

Ing. Jozef Rodina

**Aplikácia inerciálnych snímačov pre riadenie mobilných robotických
platforiem**

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe
5.2.14 Automatizácia a riadenie

Bratislava 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Jozef Rodina**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Boris Rohal-Ilkiv, CSc.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Strojnícka fakulta
Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky (SjF)
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava 1

doc. Ing. Michal Kelemen, PhD.
Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky
Letná 9, 042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná
dňa 28.2.2014 o 11:00 hod

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, Bratislava, v miestnosti D424 pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie 5–2–14 Automatizácia.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU

Aplikácia inerciálnych snímačov pre riadenie mobilných robotických platforiem

Abstrakt

V predkladanej práci predstavujeme koncept mobilného robota s názvom Amphibious Mono Axial Vehicle (ďalej AMAV). Ide o dvojkolesového robota s diferenciálnym pohonom bez oporného mechanizmu, ktorého ťažisko sa mení v dôsledku vysúvania plošiny s užitočným nákladom z tela samotného robota, čím sa mení systém robota zo stabilného na nestabilný, a naopak. V práci je vypracovaný a simulačne overený koncept riadenia tohto typu robota. Na riadenie robotických systémov, akým je napríklad aj AMAV, je potrebné poznať postoj, respektíve náklon robota v priestore. Na meranie postoja sa využívajú hlavne gyroskopy. Nástupom MEMS technológií sa dostali na trh inerciálne snímače, a to konkrétne MEMS akcelerometre a MEMS gyroskopy. Tieto nám umožňujú vytvorenie snímacích subsystémov pre mobilné roboty vhodných rozmerov a v dostupných cenových hladinách. Avšak v prípade týchto snímačov je pre ich nedostatky potrebná fúzia dát získaných z jednotlivých snímačov takým spôsobom, aby sme získali použiteľné dáta v celom potrebnom dynamickom rozsahu merania. V tejto práci je na účely fúzie dát z MEMS snímačov navrhnutý a reálne overený adaptívny komplementárny filter využívajúci kvaternióny na reprezentáciu uhlovej polohy akéhokoľvek mobilného robota, kde je potrebná spätná väzba od uhlovej polohy v priestore.

Kľúčové slová: mobilný robot, mono axial vehicle, MEMS, kvaternión, komplementárny filter

Application of inertial measurement sensors in control of mobile robotics platforms

Abstract

We are presenting in this thesis a new concept of mobile robot called Amphibious Mono Axial Vehicle (AMAV) in this thesis. AMAV is a two wheeled differential driven mobile robot without stabilizing mechanism, which is able to push out payload from the body. This causes position change of the center of the gravity, this leads into change of the system behavior from stable to unstable system. A control system for such mobile robot with simulation validation of the concept is also presented. To be able to control AMAV we need to know attitude of the robot body. For attitude measuring purposes are mostly used gyroscopes. Thanks to MEMS technology there are many new inertial sensors on the market namely MEMS accelerometers and MEMS gyroscopes. These sensors bring us possibility to create attitude measuring subsystem for mobile robotics, which is cheap and small. Unfortunately these sensors have some disadvantages which disable to use them without to do some necessary conditioning of measuring from them. For this purposes we are presenting a special fusion technique called Adaptive

Quaternion Based Complementary Filter (AQCF). AQCF takes advantages from separate sensors to suppress their undesirable properties to get one signal which is able to give us complete information about attitude through the whole dynamical range of measurements. Concept of AQCF is fully described in this thesis and fully tested in real embedded system under real conditions.

Keywords: mobile robot, mono axial vehicle, MEMS, quaternion, complementary filter

Obsah

1.	Úvod	7
2.	Diferenciálny podvozok AMAV	7
2.1	<i>Dynamika podvozku AMAV</i>	9
2.2	<i>Simulácie dynamického modelu AMAV</i>	9
2.2.1	Stabilný prípad	9
2.2.2	Nestabilný prípad	10
2.3	<i>Zovšeobecnená poloha ťažiska</i>	12
3.	Návrh riadenia AMAV	12
3.1	<i>Návrh riadiacej štruktúry pre podvozok AMAV</i>	12
3.1.1	Odvodenie predpisov zosilnení regulátora	14
3.1.2	Voľba polohy pólov	15
3.2	<i>Overenie voľby ziskov riadenia</i>	16
3.2.1	Stabilný režim	16
3.2.2	Nestabilný režim	18
3.3	<i>Návrh zmeny parametrov riadenia na základe zmeny polohy ťažiska</i>	20
3.3.1	Návrh identifikácie dĺžky závesu L	20
3.4	<i>Zhrnutie k navrhnutému riadeniu AMAV</i>	22
4.	MEMS pohybové snímače	22
4.1	<i>MEMS akcelerometer a meranie rotácií systému</i>	22
4.1.1	Vplyv dynamických zrýchlení na merania uhlov náklonu	23
4.2	<i>MEMS gyroskop a meranie rotácií systému</i>	24
4.3	<i>Zhrnutie použitia MEMS snímačov pre účely merania náklonov</i>	24
5.	Komplementárny filter	25
5.1	<i>Komplementárny filter s konštantným zosilnením</i>	25
5.2	<i>Komplementárny filter s adaptívnym zosilnením využívajúci kvaternióny</i>	26
5.2.1	Implementácia AQCF	27
5.2.2	Overenie AQCF	27
5.2.3	Zhrnutie k AQCF	33
6.	Meracia a riadiaca elektronika	33

7.	Záver.....	34
7.1	<i>Prínosy dizertačnej práce.....</i>	<i>34</i>
7.2	<i>Budúce ciele.....</i>	<i>35</i>
8.	Literatúra.....	35
9.	Publikované práce autora	36
9.1	<i>Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch</i>	<i>36</i>
9.2	<i>Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch.....</i>	<i>37</i>
9.3	<i>Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách.....</i>	<i>37</i>
9.4	<i>Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách.....</i>	<i>37</i>
9.5	<i>Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách</i>	<i>39</i>
9.6	<i>Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií</i>	<i>40</i>

1. Úvod

Rozmach mobilnej robotiky by nebol možný bez pokroku vo viacerých oblastiach, ktoré sa priamo dotýkajú robotických aplikácií. Okrem pohonných subsystémov, kde sa dosahujú pokroky v účinnosti elektrických pohonov (BLDC pohony) a energetickej hustoty napájacích batérií (moderné LiPol, LiFePo akumulátory), bol zaznamenaný značný pokrok aj v senzorických subsystémoch využívaných okrem iného taktiež na meranie orientácie v priestore. Práve na úlohu sledovania orientácie v priestore sa vo vyspelých robotických systémoch používajú inerciálne snímače ako gyroskop (uhlová poloha), resp. rýchlostný gyroskop (uhlová rýchlosť) a akcelerometre (lineárne zrýchlenie). Vďaka dostupnosti kvalitných MEMS inerciálnych snímačov zrýchlenia (ďalej akcelerometer) a uhlovej rýchlosti (ďalej gyroskop) sme schopní za relatívne nízke obstarávacie náklady vytvoriť kvalitný senzorový subsystém použiteľný na úlohy sledovania orientácie mobilných robotov v priestore. Možnosť snímania orientácie mobilných robotov v priestore je zaujímavá hlavne v prípade, keď je potrebné riadiť, resp. stabilizovať prirodzene nestabilné konštrukcie, akými môžu byť jednokolesové či dvojkolesové mobilné robotické systémy (monocykel, bicykel resp. dicykel/segway), alebo lietajúce roboty napríklad typu VTOL (vrtuľníky, quadrokoptéry atď.).

Jedným z najpoužívanejších podvozkov v mobilnej robotike je práve diferenciálne riadený podvozok, ktorý môžeme nájsť v rôznych obmenách od dvojkolesového cez štvor a viackolesové verzie až po pásovú podvozky. V našej aplikácii je použitý diferenciálny dvojkolesový podvozok bez podporného kolieska AMAV (amphibious mono axial vehicle). Takýto typ podvozka v sebe združuje vlastnosti podvozku segway a typu dicykel. V prípade podvozku typu segway™ (ďalej len segway™) je evidentné, že ťažisko sa nachádza nad osou kolies, čo má výhodu vo väčšom priestore pre užitočný náklad a možnosť jeho uloženia vyššie nad zemou, čo je vhodné, resp. potrebné pri rôznych snímačoch používaných v mobilnej robotike (sonar, laserový skener, kamera atď.). Avšak tento typ podvozku má aj nevýhodu, a to vo vyššej energetickej náročnosti z dôvodu potreby zabezpečenia stability. Na druhej strane podvozok typu dicykel (ďalej len dicykel), ktorého ťažisko sa nachádza pod osou podvozku, resp. blízko osi podvozku, nie je tak energeticky náročný pri pohybe ako segway™. Nevýhodou je, že pojme menej užitočného nákladu a tento musí byť lokalizovaný blízko osi, resp. pod ňou, aby ťažisko bolo pod touto osou. Spoločnou vlastnosťou oboch podvozkov (segway™ aj dicykel) je nižšia energetická náročnosť v porovnaní s viackolesovými verziami diferenciálneho podvozku, vysoká obratnosť a relatívne vyššia presnosť odometrie (za rovnakých podmienok) opäť v porovnaní s viackolesovými podvozkami. V prípade nášho návrhu AMAV ide o hybridnú konštrukciu s využitím kladov oboch podvozkov segway™ a dicykla.

2. Diferenciálny podvozok AMAV

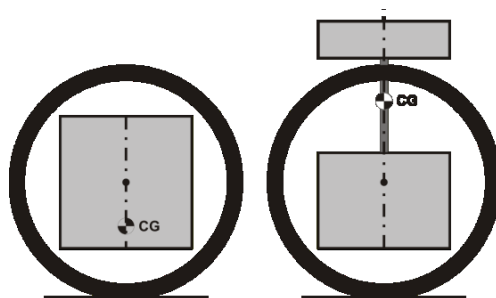
Nespornou výhodou dvojkolesového diferenciálneho podvozku, či už typu segway alebo dicykel, je jeho nižšia spotreba energie potrebnej na vykonávanie pohybu v porovnaní s viackolesovými diferenciálnymi podvozkami (resp. s pásovým podvozkom), vysoká obratnosť. Navyše v prípade, ak sa podvozok používa v štruktúrovanom prostredí

s rovnou podlahou (čo v prípade servisných robotov je takmer vždy splnené), je omnoho presnejšie použitie odometrie na navigáciu v priestore, než v prípade šmykom riadených podvozkov. Na základe týchto úvah sme sa rozhodli, že by bolo možné využiť výhody oboch koncepcií dvojkolesových podvozkov typu segway aj dicykel a združiť ich do jedného podvozku. Na základe tohto vznikol návrh dvojkolesového diferenciálneho podvozku podľa Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Reálna konštrukcia mobilného robotického podvozku typu AMAV, ešte bez výsuvnej platformy

Základom tejto konštrukcie je fakt, že priemer použitých kolies je väčší ako je najväčší rozmer samotného tela podvozku, ako je tomu aj v prípade dicykla. Výhodou tohto usporiadania je, že akýkoľvek užitočný náklad sa preváža v tele podvozka, a teda je chránený pred prípadným poškodením. V samotnom tele podvozku sa nachádza výsuvná platforma, ktorá umožní vysunutie užitočného nákladu z tela AMAV. Na základe tohto vysunutia sa tiež mení poloha ťažiska AMAV podľa Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Zmena polohy ťažiska podvozku typu AMAV pri vysúvaní užitočného nákladu

Táto zmena ťažiska znamená aj zmenu chovania sa samotného podvozku. Ak v prvom prípade bolo ťažisko pod osou kolies je zrejmé, že systém bude stabilný s väčšou či menšou mierou kmitavosti. Avšak ak sa ťažisko dostane nad osu kolies, systém sa stáva nestabilný a je potrebné aktívne riadenie, pokiaľ chceme, aby podvozok udržiaval vzpriamenú polohu.

