

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Lukáš Palkovič

Autoreferát dizertačnej práce

VYUŽITIE INERCIÁLNYCH SNÍMAČOV PRI RIADENÍ ŽERIAVOV

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 dennej forme doktorandského štúdia na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Lukáš Palkovič

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Boris Rohaľ-Ilkiv, CSc.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Strojnícka fakulta
Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

Prof. Ing. Aleš Janota, PhD.

Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra riadiacích a informačných systémov
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Dizertačná práca bola podporená z projektov VEGA 1/0178/13 a APVV-0261-10.

Autoreferát bol rozoslaný

Obhajoba dizertačnej práce sa koná

dňa

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

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Vybrané použité algoritmy riadenia.....	9
2.1	<i>Zvýšenie tlmenia dominantnej pólovej dvojice</i>	<i>9</i>
2.2	<i>Spektrálna úprava vstupného signálu.....</i>	<i>10</i>
2.3	<i>On-line tvarovanie</i>	<i>10</i>
2.4	<i>ZV tvarovač (Zero Vibration Shaper).....</i>	<i>11</i>
3	Meranie akcelerometrom na bremene	11
3.1	<i>Meranie výchylky - statický režim</i>	<i>11</i>
3.2	<i>Dynamický režim</i>	<i>12</i>
4	Adaptívne nastavovanie tvarovača.....	14
5	Riadenie	15
6	Určenie základnej orientácie voči súradnicovému systému základne	16
6.1	<i>Určenie sklonu a klopenia pomocou akcelerometra</i>	<i>17</i>
6.2	<i>Určenie orientácie v horizontálnej rovine pomocou akcelerometra</i>	<i>18</i>
6.3	<i>Určenie orientácie v horizontálnej rovine pomocou gyroskopu alebo magnetometra.....</i>	<i>19</i>
7	Použitý hardvér	19
7.1	<i>Mechanika</i>	<i>19</i>
7.2	<i>Hardvér snímačovej jednotky.....</i>	<i>21</i>
7.3	<i>Hardvér riadiacej jednotky.....</i>	<i>21</i>
8	Merania a dosiahnuté výsledky	22
8.1	<i>Voľné kyvadlo bez riadenia</i>	<i>23</i>
8.2	<i>Polohovanie bez riadenia.....</i>	<i>25</i>
8.3	<i>Polohovanie s riadením s derivačnou spätnou väzbou</i>	<i>25</i>
8.4	<i>Polohovanie so ZV tvarovačom.....</i>	<i>27</i>
8.5	<i>Polohovanie s riadením s natočeným snímačom so identifikovanou orientáciou bremena</i>	<i>28</i>
9	Pojednanie o praktickej realizovateľnosti.....	30
9.1	<i>Tvarovanie riadiaceho signálu</i>	<i>30</i>
9.2	<i>Riadenie s derivačnou spätnou väzbou.....</i>	<i>31</i>
10	Záver	32
10.1	<i>Prínosy dizertačnej práce</i>	<i>33</i>
11	Bibliografia	33

1	Publikované práce autora	34
1.1	<i>Autorské osvedčenia, patenty, objavy</i>	34
1.2	<i>Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch</i>	34
1.3	<i>Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch.....</i>	34
1.4	<i>Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách.....</i>	35
1.5	<i>Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách.....</i>	35
1.6	<i>Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách</i>	36
1.7	<i>Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií</i>	36

Využitie inerciálnych snímačov pri riadení žeriavov

Abstrakt

V súčasnosti sa v podnikovej oblasti stále viac tlačí na efektivitu jednotlivých činností, čím sa znižujú náklady a zvyšuje celková konkurencieschopnosť. To sa samozrejme vzťahuje aj na výrobné a logistické zariadenia, ktoré treba využívať v čo najvyššej miere pri čo najkratších výrobných cykloch. Pri tom všetkom sa dbá na bezpečnosť.

Jedným z javov, ktoré v tomto smere nie zrovna hrajú do karát je aj kmitanie systémov. Neželané kmity spôsobujú zníženie kvality riadenia a najmä predlžujú dobu operácie. Okrem iného sa to týka aj žeriavov.

Práca obsahuje modely vybraných kmitavých systémov a zaoberá sa metódami ich riadenia, pričom kladie dôraz práve na obmedzenie vzniknutých reziduálnych kmitov.

