejichž pohyb byl vytvořen pomocí bloků z knihovny SimMechanics. Chování těchto modelů bylo ověřeno pomocí jednoduchých pohybů se známými průběhy jednotlivých veličin (rotace s konstantní rychlostí, rotace s konstantním úhlovým zrychlením, lineární pohyb s konstantním zrychlením).

Pro rešerši byly vybrány pro implementaci algoritmy popsané v [9]. Důležitým faktorem při výběru bylo použití quaterionů v implementaci. Quateriony netrpí problémem Gimbal lock nebo jinou singularitou, proto jsou vhodné k vyjádření rotace pro použití v UAV. Dalším rysem algoritmu je nízká výpočetní náročnost, které je dosaženo nepoužitím goniometrických funkcí.

Algoritmy IMU i MARG byly otestovány na navržených modelech senzorů s možností porovnání odhadnuté polohy a skutečné polohy modelu senzoru. Po tomto ověření byly algoritmy přeneseny pomocí knihovny Embedded Target for dsPIC [16] a převedeny na kód ANSI C. Vygenerovaný kód byl nahrán do procesoru dsPIC33FJ128MC804, ke kterému byl připojen vybraný senzor Analog Devices ADIS16405. Algoritmy byly ověřeny experimentem, který potvrdil správné chování.

Možným rozvinutím této práce je implementace další zmíněných neinerciálních senzorů (GPS, senzory tlaku) pro možnost navigace a přesnějšího řízení UAV. Navigace jen pomocí inerciálních senzorů není možná z důvodu potřeby dvojité integrace zrychlení, která způsobí sčítání šumů senzorů a odchylek natočení odhadnutého od natočení reálného.

Další možností je rozvinutí myšlenky použít více senzorů ke snímání stejné veličiny a porovnáním hodnot získat další informace o aktuálním stavu soustavy, případně použít více snímačů s různým rozsahem pro zachování nízkého šumu při malých rychlostech a zrychleních, a zároveň nebýt omezen malou maximální rychlostí, zrychlením.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] OBŠIL, P. Obšil Zákon zachování momentu hybnosti. In: [PDF]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Zima08/proc/zzmh.pdf>
- [2] BURG, Aaron, Azeem MERUANI, Bob SANDHEINRICH a Michael WICKMANN. MEMS Gyroscopes and their applications [online]. 2004 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf>
- [3] <<http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/an-overview-mems-inertial-sensing-technology-970> >[cit. 18.5.2012]]
- [4] <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424711005309> >[cit. 18.5.2012]
- [5] <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>>[cit. 18-05-2012]
- [6] Prof. Ing. Miroslav Hus8k, CSc. , Tlakov0 senzory<<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/07a%20Piezoodporove%20%20tlakov%82%20senzory.pdf>>[cit. 2012-05-15]
- [7] <http://copterix.perso.rezel.net/?page_id=74 >[cit.7-5-2012]
- [8] <i>Kinematika a dynamika mechatronických systémů</i>. BRNO: CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3530-8.
- [9] MADGWICK, Sebastian O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. In: [Http://www.x-io.co.uk/](http://www.x-io.co.uk/) [online]. 2010 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf
- [10] Quaternion. Mathworld.wolfram.com [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/Quaternion.html>
- [11] The Balance Filter: A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform. In: <i>The Balance Filter</i> [online]. 2007 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>
- [12] A guide to using IMU in embedded applications. <i>Starlino</i> [online]. 2009 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [13] Design and Implementation of a Nine-Axis Inertial Measurement Unit. In: PEI-CHUN, Lin, Lu JAU-CHING, Tsai CHIA-HUNG a Ho CHI-WEI. IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 17, NO. 4 [online]. 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05734855>
- [14] Constrained Angular Motion Estimation in a Gyro-Free IMU. In: EDWAN, EZZALDEEN, STEFAN KNEDLIK a OTMAR LOFFELD. IEEE [online]. 2009 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05705694>
- [15] YI-LUNG, Tsai, Tu TING-TING, Bae HYEOUNGHO a Chou PAI H. EcoIMU: A Dual Triaxial-Accelerometer Inertial Measurement Unit for Wearable Applications. 2010 International Conference on Body Sensor Networks. 2010.
- [16] KERHUEL, Lubin. Kerhuel [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.kerhuel.eu/>

- [17] <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16405.pdf>[cit. 2012-05-21]
- [18] VEJLUPEK, Josef. DEVELOPMENT OF ELECTRONICS FOR TRACTION CONTROL OF EXPERIMENTAL VEHICLE. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT FSI Brno.

9 Seznam příloh

<i>quaternion_library/</i>	- knihovna funkcí pro výpočty s quateriony
<i>config_stime.m</i>	- nastavení časového kroku simulace
<i>q_plot.m</i>	- vizualizace dat získaných ze simulace
<i>REAL_IMU.mdl</i>	- model s algoritmem IMU připraven pro automatické generování kódu
<i>REAL_MAGR.mdl</i>	- model s algoritmem MARG připraven pro automatické generování kódu
<i>SIM_MAGR.mdl</i>	- model se simulací pohybu pro algoritmus MARG
<i>SIM_IMU.mdl</i>	- model se simulací pohybu pro algoritmus IMU