2.1 Dynamika podvozku AMAV

Samotný dynamický opis podvozku AMAV vychádza zo zjednodušenia systému AMAV, kedy sme telo AMAV nahradili matematickým kyvadlom. Na základe analýzy tohto systému sme dospeli k diferenciálnym rovniciam opisujúcich dynamiku AMAV vrátane vonkajších síl pôsobiacich na AMAV.

$$\ddot{\varphi} = -\frac{b_S}{J_S} \dot{\varphi} - \frac{b_F}{J_S} \dot{\varphi} - \frac{m_P L R}{J_S} \cos\theta \ddot{\theta} + \frac{M_P}{J_S} \quad (1)$$

$$J_S = m_W R^2 + m_P R^2 + J_W \quad (2)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{b_F}{m_P L^2} \dot{\theta} - \frac{d_P}{m_P L^2} \dot{\theta} + \frac{b_F}{m_P L^2} \dot{\varphi} - \frac{R}{L} \cos\theta \dot{\varphi} - \frac{g}{L} \sin\theta - \frac{M_P}{m_P L^2} \quad (3)$$

kde je:

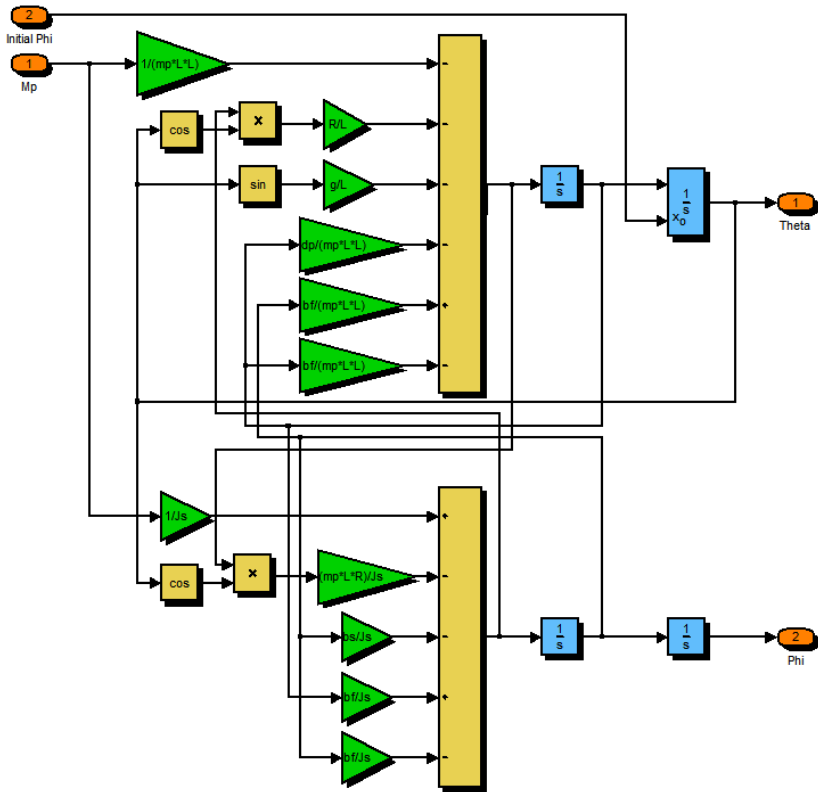
M_P	hmotnosť kolies
J_W	moment zotrvačnosti kolies
R	polomer kolesa
L	dĺžka závesu kyvadla
θ	uhol vychýlenia kyvadla
m_P	hmotnosť kyvadla
b_S	súčiniteľ viskózneho tlmenia odvaľovania kolies
b_F	súčiniteľ viskózneho odporu vo väzbe koleso - kyvadlo
d_P	súčiniteľ tlmenia kyvadla/tela

2.2 Simulácie dynamického modelu AMAV

Z uvedených diferenciálnych rovníc sme vytvorili simulačný model v nástroji Matlab Simulink. Pri simuláciách vychádzame zo simulačného modelu podľa Obr. 2.3, na vstup *Initial Phi* privedieme hodnotu rovnú 0 radiánov pre stabilný prípad, alebo hodnotu π radiánov pre prípad nestabilný. Parametre pre simulácie sme odmerali na nami pripravovanom robotickom podvozku typu AMAV.

2.2.1 Stabilný prípad

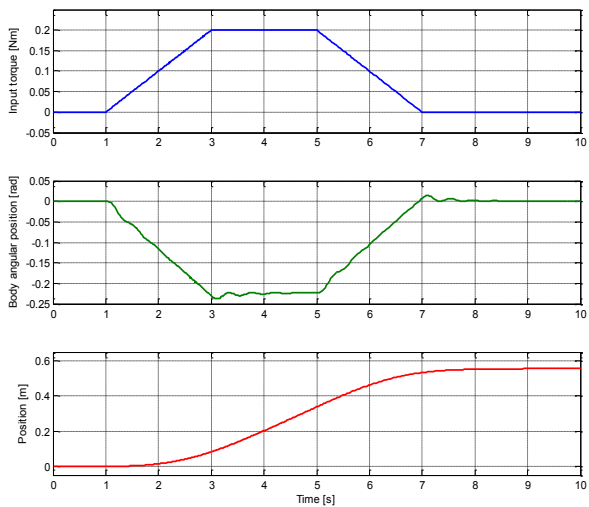
Na Obr. 2.4 je možné vidieť odozvu AMAV na vstupný moment sily (modrá krivka). Z nulovej hodnoty uhlovej polohy tela (zelená krivka) sa telo vychýli do opačného smeru ako je smer pôsobiaceho momentu sily. Kmitavý charakter podvozku je vidieť pri prechodných dejoch v časoch 1s, 3s, 5s a 7s. Amplitúda týchto kmitov nie je vysoká, maximum cca 0.01 radiánu, telo sa vychýlilo o približne 0.225 radiánu (cca 12.89°) voči nulovej polohe. Poloha, ktorú prešlo vozidlo počas pôsobenia momentu sily, sa zmenila z nuly na 0.55m (červená krivka).



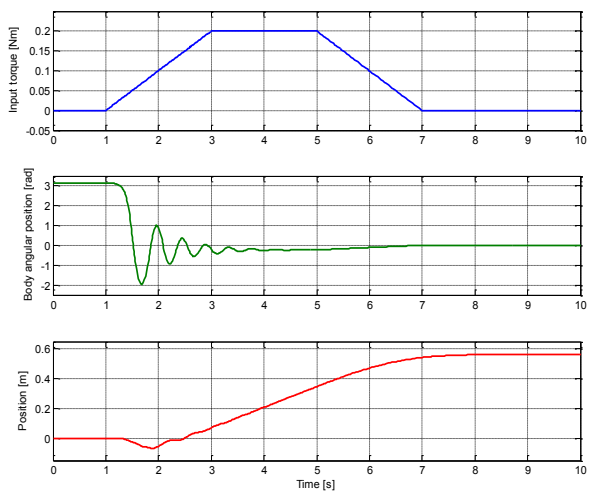
Obr. 2.3 Schéma simulačného modelu AMAV v Matlab Simulink

2.2.2 Nestabilný prípad

Na Obr. 2.5 je znázornená skupina grafov zobrazujúcich odozvu AMAV na zmenu vstupného momentu sily, ktorý je totožný s predchádzajúcim prípadom, pričom však počiatková hodnota náklonu tela AMAV bola rovná π radiánov. Tým sme dosiahli to, že uvedená simulácia AMAV je vykonaná v nestabilnej polohe. Z týchto grafov je vidieť, že pri zmene na vstupe sa telo AMAV okamžite začne preklápať tak, aby sa opäť dostalo do stabilnej polohy. Počas konštantného pôsobenia momentu sily sa poloha tela ustáli okolo hodnoty 0.2 radiánu, čo je takmer totožná hodnota z predchádzajúceho prípadu. Po ukončení pôsobenia hnacieho momentu sily sa telo AMAV ustáli na hodnote 0 radiánov. Rovnako možno pozorovať, aký vplyv malo preklopenie tela do stabilnej hodnoty na tvar časového priebehu polohy.



Obr. 2.4 Simulácia odozvy dynamického modelu AMAV na vstupný moment sily – stabilná poloha



Obr. 2.5 Simulácia odozvy dynamického modelu AMAV na vstupný moment sily – nestabilná poloha

2.3 Zovšeobecnená poloha ťažiska

Polohou ťažiska rozumieme dĺžku závesu L náhradného kyvadla. Zmenu z nestabilného stavu do stabilného sme doteraz pri simuláciách realizovali tak, že k uhlovej polohe sme pripočítali 180° . Z toho vyplýva :

$$\sin(\theta + 180) = -\sin\theta \quad (4)$$

$$\cos(\theta + 180) = -\cos\theta \quad (5)$$

A súčasne sa diferenciálne rovnice systému AMAV zmenia nasledovne :

$$J_S \ddot{\varphi} - m_p L R \ddot{\theta} \cos\theta + m_p L R \dot{\theta}^2 \sin\theta = M_p \quad (6)$$

$$-m_p L R \dot{\varphi} \cos\theta + m_p L^2 \ddot{\theta} - m_p g L \sin\theta = -M_p \quad (7)$$

Keď sa bližšie pozrieme na členy, pri ktorých sa zmenilo znamienko, všimneme si, že každý obsahuje aj dĺžku závesu L . Preto je možné zaviesť do nášho dynamického opisu AMAV zovšeobecnenú polohu ťažiska, ktorú budeme označovať opäť písmenom L a ktorá sa bude meniť nasledovne :

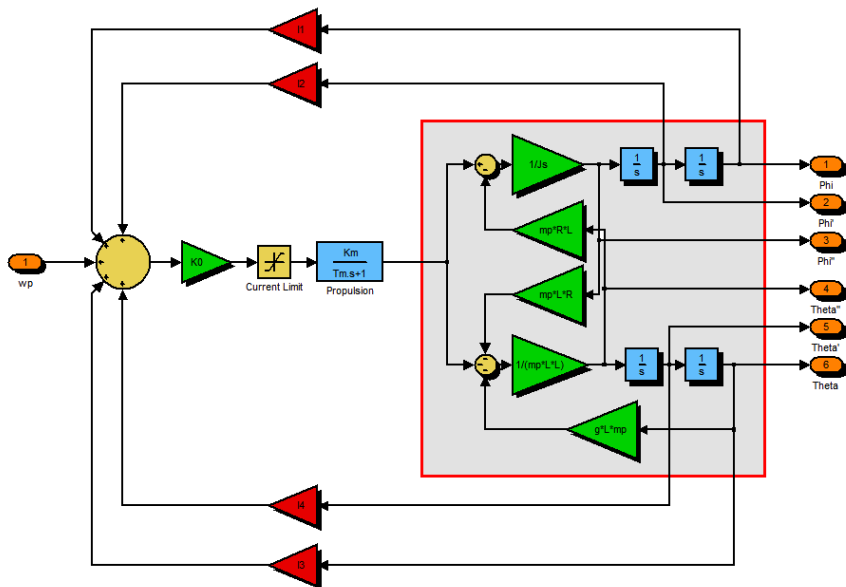
- ak sa ťažisko bude nachádzať pod osou kolies, bude $L > 0$
- ak sa ťažisko bude nachádzať v osi kolies, bude $L = 0$
- ak sa ťažisko bude nachádzať nad osou kolies, bude $L < 0$

Tým sa nám nemení samotný uhol θ pri zmene zo stabilnej do nestabilnej polohy, ale sa nám mení len znamienko zovšeobecnenej polohy ťažiska L , čo je výhodné pre použitie v ďalšej analýze AMAV a syntéze jeho riadenia.

3. Návrh riadenia AMAV

3.1 Návrh riadiacej štruktúry pre podvozok AMAV

Systém má dva výstupy, a to polohu tela a polohu kolies AMAV. Týmto dvom výstupom prislúchajú relevantné a v praxi merateľné stavové veličiny $\varphi(s)$ (uhlová poloha kolies), $\dot{\varphi}(s)$ (uhlová rýchlosť kolies), $\theta(s)$ (uhlová poloha tela) a $\dot{\theta}(s)$ (uhlová rýchlosť tela). Riadiacou veličinou je moment sily na hriadeli, ktorá je v spoji telo – koleso, ale samozrejme v reálnom AMAV je generátorom momentu sily elektromotor. Napriek tomu, že riadiacou veličinou je moment sily na hriadeli, našim cieľom bude riadiť pohyb a polohu podvozku tak, aby boli zachované nami požadované vlastnosti správania sa systému AMAV. Medzi hlavné požiadavky patrí tlmenie kmitov tela AMAV v stabilnej polohe a stabilizácia systému AMAV ako takého v nestabilnej polohe (aby pri zmene pohybu telo AMAV nepadlo). Návrh riadiacej štruktúry vychádza z požiadaviek na riadiaci systém a z riadiacich veličín a stavov systému. Z toho vyplýva, že budeme využívať stavové riadenia pre náš systém podľa Obr. 3.1, pričom ako metódu nastavenia zosilnení stavového regulátora použijeme metódu umiestňovania pólov (Pole Placement). K_0 je zisk prúdového obvodu systému.