V ostatnom období sme svedkami veľmi rýchleho vývoja v oblasti MEMS technológií a ich nasádzania v rôznych oblastiach. Ved' dnes už každý smartfón obsahuje aspoň akcelerometer.

Ťažiskom tejto práce je skúmanie možností využitia MEMS snímačov práve na riadenie žeriavov tak, že sa tieto snímače umiestnia na bremeno žeriava a budú snímať pohybové veličiny bremena. Analyzované sú zrýchlenia, rotácie a magnetická indukcia snímané na bremene a je navrhnutý algoritmus zameraných signálov práve za účelom tlmenia kmitov. Iná metóda rozoberá identifikáciu vlastnej frekvencie kmitov za účelom nastavenia dopredného riadenia. Okrem toho sme sa venovali možnosti ľubovoľnej orientácie snímača na bremene a príslušnej transformácie do orientácie vhodnej na riadenie.

Navrhnuté metódy spätnoväzobného riadenia boli otestované na reálnom modeli žeriava.

Kľúčové slová riadenie žeriava, tvarovač vstupného signálu, MEMS snímače, akcelerometer, gyroskop

Using MEMS sensor for crane control

Abstract

These days there is a significant demand on the effectiveness of the processes in the companies in order to lower the costs and increase the competitiveness of the business. This has to do with manufacturing and logistical processes and technologies. They have to be used as much as possible and their manufacturing cycles must be shortened while keeping the highest safety standards. One of the effects that plays against these requirements is residual vibrations. These undesirable vibrations cause lower control quality, especially increase of the settling time. This thesis contains several models of oscillating mechanical systems and deals with control systems designed to deal with the residual vibrations. One of the expanding technological areas of the last years have been MEMS technologies and their use in various areas of our lives. Note that every smartphone contains at least an accelerometer. The core of this thesis is to investigate the possibilities to use the MEMS sensors in the control of the cranes. The idea is to locate such sensor on the payload. We analyze the accelerations, rotations and magnetic induction measured on the payload during the oscillations. Then we design a controller using these signals to reduce the oscillations. A different method is concerned with the identification of the natural frequency of the oscillations for a feed forward control. We also analyzed the possibilities how to deal with an arbitrary orientation of the sensor on the payload and found a way how to transform measured data to an orientation convenient for the control algorithms. The proposed methods were verified on a real crane model.

Keywords: MEMS sensor, accelerometer, crane control, gyroscope, input signal shaper

1 Úvod

Ekonomický tlak na minimalizáciu nákladov, zefektívňovanie technologických cyklov a zvyšovanie nárokov na ponúkané výrobky a služby vedie k neustálym technologickým inováciám a vylepšeniam. Nové prístupy sa hľadajú aj v oblastiach, v ktorých boli doterajšie riešenia plne vyhovujúce. V takýchto prípadoch pomôže často iný pohľad na vec, ktorý vychádza z dôkladnej analýzy príslušnej problematiky. To pomôže nájsť procesy s nižšou priepustnosťou brzdiace danú prevádzku a príčiny spomalenia. Po tomto kroku je treba sa zamerať na elimináciu tohto problému.

Problematické miesta môžu mať rôzny charakter. Popri štandardnom nahrádzaní ľudskej práce rýchlejšími, efektívnejšími a na prevádzku lacnejšími strojmi sa dajú nájsť aj čisto technické problémy, ktorých riešenie môže priniesť zaujímavý prínos. Medzi javy, ktorým sa v praxi nie vždy venuje adekvátne pozornosť sú mechanické systémy s nízkym tlmením. S tým súvisí vznik oscilácií, ktoré sprevádzajú (nielen) polohovacie procesy. Obzvlášť oneskorenia spôsobené tzv. reziduálnymi osciláciami majú za následok celkové spomaľovanie výroby a logistiky.

Medzi typické systémy s nízkym tlmením patria mechanizmy využívajúce remeňové alebo harmonické prevodovky, napríklad robotické štruktúry [1] [2], rozmerné telesá, pri ktorých prevažuje niektorý rozmer [3]. Ďalej možno spomenúť prepravu tekutín v otvorených nádobách na pásových dopravníkoch, u ktorých je treba zabrániť vyšplachnutiu tekutín pri nesúvislom pohybe [4] alebo slnečné panely umelých družíc [5]. Z výpočtovej techniky možno spomenúť polohovanie čítacích hláv páskových mechaník alebo pevných diskov [6] [7]. Ako jeden z najdôležitejších príkladov možno uviesť polohovanie bremien pomocou žeriavov, či už mostového alebo vežového typu.