Obr. 3.1 Schéma riadiacej štruktúry stavového riadenia AMAV

Zo schémy vyjadríme prenosovú funkciu $\frac{\varphi(s)}{w_P(s)}$. Časové konštanty podvozku AMAV sú v rádoch jednotkách sekúnd, pričom časová konštanta pohonu T_M sa nachádza rádo vo na úrovni stotín sekundy. Preto pri návrhu zosilnení ďalej túto časovú konštantu zanedbávame. Z uvedenej prenosovej funkcie je vidieť, že systém s nami navrhnutým riadením sa ustáli na hodnote $-\frac{1}{l_1}$. Tomuto sa chceme vyhnúť, a preto neskôr zavedieme kompenzáciu zisku do riadiacej štruktúry. Nakoniec ešte pre úplnosť vyjadríme charakteristický polynóm systému AMAV.

$$\frac{\varphi(s)}{w_P(s)} = \frac{K_0 K_M \left(\frac{L+R}{g} s^2 + 1 \right)}{s^4 \frac{m_W R^2 + J_W L}{g} + s^3 \frac{K_0 K_M}{g} \left(\left(\frac{J_S}{g L m_P} + R \right) l_4 - (R+L) l_2 \right) + s^2 \frac{K_0 K_M}{g} \left(\frac{J_S g}{K_0 K_M} + \left(\frac{J_S}{L m_P} + R \right) l_3 - (R+L) l_1 \right) + s \left(-K_0 K_M l_2 \right) + \left(-K_0 K_M l_1 \right)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
A(s) = & s^4 \frac{m_W R^2 + J_W}{g} L + \\
& s^3 \frac{K_0 K_M}{g} \left(\left(\frac{J_S}{g L m_P} + R \right) l_4 - (R + L) l_2 \right) + \\
& s^2 \frac{K_0 K_M}{g} \left(\frac{J_S g}{K_0 K_M} + \left(\frac{J_S}{L m_P} + R \right) l_3 - (R + L) l_1 \right) + \\
& s (-K_0 K_M l_2) + \\
& (-K_0 K_M l_1)
\end{aligned} \tag{9}$$

3.1.1 Odvodenie predpisov zosilnení regulátora

Rozdeľme náš systém 4.rádu AMAV na dva podsystemy 2.rádu. Prvý podsystem bude opisovať vlastnosti tela AMAV a druhý vlastnosti pohonu AMAV. Odvodíme charakteristický polynóm želaného systému $A_D(s)$.

$$\begin{aligned}
A_D(s) = & (s^2 + 2b_1\omega_{01}s + \omega_{01}^2)(s^2 + 2b_2\omega_{02}s + \omega_{02}^2) = \\
= & s^4 + s^3 2(b_1\omega_{01} + b_2\omega_{02}) + s^2(\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2)
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
& + s 2(b_1\omega_{01}^2\omega_{02} + b_2\omega_{02}^2\omega_{01}) + \omega_{01}^2\omega_{02}^2 \\
a_3 = & 2(b_1\omega_{01} + b_2\omega_{02})
\end{aligned} \tag{11}$$

$$a_2 = \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 \tag{12}$$

$$a_1 = b_1\omega_{01}^2\omega_{02} + b_2\omega_{02}^2\omega_{01} \tag{13}$$

$$a_0 = \omega_{01}^2\omega_{02}^2 \tag{14}$$

$$A_D(s) = s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 \tag{15}$$

Syntéza regulátora metódou umiestňovania pólov nám umožňuje umiestniť pólý systému pomocou navrhnutého regulátora na základe požadovaných (dynamických) vlastností systému. Najskôr si dáme do rovnosti charakteristický polynóm želaného systému s charakteristickým polynómom AMAV $A(s) = A_D(s)$. Z uvedenej rovnosti vyjadríme predpisy pre zosilnenia regulátora l_1, l_2, l_3 a l_4 .

$$l_1 = -\frac{a_0}{K_0 K_M} \frac{J_W L}{g} \tag{16}$$

$$l_2 = -\frac{a_1}{K_0 K_M} \frac{J_W L}{g} \tag{17}$$

$$l_3 = \frac{a_2}{K_0 K_M} J_W L - \frac{J_S g}{K_0 K_M} + (R + L) l_1 \tag{18}$$

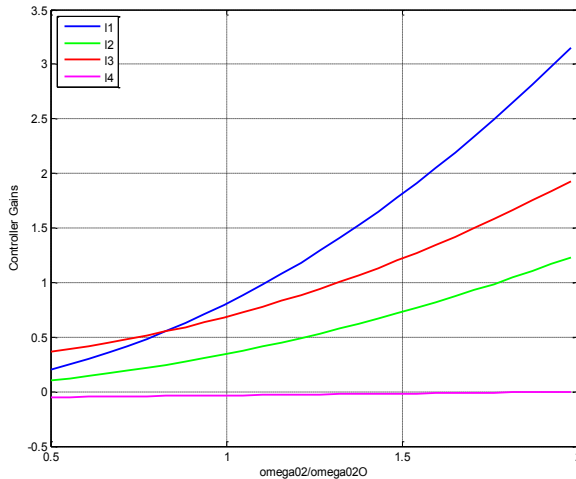
$$l_4 = \frac{\frac{J_S}{L m_P} + R}{\frac{K_0 K_M}{J_W L} + (R + L) l_2} \tag{19}$$

3.1.2 Voľba polohy pólov

Zo želaného tvaru charakteristického polynómu je evidentné, že máme dve pólové dvojice, ktoré potrebujeme vhodne umiestniť v komplexnej rovine. Začnime tlmienami, ktoré na základe skúseností volíme v rozmedzí hodnôt 0.5 – 0.707. V prípade nášho pole placement regulátora zvolíme hodnoty $b_1 = b_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ pre obe pólové dvojice. Voľbu vlastnej uhlovej frekvencie začneme s pomalšou pólovou dvojicou. Na základe parametrov pohonu a systému AMAV vieme určiť obmedzenia pohonu pre maximálne zrýchlenie.

$$\omega_{max} = \frac{I_{max}K_M}{J_s} = 8.0452 \frac{rad}{s^2} \quad (20)$$

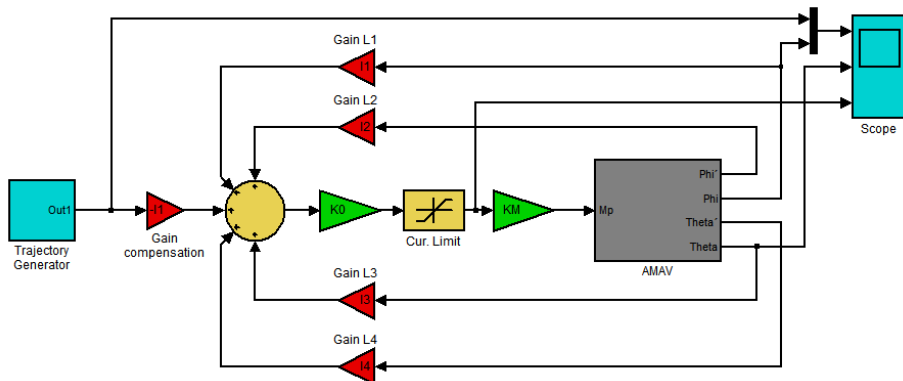
Nastavíme hodnotu $\omega_{01} = \frac{1}{2}\omega_{max}$ a vykreslíme závislosť zosilnení regulátora $l1$, $l2$, $l3$ a $l4$ od zmeny ω_{02} v rozsahu $(0.5\omega_{020}, 2\omega_{020})$, pričom $\omega_{020} = 18.24$ a ide o pôvodnú vlastnú uhlovú frekvenciu systému. Na Obr. 3.2 je vidieť ako sa menia zosilnenia regulátora v závislosti od pomeru $\frac{\omega_{02}}{\omega_{020}}$, zvyšovaním násobku ω_{02} zosilnenia rastú exponenciálne. Našou snahou je však držať zosilnenia regulátora na čo najnižšej hodnote, pretože čím väčšie zisky bude mať riadenie, tým vzniká potreba väčších akčných zásahov. Tu narážame na fyzikálne obmedzenia toho, čo pohony dokážu zvládnuť, teda obmedzenia prúdu, a tým aj momentu sily. Zároveň je vhodné sa držať v okolí prirodzenej vlastnej frekvencie systému. Na základe týchto úvah vyberieme hodnotu rovnú 1.5 násobku ω_{020} . Tu je zisk $l4$ veľmi blízky k nulovej hodnote, zisky $l1$, $l2$, $l3$ sú v okolí hodnoty 1. Preto ako hodnotu ω_{02} zvolíme $\omega_{02} = 1,5\omega_{020} = 27.36 \frac{rad}{s}$.



Obr. 3.2 Závislosť zosilnení od požadovanej vlastnej uhlovej frekvencie systému ω_{02}

3.2 Overenie voľby ziskov riadenia

Ako bolo uvedené vyššie, do riadenia je potrebné zaviesť kompenzáciu zisku $l1$. Na základe toho je upravená finálna schéma riadenia tak, ako je možné vidieť na Obr. 3.3. Želanou hodnotou polohy je lichobežníkový signál z generátora trajektórie, pričom sledujeme reakciu AMAV s riadením na takýto signál. Sledované veličiny sú reálna poloha kolies, náklon tela AMAV voči zvislici a odoberaný prúd.

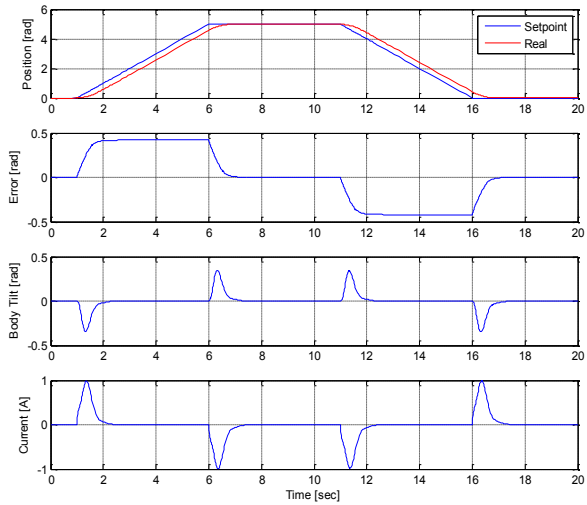


Obr. 3.3 Finálna schéma riadenia

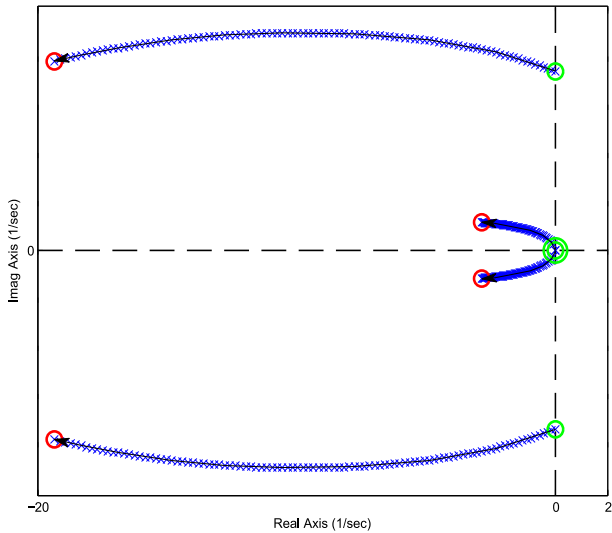
3.2.1 Stabilný režim

Priebehy simulácie pre lineárny model v stabilnom režime sú na Obr. 3.4. Z uvedených simulácií je vidieť, že pohyb tela AMAV má aperiodický charakter, vďaka vnútenému tlmeniu, zároveň je AMAV schopný dostatočne sledovať želanú polohu. Je vhodné overiť polohu pólov uzavretého regulačného obvodu (URO) v závislosti od miery zaväzbenia systému, kedy budú zosilnenia $l1$, $l2$, $l3$ a $l4$ menené v rozsahu $\{0, \{l1, l2, l3, l4\}\}$, pričom budú sledované zmeny polohy pólov. Túto závislosť (geometrické miesto koreňov) je vidieť na Obr. 3.5. V počiatku sa pôvodná pólová dvojica o niečo zrýchli a zvýši sa jej tlmenie na želanú hodnotu 0.707. Táto dvojica sa ustáli na hodnotách $-2.845-2.845i$ a $-2.845+2.845i$. Pôvodná rýchla pólová dvojica sa odtrhla z imaginárnej osi smerom doľava, zvýšením tlmenia na 0.707 a zvýšením vlastnej uhlovej frekvencie na 27.36 rad/s. Jej poloha sa ustálila na $-19.35+19.35i$ a $-19.35-19.35i$.

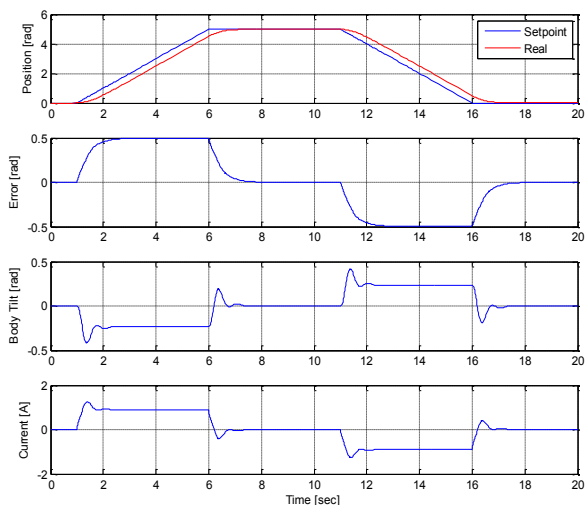
Pre overenie riadenia na úplnom nelineárnom modeli s tlmeniami bola použitá rovnaká schéma riadenia, ako v predchádzajúcich prípadoch s lineárnym modelom, v ktorej bol nahradený lineárny dynamický model nelineárnym. Priebehy simulácie pre stabilný prípad a nelineárny model sú na Obr. 3.6. Je vidieť, že systém sa správa približne rovnako, no v tomto prípade sa už náklon tela a ani prúd neustália počas ustálenej rýchlosti na nulových hodnotách, čo je spôsobené tlmeniami vo väzbách, ktoré v prípade lineárneho modelu neboli uvažované. Hodnota odoberaného prúdu sa ustáli približne v okolí 1A a náklon tela AMAV sa pri pohybe ustáli na hodnote približne 0.25 radiánov.



Obr. 3.4 Overenie riadenia – lineárny model, stabilný režim



Obr. 3.5 Závislosť polohy pólov od miery zaväzbenia systému – lineárny model, stabilný režim

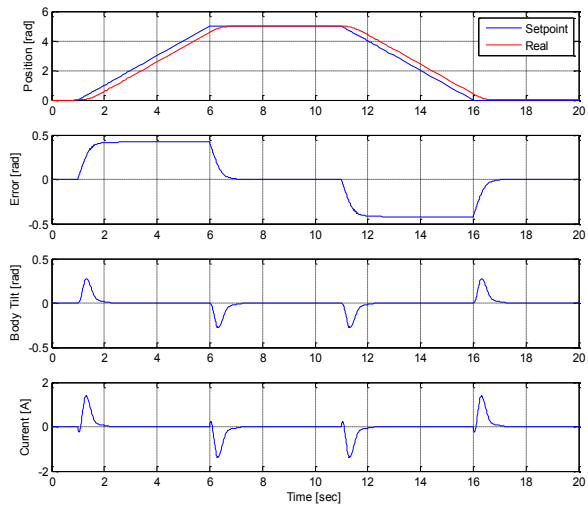


Obr. 3.6 Overenie riadenia – nelineárny model, stabilný režim

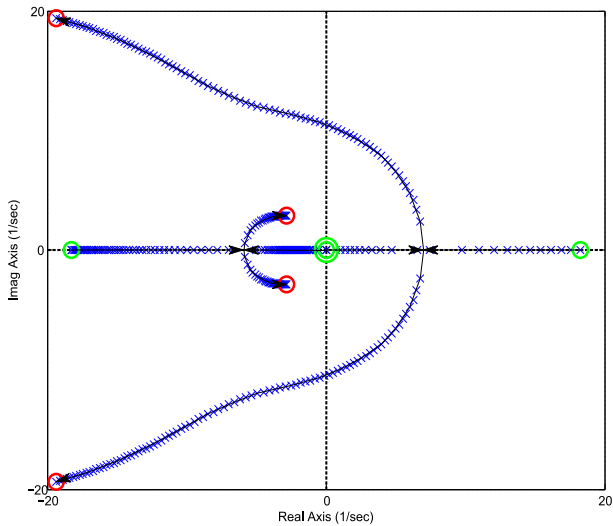
3.2.2 Nestabilný režim

Časové priebehy simulácie je vidieť na Obr. 3.7. Z týchto je možné pozorovať, že sledovanie želanej hodnoty sa takmer nezmenilo. Zmena spočíva v tom, že počas pohybu sa telo AMAV nakláňa opačným smerom ako v stabilnom prípade. Počas pohybu v nestabilnom režime je potrebné, aby telo padalo do toho smeru, ako sa pohybuje AMAV ako taký, a teda aby sme so zmenou generovaného momentu sily mohli udržiavať vzpriamenú polohu tela AMAV. To by v prípade, ak by sa telo nakláňalo do opačného smeru ako je smer pohybu, znamenalo, že zvýšením generovaného momentu sily by bola tendencia pádu tela podporená (kladná spätná väzba). Na priebehu prúdu je vidieť ako pri zmene pohybu najprv zareaguje riadenie malým akčným zásahom v opačnom smere, čím sa telo nakloní do smeru pohybu. Následne sa generuje akčný zásah do opačného smeru, ktorým sa vykoná samotný pohyb a riadenie polohy tela. Závislosť polohy pólov od miery zaväzbenia je vidieť na Obr. 3.8. Je zrejmé, že zvyšovaním miery zaväzbenia systému sa vydajú proti sebe dve dvojice pólov. Jedna v pravej a druhá v ľavej polovine. Tieto sa zredukujú na jeden pól, v pravej polovine so súradnicou približne $-6+0i$ a v ľavej polovine so súradnicou približne $7+0i$. Od tohto momentu sa opäť tieto póly rozdelia na dva, pričom sa odtrhnú od reálnej osi a postupne sa dostanú až na nami predefinovanú polohu $-2.845-2.845i$ a $-2.845+2.845i$ a $-19.35+19.35i$ a $-19.35-19.35i$, čo je totožná poloha, ako v prípade stabilného režimu.

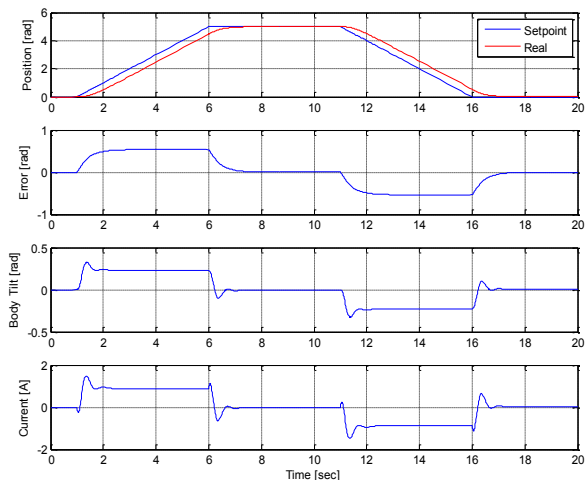
Pre nestabilný prípad platí to isté, ako v predchádzajúcom prípade. Prúd sa ustálil opäť v okolí 1A a náklon tela na hodnote približne 0.25 radiánov. Rovnako je vidieť pri zmenách pohybu malý prekmit prúdu do opačného smeru, čím si opäť riadenie pripraví náklon tela AMAV tak, aby ho pohybom mohol „dobiehať“ (Obr. 3.9).



Obr. 3.7 Overenie riadenia – lineárny model, nestabilný režim



Obr. 3.8 Závislosť polohy pólov od miery zaväzbenia systému – lineárny model, nestabilný režim



Obr. 3.9 Overenie riadenia – nelineárny model, nestabilný režim

3.3 Návrh zmeny parametrov riadenia na základe zmeny polohy ťažiska

Zosilnenia navrhnutého riadenia AMAV sú vždy závislé od polohy ťažiska, a teda zovšeobecnenej dĺžky závesu L . Preto v prípade, kedy sa zmení táto dĺžka, nebude riadenie schopné zabezpečiť také vlastnosti systému, aké sú od neho očakávané na základe syntézy riadenia. Preto je potrebné vhodným spôsobom zabezpečiť zmenu zosilnení riadenia so zmenou dĺžky závesu L , a teda zmenou vysunutia krku AMAV. Ako sme uviedli už skôr, vysúvanie krku AMAV sa bude realizovať iba v prípade potreby a vtedy sa AMAV typický nebude pohybovať. Na riešenie tohto problému sme navrhli nasledujúci systém. Offline identifikujeme závislosť dĺžky závesu od polohy krku AMAV vo viacerých bodoch a na základe týchto hodnôt vytvoríme look-up tabuľku obsahujúcu hodnoty jednotlivých zosilnení riadenia na základe polohy krku AMAV. Pri vysúvaní budeme teda meniť zosilnenia riadenia na základe zmeny polohy krku. Dôležitá je v tomto prípade správna identifikácia hodnôt dĺžky závesu.

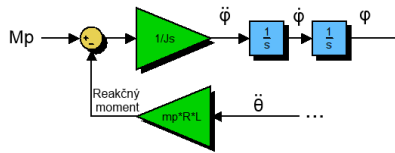
3.3.1 Návrh identifikácie dĺžky závesu L

Vychádzajme z linearizovaného matematického modelu, z ktorého môžeme odvodiť odhad aktuálnej hodnoty dĺžky závesu \tilde{L} nasledovne:

$$\tilde{L} = \frac{K_m I - J_s \ddot{\phi}}{R m_p \ddot{\theta}} \quad (21)$$

Odhad \tilde{L} na základe hore uvedeného vzťahu má však jeden vážny nedostatok. Ak pri reálnom meraní zvládneme meranie uhlového zrýchlenia tela AMAV pomocou derivácie meraní z gyroskopu (treba použiť filter, no na základe charakteru signálu to nie je problém), pri reálnom systéme sa nám bude len veľmi ťažko realizovať meranie uhlového zrýchlenia kolies so spätnou väzbou z IRC snímačov. A preto tu vzniká problém

s meraním uhlového zrýchlenia, a tým pádom aj s určením odhadu \tilde{L} . Keď sa podrobnejšie pozrieme na časť schémy dynamického modelu AMAV na Obr. 3.10, je možné vidieť bod vplyvu reakčného momentu sily telo -> kolesá.



Obr. 3.10 Časť schémy dynamického modelu AMAV so zvýrazneným reakčným momentom od tela AMAV

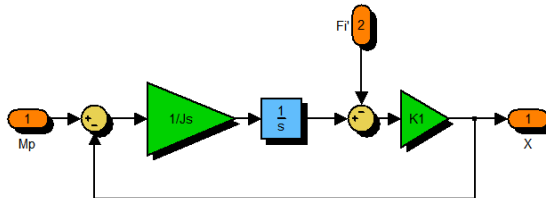
Zľava prichádza hnací moment do systému, od ktorého sa odpočítava reakčný moment tela AMAV, ktorý je úmerný L . Tým sa vytvára dynamický moment poháňajúci kolesa AMAV. Z toho môžeme vidieť:

$$M_p - M_{reak} = M_x \quad (22)$$

$$M_{reak} = m_p R \tilde{L} \ddot{\theta} \quad (23)$$

$$M_x = J_s \ddot{\varphi} \quad (24)$$

Zo vzťahu (24) je evidentné, že problémom je uhlové zrýchlenie $\ddot{\varphi}$, ktoré je zložité získať meraním, keďže ide o druhú deriváciu polohy získanej IRC snímačom. Keď však budeme vychádzať z reakčného momentu, dá sa vyhnúť potrebe merania uhlového zrýchlenia pomocou pozorovateľa podľa Obr. 3.11.



Obr. 3.11 Schéma pozorovateľa reakčného momentu bez potreby merania uhlového zrýchlenia

Z uvedeného vyplýva:

$$X = \frac{M_{reak}}{\frac{J_s}{K_1} s + 1} \quad (25)$$

Samotné \tilde{L} vieme získať pomocou vzťahu:

$$\tilde{L} = \frac{X}{R m_p \ddot{\theta}} \quad (26)$$

Na základe tohto pozorovateľa sme schopní merať odhad zovšeobecnenej dĺžky závesu \tilde{L} bez potreby merania uhlového zrýchlenia kolies AMAV.

3.4 Zhrnutie k navrhnutému riadeniu AMAV

V tejto kapitole sme predstavili syntézu riadenia AMAV, ktoré sme simulačne overili na lineárnom aj nelineárnom matematickom modeli v stabilnej aj nestabilnej polohe. Na základe overenia bola vidieť schopnosť upraviť riadením správanie sa systému AMAV na základe našich požiadaviek, pri dodržaní maximálnych hodnôt, ktoré náš systém AMAV môže zvládať (pohony). V závere kapitoly sme predstavili koncept adaptivity zosilnení riadenia na zmenu polohy L . Tu sme si ukázali možné riešenia odhadu L , a teda možnosti jeho určenia.