Táto práca sa venuje analýze kmitavých systémov a metódam riadenia používaným pre zamedzenie kmitania. Hlavná pozornosť je venovaná mostovým žeriavom, pričom sa snažíme poskytnúť nový pohľad do tejto oblasti.

Našu pozornosť upútala v súčasnosti intenzívne sa rozvíjajúca oblasť snímačov na báze mikroelektromechanických systémov (MEMS), a to najmä akcelerometrov a gyroskopov, ktoré slúžia na meranie veličín pohybu a orientácie v priestore. Tu sa rovno ponúka možnosť merať tieto veličiny na bremene žeriava a zmerané signály využiť ako spätnú väzbu pre riadenie.

V práci zisťujeme, aký charakter majú jednotlivé signály, ktoré sa dajú na bremene zmerať a hľadáme možnosti ich využitia.

Jednou z možností je meranie zrýchlení za účelom identifikácie vlastnej frekvencie kmitavého systému. Tá sa potom môže využiť na nastavenie parametrov tzv. tvarovačov riadiaceho signálu, čo spadá do problematiky dopredného riadenia.

Inou možnosťou je využitie signálu z gyroskopov na účely riadenia so spätnou väzbu. Tu sa javí ideálna možnosť využitia signálu z gyroskopu v derivačnej spätnej väzbe.

Osobitná pozornosť je venovaná problému rôznej orientácie snímača voči žeriavu, resp. bremenu. Boli vyvinuté algoritmy pre zistenie tejto orientácie za účelom transformácie zmeraných údajov do vhodnej podoby.

Za účelom praktického overenia bola na pracovisku zhotovená vhodná snímacia doska a riadiaca elektronika. Tie boli potom využité na riadenie modelu žeriava s krokovými motormi vzniknutého úpravou komerčnej frézy. Na tejto hardvérovej zostave boli vybrané algoritmy dôkladne otestované.

2 Vybrané použité algoritmy riadenia

Pre elimináciu kmitov v kmitavých systémov možno postupovať rôznymi spôsobmi počnúc spomalením pracovného cyklu, pokračujúc mechanickým spevnením, tvarovaním vstupného signálu až po pomerne náročné metódy optimálneho stavového riadenia využívajúce spätnú väzbu.

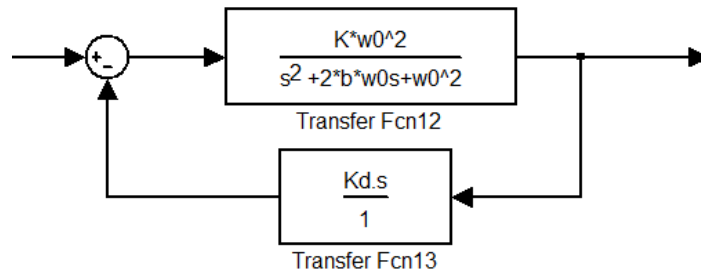
Väčšina kmitavých systémov, u ktorých sa vyskytujú neželané reziduálne kmity sa dá popísať pomocou prenosovej funkcie:

$$F(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2b\omega_0s + \omega_0^2} \quad (2.1)$$

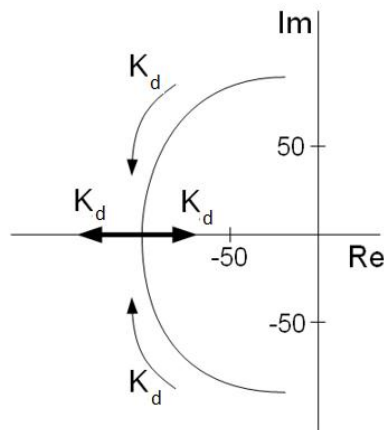
K je zosilnenie systému, ω_0 je vlastná frekvencia systému a b je tlmenie tohto systému. Je zrejmé, že výrazné reziduálne kmity budú vykazovať systémy s veľmi nízkymi hodnotami tlmenia, a to menšími ako asi 0,2, pričom veľa kmitavých systémov máva tlmenie výrazne menšie ako 0,1. V technickej praxi sa toto tlmenie často dokonca úplne zanedbáva.