4. MEMS pohybové snímače

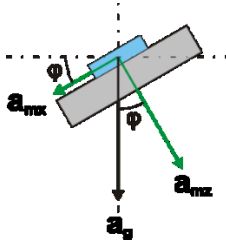
MEMS je technológia, ktorá združuje mikromechanické a mikroelektronické štruktúry, ktoré sú vyrobené technológiou mikrofabrikovania. Rozmery MEMS štruktúr bývajú v rozsahu od mikrónov do niekoľko milimetrov. [1] [2]

4.1 MEMS akcelerometer a meranie rotácií systému

MEMS akcelerometre sú snímače schopné merať okrem dynamického zrýchlenia aj statické zrýchlenie. Z toho vyplýva, že sú citlivé aj na gravitačné zrýchlenie Zeme. Majme situáciu, kedy na 3-osový akcelerometer nepôsobí, žiadne vonkajšie dynamické zrýchlenie a tento akcelerometer je upevnený na plošinke, ktorú môžeme rotovať okolo osi Y akcelerometra. Túto situáciu nám opisuje Obr. 4.1 [3]. Je vidieť, že pri náklone, ktorý vznikol otočením okolo osi Y, sa mení meraná hodnota a_{mx} a a_{mz} na osiach X a Z v závislosti od priemetu gravitačného zrýchlenia a_g na tieto osi. Ako vidieť z Obr. 4.1, sú merania z akcelerometra závislé od uhla φ , a to nasledovne :

$$a_{mx} = a_g \sin \varphi \quad (27)$$

$$a_{mz} = a_g \cos \varphi \quad (28)$$



Obr. 4.1 Princíp merania uhla náklonu pomocou MEMS akcelerometra

Keďže veľkosť gravitačného zrýchlenia je známa, jedinou neznámou je v tomto prípade uhol náklonu φ . Tento uhol náklonu vieme vypočítať :

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{a_{mx}}{a_{mz}} \right) \quad (29)$$

Ak použijeme 3-osový akcelerometer, vieme získať uhly klopenia a zdvihu v referenčnom súradnom systéme NED (North – East - Down). V tomto prípade majme

zadefinovaný uhol zdvihu θ a uhol klopenia ϕ . V NED referenčnom súradnicovom systéme môžeme tieto uhly vypočítať ako :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_{my}}{a_{mz}} \right) \quad (30)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_{mx}}{\sqrt{a_{my}^2 + a_{mz}^2}} \right) \quad (31)$$

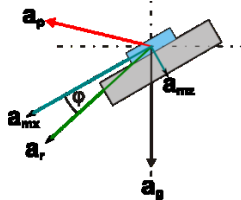
Meranie uhlov klopenia a zdvihu podľa (30) a (31) má dva zásadné problémy. V prvom rade sú tieto vzťahy numericky nestabilné, ak :

- pre merania zdvihu $a_{mz} = 0$
- pre merania klopenia $a_{my}^2 + a_{mz}^2 = 0$

Druhý problém je, že pokiaľ meriame uhol klopenia a uhol zdvihu θ nie je rovný nule, znižuje sa citlivosť tohto merania, to isté platí aj opačne.

4.1.1 Vplyv dynamických zrýchlení na merania uhlov náklonu

Vyššie uvedený prístup k meraniu uhlov klopenia a zdvihu je však použiteľný len v prípade, ak na systém nepôsobia ďalšie dynamické zrýchlenia. V prípade, ak takéto zrýchlenia pôsobia na systém, znamená to, že sa tento nerovnomerne pohybuje a už nie je možné bez znalosti smeru a veľkosti vektoru dynamického zrýchlenia jednoznačne merať uhly klopenia a zdvihu. Takýto prípad môžeme vidieť na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Vplyv externého zrýchlenia na merania akcelerometra

Je evidentné, že hodnoty merané akcelerometrom na osiach X a Z už viac nie sú závislé len od gravitačného zrýchlenia \vec{a}_g , ale aj od dynamického zrýchlenia \vec{a}_p , ktorého smer a ani veľkosť nepoznáme. Preto to, čo v tomto prípade meriame akcelerometrom, nie je priemet gravitačného vektora zrýchlenia na osi X a Z, ale je to priemet vektora zrýchlenia \vec{a}_r , ktorý vznikol zložením vektorov \vec{a}_g a \vec{a}_p . Preto platí :

$$\vec{a}_r = \vec{a}_p + \vec{a}_g \quad (32)$$

$$a_{mx} = a_r \sin \phi \quad (33)$$

$$a_{mz} = a_r \cos \phi \quad (34)$$

Z tohto je evidentné, že akcelerometer je vhodný len k statickým meraniam uhlov náklonu systému. Teda k tým, kde nepôsobí na systém, ktorého náklon meriame,

žiadne iné dynamické zrýchlenie, iba gravitačné. Pokiaľ ide o trojosový akcelerometer, musí byť zabezpečená podmienka :

$$|\vec{a}_g| = \sqrt{a_{mx}^2 + a_{my}^2 + a_{mz}^2} \quad (35)$$

Až na základe splnenia tejto podmienky môžeme vyhlásiť merania náklonu z akcelerometra za korektné.

4.2 MEMS gyroskop a meranie rotácií systému

Výstupom z MEMS gyroskopu je signál (analogový alebo digitálny) úmerný rýchlosti otáčania systému v $^{\circ}/sek$. Na rozdiel od MEMS akcelerometrov je MEMS gyroskop veľmi málo citlivý na pôsobenie zrýchlenia a použitím rôznych zdokonalených spôsobov výroby a návrhu je možné dosiahnuť vysokú mieru necitlivosti voči lineárnym zrýchleniam a vibráciám [4] pôsiacim na systém. Na to, aby sme z meraní z MEMS gyroskopu získali hodnoty náklonov okolo jednotlivých osí, musíme výstupný signál integrovať v čase.

$$\varphi = \int_0^{\infty} \omega(t) dt \quad (36)$$

Tu sa dostávame k dvom problémom v súvislosti s implementáciou integrácie v našom systéme:

1. Pri numerickej integrácii signálu v čase dochádza k nepresnostiam, ktoré sú spôsobené vzorkovaním signálu a jeho kvantovaním, resp. jeho aproximáciou.
2. Signál z MEMS gyroskopu, akokoľvek kvalitného, je z princípu zaťažený šumom s nepravidelným rozložením a ofset signálu je rovnako nestabilný (ovplyvnený časom/teplotou). Toto spôsobí, že pri jednoduchšej integrácii signálu v čase je skreslený jednosmernou zložkou. A teda sa meraný signál odchýli od nulovej hodnoty.

V prípade prvého problému môžeme ovplyvniť chyby vhodným vzorkovaním a použitou metódou pre numericke integrácie. Dáta by sme mali merať s čo najvyššou frekvenciou vzorkovania, ako nám merací systém povoľuje (v našom prípade to bude 500Hz) a na integráciu použijeme aspoň lichobežníkové pravidlo, alebo lepšie Simpsonovo pravidlo, ktoré sa ľahko implementujú a nie sú náročné na strojový čas [5]. Druhý uvedený problém je však komplexnejšej podstaty a súvisí so samotným snímačom a jeho vlastnosťami, ktoré buď nevieme vôbec nijako ovplyvniť, alebo len veľmi málo, pretože ide o uzavretú polovodičovú MEMS súčiastku. Jednotne sa vlastnosť uvedená v bode 2. vyššie v literatúre, resp. v katalógových listoch MEMS gyroskopov označuje ako „Drift Rate“ (čo budeme aj ďalej používať). Drift Rate sa vo všeobecnosti označuje tá zložka výstupu MEMS gyroskopu, ktorá je funkčne nezávislá od vstupnej rotácie [6].

4.3 Zhrnutie použitia MEMS snímačov pre účely merania náklonov

V tejto kapitole sme predstavili dva typy MEMS inerciálnych snímačov (akcelerometer a gyroskop) a ich možnosti využitia pri meraní náklonov. V prvom prípade sme využívali fakt, že akcelerometer je schopný merať aj statické gravitačné zrýchlenia. Tu však vzniká

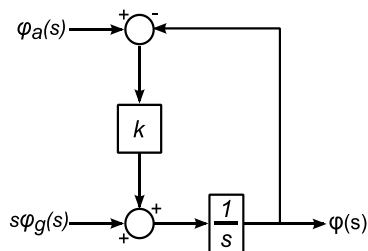
problém pri pôsobení externých síl na systém, kde je potrebné merať tento náklon. V tomto prípade nemeria akcelerometer len gravitačné zrýchlenie, ale aj vektor kombinovaného zrýchlenia (súčet gravitačného a všetkých externých dynamických zrýchlení). Preto je meranie náklonov vhodné len pre prípady, kedy je systém v pokoji. V prípade meraní pomocou gyroskopov, ktoré boli spomenuté vyššie, je zjavné, že ani ich použitie nie je úplne priamočiare, tak isto ako v prípade MEMS akcelerometrov. Tu sa naopak ukazuje, že sú vhodné pre krátke dynamické deje a ako bude vidieť neskôr, toto sa aj potvrdilo experimentálne. Preto je potrebné navrhnúť vhodné metódy úpravy a fúzie signálov z oboch typov MEMS snímačov, za účelom získania kvalitného signálu pre sledovanie náklonov.

5. Komplementárny filter

Pri použití metód sledovania rotácie systému, ktoré boli opísané vyššie, narážame na problém pri dynamických a pohybujuúcich sa systémoch, akým je aj mobilný robot typu AMAV. Keďže merania náklonov pochádzajú hlavne z trojosého akcelerometra, tieto sú ovplyvnené nielen rotáciou v rámci zemskej tiaže, ale taktiež aj pohybom robota. V tomto prípade sa k meraniam statického gravitačného zrýchlenia pripočítajú aj merania z dynamických zrýchlení, ktoré sú spôsobené pohybom. Preto je potrebné navrhnúť spôsob odstránenia týchto nevhodných vlastností meraní rotácií pomocou akcelerometra (kompas nebudeme zatiaľ brať do úvahy, keďže informácia o azimute nie je potrebná pre riadenie AMAV ako systému). Na meranie rotácií vieme použiť aj MEMS gyroskopy, ako bolo opísané vyššie. Tu však nastáva problém, kedy pri dlhobojnej integrácii sa časom na meraných náklonoch prejaviť jednosmerná zložka spôsobená integráciou chýb a iných parazitných vlastností. Ak dáme do kontrastu MEMS gyroskop a akcelerometer pre sledovania náklonov/rotácií, je možné si všimnúť, že charakteristika akcelerometra ma výhodné vlastnosti pre ustálené dlhotrvajúce stavy, avšak gyroskop ma vhodné vlastnosti pre merania krátkych a dynamických zmien v náklonoch/rotáciách. Z tohto vidieť, že oba snímače majú takzvanú komplementárnu charakteristiku, a preto je vhodné v tomto prípade použiť metódu filtrácie zvanú komplementárny filter. Komplementárne filtre sú založené na použití viacerých nezávislých meraniach toho istého signálu, pričom by tieto merania mali mať komplementárnu spektrálnu charakteristiku, ako to je aj v našom prípade.

5.1 Komplementárny filter s konštantným zosilnením

Na Obr. 5.1 je možné vidieť blokovú schému komplementárneho filtra určeného pre účely sledovania náklonov/rotácií. Merania náklonov pomocou akcelerometra sú $\varphi_a(s)$ a merania uhlovej rýchlosti z gyroskopu sú $s\varphi_g(s)$. V prípade, ak by merania z akcelerometra neboli zaťažené šumom a meral by len samotné gravitačné zrýchlenie, po nastavení $k = \infty$ by bolo meranie náklonu založené len na meraniach z akcelerometra. Ak by boli merania z gyroskopu bez šumu nastavením $k = 0$, meranie by bolo založené len čisto na meraniach z gyroskopu. Preto je potrebné v prípade reálnych snímačov nastaviť zosilnenie komplementárneho filtra tak, aby boli potlačené nežiaduce vlastnosti oboch použitých snímačov. [7]

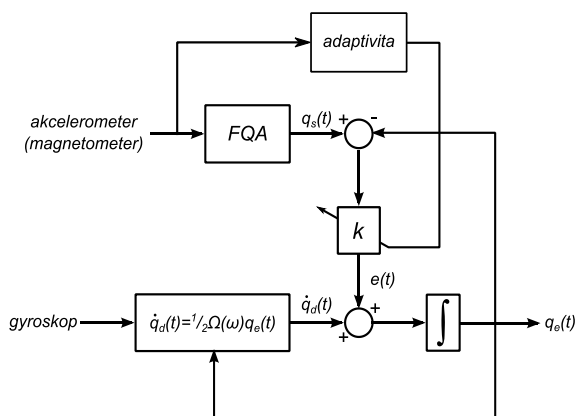


Obr. 5.1 Bloková schéma komplementárneho filtra s konštantným zosilnením

5.2 Komplementárny filter s adaptívnym zosilnením využívajúci kvaterniony

Komplementárny filter predstavený v predchádzajúcej kapitole je vhodný pri sledovaní jednej veličiny, resp. ak by sme v našom prípade chceli sledovať iba pozdĺžny náklon AMAV a predpokladali by sme, že v priečnom smere sa náklon nemení a je stále rovný nule. My však budeme uvažovať o zmene náklonu tela v oboch smeroch, teda aj v pozdĺžnom, aj v priečnom. Naša modifikácia komplementárneho filtra spočíva vo využití FQA [8] (Factored quaternion algorithm) algoritmu na sledovanie rotácií telies. Tento algoritmus nám umožňuje sledovanie rotácií telies na základe vektora zrýchlenia, prípadne aj magnetického poľa zeme. Pričom ako matematický aparát sa tu využívajú kvaterniony. Preto aj nami navrhnutý komplementárny filter budeme stavať na báze kvaternionov. Na Obr. 5.2 je možné vidieť blokovú schému nami navrhovaného komplementárneho filtra s adaptívnym mechanizmom úpravy zosilnenia filtra. Vstupom do filtra sú dve podstatné časti, a to :

- merania z akcelerometrov (možnosť kombinácie s kompasom), ktoré vytvárajú statickú zložku merania
- merania z gyroskopov vytvárajúce dynamickú zložku merania



Obr. 5.2 Bloková schéma AQCF

V prípade statickej zložky berieme v našom prípade do úvahy len merania z akcelerometra. Tieto merania transformujeme na jednotkový kvaternión pomocou spomenutého FQA algoritmu. Tým získame statický kvaternión $q_s(t)$. Meraním uhlových rýchlostí z gyroskopu získame dynamickú zložku merania, pričom tieto merania transformujeme na rýchlostný kvaternión $q_d(t)$. Ak by nebol použitý adaptívny mechanizmus, išlo by o komplementárny filter s konštantným zosilnením podobný tomu, ktorý bol opísaný vyššie. Podstatnou časťou nami navrhnutého komplementárneho filtra je jeho adaptívny mechanizmus zmeny zosilnenia filtra, ktorý je postavený na základe nasledujúcich parametrov merania:

1. Sledovanie celkovej veľkosti meraného vektora zrýchlenia za predpokladu :

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = 1g \quad (37)$$

2. Sledovanie zmeny citlivosti merania náklonov pomocou akcelerometra.

Keďže ale v prípade AMAV sú pre nás zaujímavé náklony do hodnôt približne $\pm 15^\circ$, je možné zmeny váhovania na základe citlivosti merania z akcelerometrov úplne vylúčiť, čím získame predpis pre adaptívny mechanizmus komplementárneho filtra podľa nasledujúceho vzťahu:

$$w_T = 1 - \left(\left| \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \right| - 1 \right)^2 \quad (38)$$

Samotné zosilnenie filtra získame podľa vzťahu:

$$k_A = k * w_T \quad (39)$$

Kde w_T je celková váha upravujúca zosilnenie a môže nadobúdať hodnoty na základe ($0 \leq w_T \leq 1$). Celková váha bude upravovať základné zosilnenie filtra k , čím získame adaptívne zosilnenie k_A .

5.2.1 Implementácia AQCF

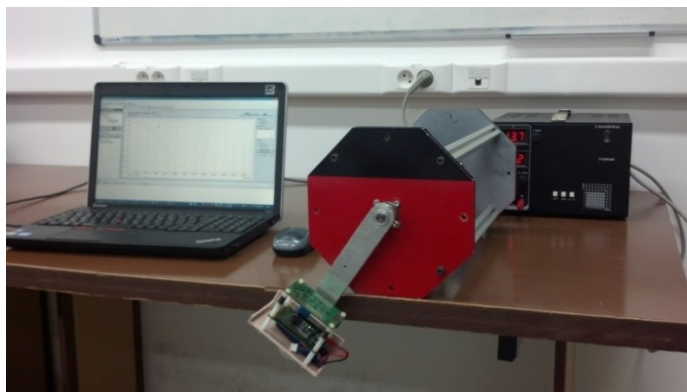
Komplementárny filter s adaptívnym zosilnením využívajúci kvaternióny bol implementovaný v programovacom jazyku C. Bolo potrebné vytvoriť knižnice obsahujúce numerické operácie nad kvaterniónmi, ovládače snímačov a samotný filter. Keďže je implementácia riešená na MCU s hardvérovou jednotkou pre počítanie s plávajúcou desatinnou čiarkou (FPU – floating point unit) podľa IEEE 754, sú v implementácii použité dátové typy float a double. Rýchlosť vzorkovania je 500Hz, čo je pre potreby AMAV (a aj mobilnej robotiky vo všeobecnosti) viac než dostačujúce, keďže časové konštanty systému sú rádovo v stovkách milisekúnd.

5.2.2 Overenie AQCF

Pre účely overenia navrhnutých a implementovaných algoritmov boli vytvorené dva scenáre generovaných pohybov na meracom prípravku podľa Obr. 5.3. V oboch prípadoch je vykonaný rotačný pohyb, pričom sa rameno s meracou doskou odchyľilo od zvislej polohy o 45° , rozdiel je v rýchlosti rotačného pohybu.

1. Rameno sa pootočí o 45° rýchlosťou $0,0084 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Pri tomto meraní budeme sledovať presnosť merania pomocou gyroskopu a jeho prípadný vplyv na výstup z filtra.
2. Rameno sa pootočí o 45° rýchlosťou $2,49 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Pretože je rýchlosť rotácie podstatne vyššia ako v prvom prípade, budeme sledovať vplyv odstredivého zrýchlenia na merania akcelerometra. Zároveň budeme sledovať, ako sa mení váha adaptujúca zosilnenie filtra na základe absolútnej veľkosti meraného zrýchlenia. V tomto prípade je očakávaná vysoká presnosť merania náklonov pomocou gyroskopov.

Na základe viacerých experimentov bolo zvolené základné zosilnenie filtra na hodnote $k = 10$.



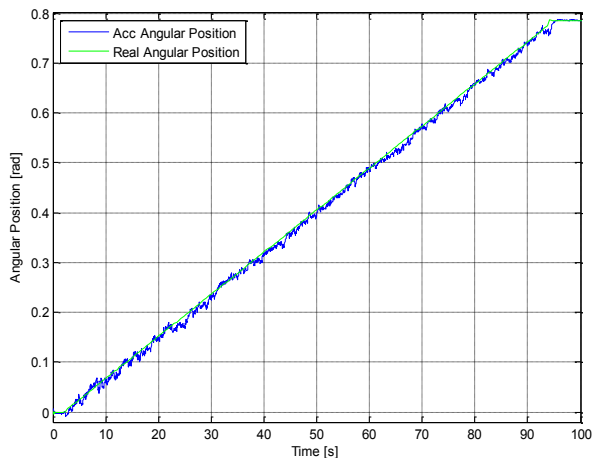
Obr. 5.3 Merací prípravok pre účely implementácie a overenia komplementárneho filtra

Pre prvý prípad začneme setom grafov, ktoré znázorňujú merania zo samotných snímačov. Z akcelerometra je vidieť, že toto meranie relatívne presne kopíruje reálnu hodnotu, pričom je ovplyvnené len šumom merania z akcelerometra (Obr. 5.4). Meranie z gyroskopu je ovplyvnené nízkym odstupom šumu od užitočného signálu, čo spôsobí nárast jednosmernej zložky a výrazný drift na konci merania (Obr. 5.5).

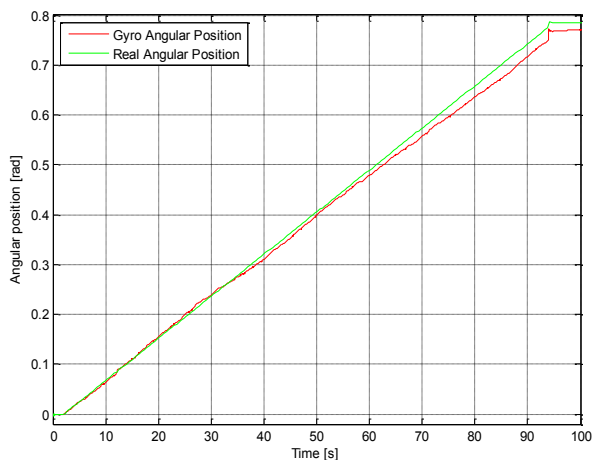
5.2.2.1 Prípady pomalej zmeny

Na nasledujúcej skupine grafov priamo demonštrujeme fungovanie algoritmu adaptívneho komplementárneho filtra s použitím kvaterniónov. Z výstupu z KF pri nastavení $k = 10$ je možné vidieť (Obr. 5.6), že odozva filtra je dostatočne rýchla a jednosmerná zložka z meraní gyroskopu je tiež úplne odstránená. Taktiež je na Obr. 5.7 vidieť, ako sa mení váha upravujúca základné zosilnenie filtra. Pri pomalých pohyboch sa merané zrýchlenie výrazne neodlišovalo od predpokladanej hodnoty 1g

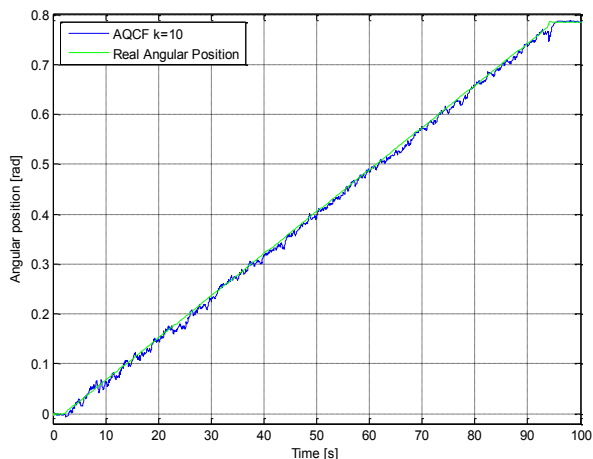
a rovnako váha adaptívnej úpravy zosilnenia sa nie veľmi odlišuje od hodnoty 1, a teda sa nastavené zosilnenie filtra výrazne nemení. Algoritmus KF interne využíva kvaternióny pre úsporu počtu numerických operácií. Výstupný kvaternión je preto ďalej vhodný aj pre ďalšie spracovanie v rotáciách v prípadoch, ako je napríklad spojenie mobilný robot – manipulátor (rotačne uložená kamera).



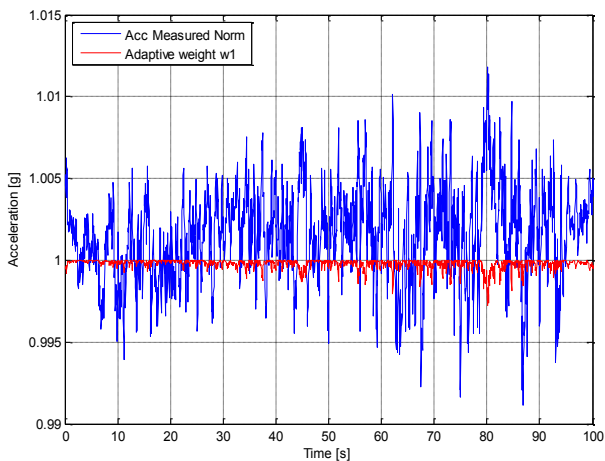
Obr. 5.4 Meranie uhlovej polohy pri pomalej zmene náklonu pomocou akcelerometra



Obr. 5.5 Meranie uhlovej polohy pomocou gyroskopu



Obr. 5.6 Meranie uhlovej polohy pomocou komplementárneho filtra

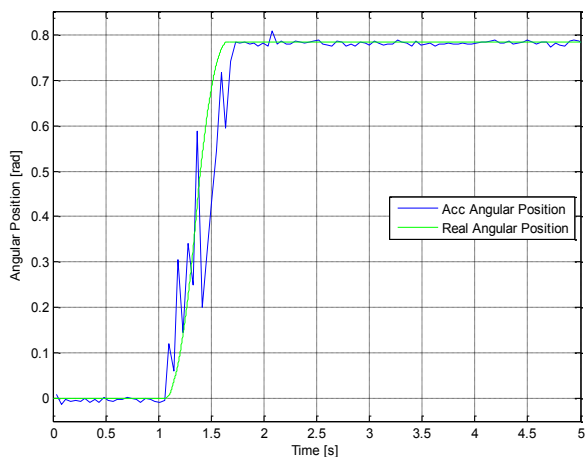


Obr. 5.7 Graf zmeny váhy w_1 v porovnaní s veľkosťou meraného vektora zrýchlenia

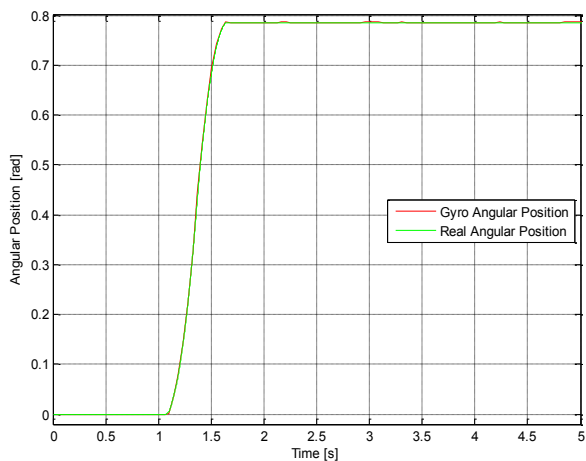
5.2.2.2 Prípád rýchlej zmeny

V nasledujúcej časti si ukážeme skupinu grafov pre prípad rýchlej zmeny náklonu. Z Obr. 5.8 je vidieť, že uhlová poloha meraná za pomoci akcelerometra je výrazne zdeformovaná oproti reálnej hodnote, čo je spôsobené najmä odstredivým a tangenciálnym zrýchlením vznikajúcim pri tomto pohybe. Z meraní pomocou gyroskopu (Obr. 5.9) je vidieť vysokú presnosť tohto merania s vysokou zhodou

s reálnou hodnotou. Z toho možno pozorovať vhodnosť merania uhlovej polohy rýchlych zmien pomocou gyroskopu.