2.1 Zvýšenie tlmenia dominantnej pólovej dvojice

Zatlmenie reziduálnych kmitov možno dosiahnuť zvýšením tlmenia dominantnej pólovej dvojice. Prirodzene sa najprv ponúka mechanický spôsob, ktorý ale nie je jednoduché realizovať. Zavedením vhodnej spätnej väzby s deriváciou a zosilnením K_d podľa Obr. 2.1 však je možné podľa potreby upraviť tlmenie uzavretého regulačného obvodu. S meniacim sa K_d sa poloha pólov mení podľa Obr. 2.2.



Obr. 2.1 Derivačná spätná väzba



Obr. 2.2 Pohyb pólov pri zmene zosilnenia v spätnej väzbe

Nevýhodou je, že v prípade viacerých kmitavých pólových dvojíc sa s rastúcim zosilnením K_d každá druhá dvojica tlačí doprava, čím v prípade dostatočne veľkého K_d spôsobí nestabilitu systému.

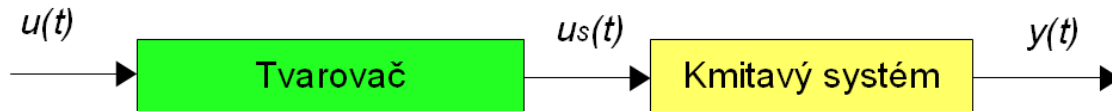
2.2 Spektrálna úprava vstupného signálu

Amplitúda vybudených kmitov závisí od amplitúdy spektra budiaceho signálu na vlastnej frekvencii systému. V prípade, že je amplitúda spektra budiaceho signálu na vlastnej frekvencii nulová, nepríde k vybudeniu kmitov vôbec [AAA].

Dopredné metódy tlmenia kmitov využívajú práve túto skutočnosť. Úprava spektra vstupného signálu sa dosahuje buď priamo generovaním signálu s dopredu určeným spektrom (tzv. off-line tvarovanie) alebo vkladáním vhodných filtrov pred riadený kmitavý systém, pričom vhodnejšími sú filtre s konečnou impulznou odozvou (on-line tvarovanie).

2.3 On-line tvarovanie

Principiálna schéma on-line tvarovania je na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Zapojenie on-line tvarovača riadiaceho signálu

FIR filtre používané na úpravu riadiaceho signálu za účelom tlmenia reziduálnych kmitov zvykneme nazývať tvarovače riadiaceho signálu.

Ich podstatou je to, že riadiaci signál rozložia na niekoľko časovo posunutých zložiek, ktoré jednotlivou síce vybudia čiastkové kmity, avšak v súčte sa tieto kmity vzhľadom na vhodne nastavené fázové posuny a amplitúdy utlmia.

Amplitúdu jednotlivých zložiek označíme A_i a príslušné časové posunutie t_i .

Pre zabezpečenie tlmenia kmitov je treba splniť fázovú podmienku:

$$\sum_{i=1}^N A_i e^{-j t_i \omega_0} = 0 \quad (2.2)$$

pričom pre zabezpečenie jednotkového zosilnenia tvarovača treba dodržať amplitúdovú podmienku

$$\sum_{i=1}^N A_i = 1 \quad (2.3)$$

Hľadaním vhodných amplitúd impulzov A_i a ich oneskorení t_i zistíme, že ich je nekonečný počet, a to pre každé prirodzené číslo N . Pre jednoduchosť je však vhodné voliť malé čísla N a čo najkratšie časy impulzov t_i , resp. oneskorenie posledného impulzu (t_N).

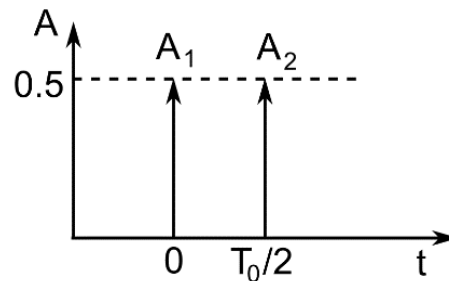
2.4 ZV tvarovač (Zero Vibration Shaper)

Jedná sa o najjednoduchší tvarovač založený na nulovaní spektra na vlastnej frekvencii systému v súlade s (4.21). Má len 2 impulzy a je pomerne rýchly, avšak súčasne je aj citlivý na nepresne určené parametre systému. To je dané vysokou strmou jeho frekvenčnej charakteristiky v okolí vlastnej frekvencie.