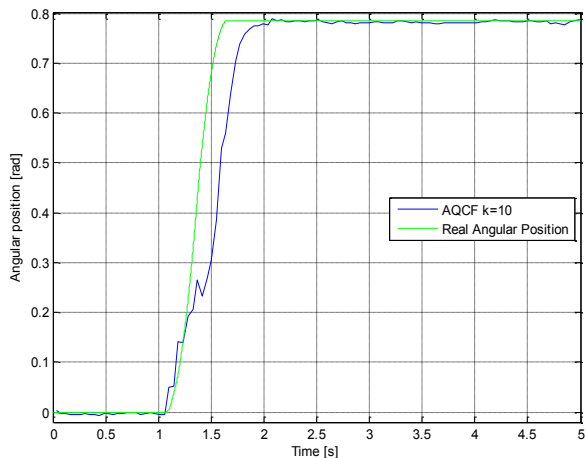
Obr. 5.8 Meranie uhlovej polohy pri rýchlej zmene náklonu pomocou akcelerometra



Obr. 5.9 Meranie uhlovej polohy pri rýchlej zmene náklonu pomocou gyroskopu

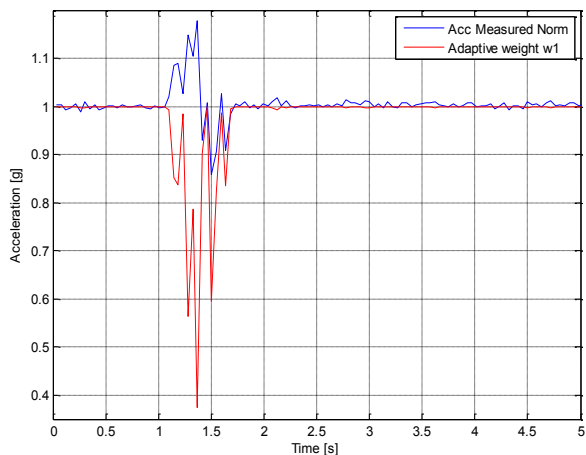
Z výstupu filtra je vidieť (Obr. 5.10), že reaguje na zmenu s oneskorením cca 0.25s, ale odfiltruje taktiež výrazné poruchy z meraní z akcelerometra. No pri porovnaní s meraniami s gyroskopom je statická chyba merania vyššia než v prípade gyroskopu. Tu

je však potrebné uvedomiť si, že ide o kompromisné riešenie, kde potrebujeme zabezpečiť minimálnu kvalitu merania na celom spektre zmien uhlovej polohy.



Obr. 5.10 Meranie uhlovej polohy pomocou komplementárneho filtra

Váhu w_1 a jej zmenu na základe absolútnej veľkosti meraného vektora zosilnenia je možné vidieť na Obr. 5.11. V tomto prípade je už jej zmena výrazná oproti predchádzajúcemu prípadu, jej pokles je až na hodnotu 0.37.



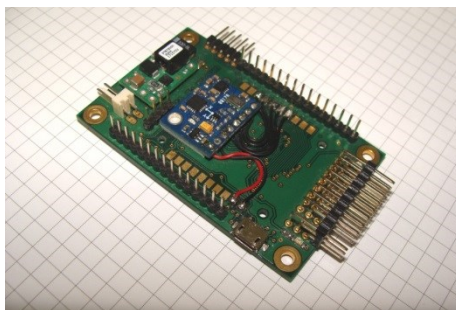
Obr. 5.11 Graf zmeny váhy w_1 v porovnaní s veľkosťou meraného vektora zrýchlenia

5.2.3 Zhrnutie k AQCF

Predstavili sme nami navrhnutý komplementárny filter využívajúci kvaternióny s adaptívnym zosilnením. Toto zosilnenie je možné meniť na základe znalosti systému, kde sa AQCF plánuje používať. V našom prípade je najväčší dôraz kladený na vlastnosti meraní z akcelerometra, a teda na absolútnu veľkosť meraného vektora, ktorý by v ideálnom prípade nemal prekročiť veľkosť $1g$. Keďže však pri rýchlych pohyboch vplývajú na merania aj zrýchlenia spôsobené samotným pohybom, mení sa aj absolútna veľkosť meraného vektora zrýchlenia, čo výrazne skresľuje merania z akcelerometra. Z výsledkov overenia AQCF je vidieť, že nami navrhnutý filter je schopný odfiltrovať jednosmernú zložku driftu, ktorá vzniká po integrácii meraní z gyroskopu. Taktiež sme schopní výrazne redukovať vplyv chýb z meraní pomocou akcelerometra. Aj keď v prípade rýchlych zmien sú merania z gyroskopu omnoho lepšie ako zo samotného filtra, je samotné použitie gyroskopu veľmi obmedzené a v rámci pracovného rozsahu od pomalých až po rýchle zmeny náklonu sa ukazuje ako vhodnejšie používať práve AQCF na sledovanie náklonov v robotických systémoch.

6. Meracia a riadiaca elektronika

Predstavíme si v krátkosti meraciu a riadiacu elektroniku, ktorá bola navrhnutá a vyvinutá za účelom implementácie riadiacich a meracích algoritmov predstavených v tejto práci (Obr. 6.1). Dôraz pri návrhu tejto elektroniky bol kladený hlavne na univerzálnosť tejto dosky a na vhodný výpočtový výkon v pomere k spotrebe samotnej dosky.



Obr. 6.1 Riadiaca elektronika

Na základe výbernej skúsenosti s vnorenými systémami založenými na ARM mikrokontroléroch STM32 [9] sme sa rozhodli túto dosku postaviť na základe jednočipového mikrokontroléra (ďalej len MCU) STM32F405RG [10]. Jadrom tohto MCU je ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU o výkone 210 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz, veľkosť FLASH je 1MB a RAM 192KB. Samotné MCU obsahuje veľké množstvo periférií, ktoré sa výborne hodia na riadenie robotických aplikácií. Na riadiacej doske sú použité nasledujúce snímače:

- Združený snímač MPU-6050 obsahujúci 3-osový MEMS akcelerometer a 3-osový MEMS gyroskop
- HMC5883L – magnetometer/digitálny kompas
- MS5611 – tlakový snímač určený pre meranie atmosférického tlaku a jemu prislúchajúcej výšky

Nami navrhnutá riadiaca a meracia elektronika založená na ARM mikropočítači s jadrom Cortex M4 sa ukázala byť, od fázy overenia až po fázu implementácie, výborným nástrojom na implementáciu riadiacich a meracích algoritmov v prípade mobilných robotických systémov, kde je dôležitý vysoký výpočtový výkon (MCU ma výkon 210DMIPS) a nízka spotreba. Pri overení algoritmov AQCF sa ukázalo, že s prehľadom vieme zvládať vzorkovanie (pri náročných výpočtoch) 500Hz bez použitia numerickej optimalizácie výpočtov. Pritom priemerná spotreba pri týchto meraniach bola približne 150mA s použitím Bluetooth modulu pre posielanie dát do PC.

7. Záver

Predstavili sme koncepciu mobilného podvozku typu AMAV, ktorého vlastnosťou je zmena polohy ťažiska v rámci tela AMAV, ktorá vedie k zmene charakteru systému zo stabilného kmitavého na nestabilný resp. naopak. V práci sme odvodili všeobecný matematický model takéhoto systému pomocou zovšeobecnenej vzdialenosti ťažiska voči osi kolies. Na základe matematického modelu sme odvodili pole-placement riadenie a toto riadenie sme simulačne overili pre prípad lineárneho aj nelineárneho modelu (v rámci pracovných bodov) pre stabilný aj nestabilný režim. Na základe analýzy matematického modelu sme odvodili aj možné riešenie odhadu parametra L, teda zovšeobecnenej vzdialenosti ťažiska od osi kolies. Navrhli sme tiež možné riešenie adaptivity riadenia na zmenu tohto parametra.

V druhej časti práce sme pojednali o možnostiach merania postoja/náklonov AMAV pre účely riadenia. Ako výhodné sa na tento účel ukazujú byť príslušné inerciálne MEMS snímače, menovite MEMS gyroskop a MEMS akcelerometer. Predstavili sme si vlastnosti týchto snímačov a uviedli sme aj ich hlavné nedostatky. Predstavili sme si naše riešenie algoritmu fúzie dát z MEMS gyroskopov a MEMS akcelerometrov pomocou adaptívneho komplementárneho filtra s využitím kvaterniónov (AQCF). AQCF sme overili pre modelové prípady a na základe toho sme zvolili také nastavenie, ktoré sa pre naše účely zdá byť výhodné. Tento typ filtra sme implementovali na nami navrhnutej riadiacej a meracej doske postavenej na jednočipovom mikropočítači STM32F4 s jadrom ARM Cortex M4.

7.1 Prínosy dizertačnej práce

Za hlavné prínosy dizertačnej práce považujeme :

- Odvodenie jednotného matematického modelu AMAV (Amphibious Mono Axial Vehicle) so zovšeobecnenou vzdialenosťou ťažiska od osi kolies.
- Návrh a syntézu riadenia AMAV na báze pole-placement s možnosťou adaptivity na základe odhadu vzdialenosti ťažiska od osi kolies.

- Analýzu vlastností MEMS snímačov a návrh adaptívneho komplementárneho filtra s použitím kvaterniónov (AQCF) pre reprezentáciu rotácií.
- Implementáciu a reálne overenie AQCF na modelových situáciách.
- Návrh a výrobu riadiacej a meracej elektroniky pre mobilné roboty s použitím jednočipového mikropočítača STM32F4 s jadrom ARM Cortex M4.

7.2 Budúce ciele

V rámci budúcej práce je naším cieľom úprava samotnej štruktúry adaptívneho komplementárneho filtra tak, aby sme vedeli výrazne zlepšiť jeho vlastnosti v prípadoch, kedy sú merania z gyroskopu veľmi kvalitné. Taktiež máme z väčšej časti rozpracovaný hardvér pre fyzickú realizáciu podvozku typu AMAV ako takého, ktorého fotografiu sme uviedli na Obr. 2.1. Táto realizácia využíva pohonné jednotky MAXON (napájanie pomocou LiPol batérií) a riadiacu jednotku, ktorú sme si tiež predstavili v tejto práci. Preto by sme radi pokračovali na jeho vývoji, kde bude ešte potreba finálneho návrhu výsuvnej plošiny a jeho realizácia, ako aj overenie metód riadenia navrhnutých v tejto práci.

8. Literatúra

- [1] S. A. Vittorio, „MicroElectroMechanical Systems (MEMS),“ 10 2001. [Online]. Available: <http://www.csa.com/discoveryguides/mems/overview.php>.
- [2] MNX, „MNX MEMS and Nanotechnology Exchange,“ [Online]. Available: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>.
- [3] L. G. Michelle Clifford, „Measuring Tilt with Low-g Accelerometers,“ 5 2005. [Online]. Available: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3107.pdf.
- [4] Analog Devices, „ADXRS450: $\pm 300^\circ/\text{SEC}$ HIGH VIBRATION IMMUNITY DIGITAL GYRO,“ [Online]. Available: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXRS450.pdf.
- [5] G. K. Smyth, „Numerical Integration,“ rev. *Encyclopedia of Biostatistics*, Chichester,, John Wiley & Sons, Ltd, 1998.
- [6] R. O. Riccardo Antonello, „MEMS Gyroscopes for Consumer and Industrial Applications,“ rev. *Microsensors*, Rijeka, InTech, 2011, pp. 253-280.
- [7] E. R. Bachmann, INERTIAL AND MAGNETIC TRACKING OF LIMB SEGMENT ORIENTATION FOR INSERTING HUMANS INTO SYNTHETIC ENVIRONMENTS, Cincinnati: B.A., University of Cincinnati, 2000.
- [8] J. Calusdian, A PERSONAL NAVIGATION SYSTEM BASED ON INERTIAL AND MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS, MONTEREY, CALIFORNIA: NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 2010.
- [9] ST Microelectronics, „STM32 32-bit ARM Cortex MCUs,“ [Online]. Available:

<http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169>.

- [10] ST microelectronics, „STM32F405RG, High-performance and DSP with FPU, ARM Cortex-M4 MCU with 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, Art Accelerator,“ [Online]. Available:
<http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN1035/PF252144>.
- [11] Maxon Motor, „Maxon Motor,“ [Online]. Available:
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/>.
- [12] A123 Systems, „A123 Systems,“ [Online]. Available:
<http://www.a123systems.com/>.
- [13] MNX, „MEMSnet,“ MNX, [Online]. Available:
http://www.memsnet.org/mems/what_is.html.

9. Publikované práce autora

9.1 Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

Stability Control Design of Segway™ Like Differential Drive by Using MEMS Sensors, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Stability Control Design of Segway™ Like Differential Drive by Using MEMS Sensors. Metalurgija. Metallurgy Roč. 49, č. 2. s. 483--487. ISSN 0543-5846

Citované v :

- DEKAN, M.-DUCHOŇ, F.-VITKO, A.: Global metric map for mobile robotics. ATP Journal PLUS 1/2011 s.65-68
- PESTÚN, I.-HALÁS, M.-KURČÍK, P.: CONTROL OF AN RC HELICOPTER MODEL THROUGH USB INTERFACE. Proceedings of the 18th International Conference on Process Control, June 14–17, 2011, Tatranská Lomnica, Slovakia str. 174–181, 2011.

Localization of Small Mobile Robot by Low-Cost GPS Receiver, Hanzel, Jaroslav -- Klůčik, Marian -- Duchoň, František -- Rodina, Jozef. Journal of Mechanics Engineering and Automation Vol. 3, Iss. 8. s. 522--528. ISSN 2159-5283

Global navigation systems for mobile robots, Hanzel, Jaroslav -- Duchoň, František -- Rodina, Jozef -- Pászto, Peter. International journal of systems applications, engineering & development Vol. 7, Iss. 5. s. 279—286. ISSN 2074-1308

9.2 Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

Generalized Model of the Two-Wheeled Mobile Robot, Hubinský, Peter -- Rodina, Jozef, Generalized Model of the Two-Wheeled Mobile Robot. ATP Journal plus č. 1 : Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. s. 108--111. ISSN 1336-5010

Hybrid Control of the Mono Axial Vehicle, Hubinský, Peter -- Rodina, Jozef, Hybrid Control of the Mono Axial Vehicle. AT&P Journal Plus č. 1: Systémy automatického riadenia. s. 84--88. ISSN 1336-5010

Modelling of the VTOL Micro Aerial Mobile Robot, Chovancová, Anežka -- Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Modelling of the VTOL Micro Aerial Mobile Robot. ATP Journal plus č. 1 : Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. s. 104--107. ISSN 1336-5010

Využitie MEMS snímačov na stabilizáciu a riadenie mobilných robotických platforiem, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Využitie MEMS snímačov na stabilizáciu a riadenie mobilných robotických platforiem. EE časopis pre elektrotechniku a energetiku Roč. 15, č. 4. s. 38--40. ISSN 1335-2547

Citované v :

- Dekan, M.-Vitko, A.-Tolgyesy, M.-Babinec, A.: Globálna navigácia pre mobilný robot. EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku a informačné a komunikačné technológie, 4/2012, s.28-29

9.3 Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

MATLAB Simulink Block for MEMS Based Attitude Sensor, Palkovič, Lukáš -- Rodina, Jozef -- Chovanec, Ľuboš -- Hubinský, Peter, MATLAB Simulink Block for MEMS Based Attitude Sensor. In Selected Topics in Modelling and Control Vol. 8. Bratislava: Slovak University of Technology Press, 2012, s. 116--120. ISBN 978-80-227-3840-8

9.4 Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Identification of Vertical Deep-Ocean Pipe End-Point Position, Hubinský, Peter -- Rodina, Jozef -- Hanzel, Jaroslav -- Rudolf, Boris, In Tenth (2013) ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, Szczecin, Poland, September 22-26, 2013, s. 234--238. ISBN 978-1-880653-92-0, ISSN 1946-0066

Evaluation and the Use of GPS Receivers for Small Mobile Robots in Local Coordinate System, Hanzel, Jaroslav -- Klúčik, Marian -- Duchoň, František -- Rodina, Jozef, Evaluation and the Use of GPS Receivers for Small Mobile Robots in Local Coordinate System. In IN-TECH 2012 : Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Rijeka, Croatia, 26. - 28. 09. 2012. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, s. 503--506. ISBN 978-953-6326-77-8

Processing of GPS Data for Mobile Robot, Hanzel, Jaroslav -- Duchoň, František -- Rodina, Jozef -- Pászto, Peter, Processing of GPS Data for Mobile Robot. In Recent Advances in Robotics, Aeronautical and Mechanical Engineering : 1st International Conference on Mechanical and Robotics Engineering (MIREN '13), 1st International Conference on Aeronautical and Mechanical Engineering (AEME'13). Athens, Greece, May 14-16, 2013. [s.l.]: WSEAS, 2013, s. 128--133. ISBN 978-1-61804-185-2

The Search for Optimal Trajectories of the Welding Tool in the Automatic Welding Line Using Evolutionary Computation, Klůčik, Marian -- Pászto, Peter -- Babinec, Andrej -- Jurišica, Ladislav -- Hanzel, Jaroslav -- Rodina, Jozef, The Search for Optimal Trajectories of the Welding Tool in the Automatic Welding Line Using Evolutionary Computation. In IN-TECH 2012 : Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Rijeka, Croatia, 26. - 28. 09. 2012. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, s. 229--232. ISBN 978-953-6326-77-8

IMU Platform for Workshops, Palkovič, Lukáš -- Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, IMU Platform for Workshops. In Robotics in Education 2011 : 2nd International Conference. Vienna, Austria, 15-16 August 2011. Vienna: INNOC, 2011, s. 129--133. ISBN 978-3-200-02273-7

Integration of Inertial Measuring Unit Platform into MATLAB Simulink, Palkovič, Lukáš -- Rodina, Jozef -- Chovanec, Ľuboš -- Hubinský, Peter, Integration of Inertial Measuring Unit Platform into MATLAB Simulink. In 9th IFAC Symposium on Advances in Control Education, June 19-21, 2012, Nizhny Novogorod, Russia. New York: IFAC, 2012, s. 200--205. ISBN 978-3-902823-01-4

Citované v :

- Kalúz, M. – Čirka, Ľ. – Fikar, M.: Virtual and Remote Laboratories in Education Process at FCFT STU. Proceedings of the 14th International Conference on Interactive Collaborative Learning, International Association of Online Engineering, Kirchengasse 10/200, A-1070, Wien, Austria, Piešťany, Slovakia, str. 134–139, 2011.
- МОТОРИН, АВ, ОА СТЕПАНОВ, and ЛП СТАРОСЕЛЬЦЕВ. "РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ." pp,129. СБОРНИК ТРУДОВ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СЕМИНАРА, АЛУШТА 2013

Advanced Control of the Mono Axial Vehicle with Variable Parameters, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Advanced Control of the Mono Axial Vehicle with Variable Parameters. Procedia Engineering Vol. 48 : Modelling of Mechanical and Mechatronics Systems. 5th International Conference. Zemplínska Šírava, Slovakia, November 6- 8, 2012. s. 592--598. ISSN 1877-7058

Motion Control of Mono Axial Vehicle, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Motion Control of Mono Axial Vehicle. In Process Control 2010 : 9th International Conference. Kouty nad Desnou, 7.-10. 6. 2010. Pardubice: University of Pardubice, 2010, s. 016. ISBN 978-80-7399-951-3

Controlling a Hexapod Robotic System with Hand Gestures Using a Depth Camera, Tölgyessy, Michal -- Hubinský, Peter -- Rodina, Jozef, Controlling a Hexapod Robotic System with Hand Gestures Using a Depth Camera. In Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012 (MMK 2012) : Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference; 10.-14.prosince 2012, Hradec Králové. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012, s. 3318--3323. ISBN 978-80-905243-3-0

9.5 Publikované příspěvky na domácích vědeckých konferenciách

GPU-Accelerated Parallel Genetic Algorithms, Kozák, Andrej -- Hujsi, Ivan -- Rodina, Jozef, GPU-Accelerated Parallel Genetic Algorithms. In GCCP 2011 Proceedings : 7th International Workshop on Grid Computing for Complex Problems. Bratislava, Slovakia, October 24 - 26, 2011. Bratislava: Slovak Academy of Sciences, 2011, s. 86--92. ISBN 978-80-970145-5-1

Mono Axial Vehicle Platform for Education Purposes, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Mono Axial Vehicle Platform for Education Purposes. In Robotics in Education 2010 : Proceedings of the 1st International Conference. Bratislava, 16.-17. 9. 2010. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2010, s. 139--145. ISBN 978-80-227-3353-3

Citované v :

- František Duchoň, Martin Dekan, Ladislav Jurišica, Anton Vitko: Some Applications of Laser Rangefinder in Mobile Robotics. Journal of Control Engineering and Applied Informatics (CEAI), Vol.14, No.2, pp. 50-57, 2012

Návrh riadenia stabilizácie diferenciálneho podvozku typu segway pomocou pohybových MEMS snímačov, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Návrh riadenia stabilizácie diferenciálneho podvozku typu segway pomocou pohybových MEMS snímačov. In ŠVOČ 2009 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 29.4.2009. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2009, ISBN 978-80-227-3094-5

Stabilization of the Segway Like Mobile Platform by Using MEMS Sensors, Rodina, Jozef -- Hubinský, Peter, Stabilization of the Segway Like Mobile Platform by Using MEMS Sensors. In Modelling of the Mechanics and Mechatronics Systems MMaMS '2009 : Modelovanie mechanických a mechatronických sústav MMaMS'2009 : 3rd International Conference. Proceedings of Lectures. Zemplínska Šírava, Slovak Republic,

22.-24.9.2009. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2009, s. 402--406. ISBN 978-80-553-0288-1

Citované v:

- JURIŠICA,L.-DUCHOŇ,F.: Triangulation of mobile robot position with detected inherent environment landmarks. International Journal of Mechanics and Control, Vol. 10, No.02, 2009, ISSN 1590-8844, s.15-25
- DEKAN,M.-DUCHOŇ,F.-JURIŠICA,L.-VITKO,A.: Platform iRobot Create for Educational Purposes. Proc. Of MMaMS 2011, Modelling of Mechanical and Mechatronic systems 2011, September 20 – 22, 2011 Herľany, Slovak Republic, s.44-52.
- Martin Dekan, František Duchoň, Ladislav Jurišica, Anton Vitko and Andrej Babinec: iRobot Create Used in Education. Journal of Mechanics Engineering and Automation 3 (2013), s.197-202
- Martin Dekan, Luboš Chovanec, Andrej Babinec, Anton Vitko: New Modules for the iRobot Create Platform Procedia Engineering, Volume 48, 2012, Pages 65–72
- Jurišica Ladislav, Duchoň František: Triangulation of Mobile Robot Position with Detected Inherent Environment Landmarks. International Journal of Mechanics and Control, Vol.10, No.02, 2009 ISSN 1590-8844

9.6 Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií

Dni mobilnej robotiky, Duchoň, František -- Babinec, Andrej -- Rodina, Jozef -- Palkovič, Lukáš, Dni mobilnej robotiky. Spektrum : periodikum Slovenskej technickej univerzity v Bratislave Roč.19, č.3. s. 10. ISSN 1336-2593