Pre nulové tlmenie získavame konštanty:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,5 & \text{v časoch} & t_1=0 \\ A_2 &= 0,5 & t_2=0,5 T_0 = \pi/\omega_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

T_0 je v tomto prípade perioda vlastných kmitov. Rozloženie impulzov je zrejmé z Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Rozloženie impulzov 2 impulzového ZV tvarovača

Z rozloženia impulzov je zrejmé, že vstupný signál sa rozloží na 2, navzájom o pol periódy posunuté, zložky. Prvá zložka vybudí určitú odozvu, kým druhá zložka vybudí takú istú odozvu s tým rozdielom, že bude v protifáze k prvej. Tým príde k eliminácii celkovej odozvy.

Treba spomenúť, časovo posunuté zložky signálu vnášajú do systému oneskorenie, ktoré môže byť neželané.

3 Meranie akcelerometrom na bremene

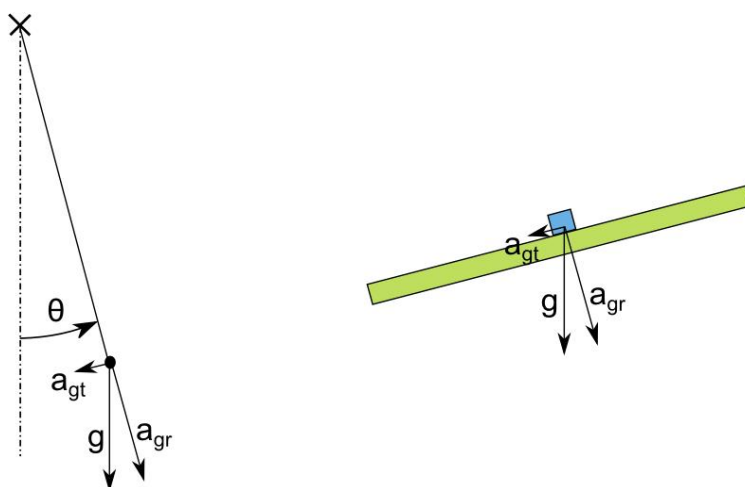
Na prvý pohľad sa priamo núka využitie akcelerometra na meranie výchylky bremena, keďže ide v podstate o sklon bremena, resp. lana, na ktorom je upevnené. To je síce možné, ale len v statickom režime, kedy je bremeno v pokoji a pôsobí naň len gravitačná sila. V momente, kedy sa dá do pohybu, funguje ako kyvadlo a treba brať do úvahy aj jeho harmonický pohyb.

3.1 Meranie výchylky - statický režim

Meranie výchylky pomocou akcelerometra v statickom režime je to isté ako meranie sklonu telesa na šikmej rovine. Gravitačné zrýchlenie sa rozloží (Obr. 3.1) na zložku v tangenciálnom a radiálnom smere:

$$a_{gt} = g \sin(\theta) \quad (3.1)$$

$$a_{gr} = g \cos(\theta) \quad (3.2)$$



Obr. 3.1 Zrýchlenia merané akcelerometrom na bremene v statickom režime a porovnanie s neklonenou rovinou

3.2 Dynamický režim

Na Obr. 3.2 sú zobrazené jednotlivé zložky zrýchlení, ktoré sníma akcelerometer umiestnený na bremene. Pri ďalšom odvodení budeme brať do úvahy len malé výchylky lana.

Bremeno na lane je v tomto prípade považované za ideálne matematické kyvadlo.

Najvhodnejšie je uvažovať v takom súradnicovom systéme bremena, že v jednom smere budeme používať zrýchlenie tangenciálne a v druhom smere zrýchlenie radiálne (v smere odstredivej sily). Obidve sú na seba kolmé.

V radiálnom smere je možné pomocou akcelerometra zmerať zrýchlenie $a_r(t)$ a v tangenciálnom smere $a_t(t)$:

$$a_r(t) = a_{gr}(t) + a_c(t) + a_{ext_r}(t) + z_r(t) \quad (3.3)$$

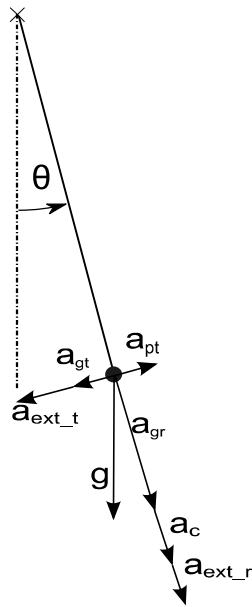
$$a_t(t) = a_{gt}(t) + a_{pt}(t) + a_{ext_t}(t) + z_t(t) \quad (3.4)$$

kde $a_{gr}(t)$ a $a_{gt}(t)$ vyjadrujú príslušné priemety gravitačného zrýchlenia, $a_c(t)$ odstredivé zrýchlenie, $a_{pt}(t)$ tangenciálne zrýchlenie dané harmonickým pohybom bremena, $a_{ext_t}(t)$ a $a_{ext_r}(t)$ zrýchlenie vyvolané vonkajším pôsobením (pohon, poruchy) a $z_r(t)$ a $z_t(t)$ predstavujú šum.

Po dosadení získame nasedovný tvar:

$$a_r(t) = g \cos[\theta_0 \cos(\omega_0 t)] + \theta_0^2 g \sin^2(\omega_0 t) + a_{ext_r}(t) + z_r(t) \quad (3.5)$$

$$a_t(t) = g \sin[\theta_0 \cos(\omega_0 t)] - g \theta_0 \cos(\omega_0 t) + a_{ext_t}(t) + z_t(t) \quad (3.6)$$



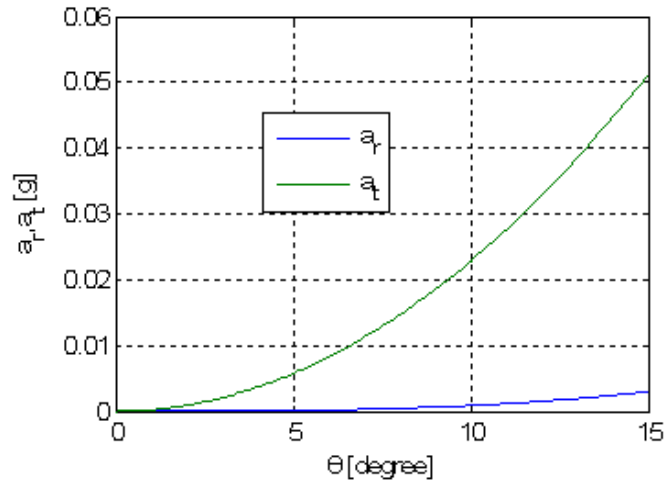
Obr. 3.2 Zrýchlenia pôsobiace na bremeno v dynamickom režime

Pre malé výchylky je tangenciálne zrýchlenie veľmi malé, prakticky nemerateľné. Je to dané tým, že zrýchlenie tvorené kyvadlovým pohybom telesa v tangenciálnom smere prakticky kompenzuje gravitačné zrýchlenie. Je to obdoba voľného pádu, kedy teleso padá so zrýchlením, ktoré je rovné gravitačnému a akcelerometer nameria nulu. Z matematického pohľadu v tangenciálnom smere vystupuje rozdiel funkcie sínus a jej argumentu. Pre malé výchylky sú hodnoty približne rovnaké, a preto je celková nameraná hodnota blízka nule. Odstredivá zložka je priamo úmerná druhej mocnine amplitúdy výchylky θ_0^2 , pričom nezávisí od dĺžky lana a kmitá s uhlovou frekvenciou $2\omega_0$.

Obr. 3.3 zobrazuje závislosť amplitúdy zrýchlení (bez statickej zložky) meraných na kyvadle v závislosti od amplitúdy výchylky. Je vidieť, že okolo desiatich stupňoch výchylky je amplitúda v tangenciálnom smere rádovo v tisícinach g, čo je už takmer na typickej úrovni šumu akcelerometrov. Amplitúdy radiálneho zrýchlenia sú oveľa vyššie – rádovo stotiny g.

Vyhodnocovanie zrýchlenia v tangenciálnom smere teda nie je vhodné na určenia výchylky lana v dynamickom režime. V radiálnom smere má signál vyššie hodnoty, avšak na základe druhej mocniny harmonickej funkcie vystupujúcej vo vzťahu (3.5) sa dá ukázať, že kmitá s frekvenciou $2\omega_0$. Z toho vyplýva, že sa stráca informácia o znamienku a ani samostatný signál zrýchlenia meraného v smere lana nie je vhodný na určenie okamžitej výchylky lana.

Napriek tomu sa takýto signál dá využiť na zisťovanie vlastnej frekvencie kmitania a následne adaptívne nastavenie tvarovača vstupného signálu.



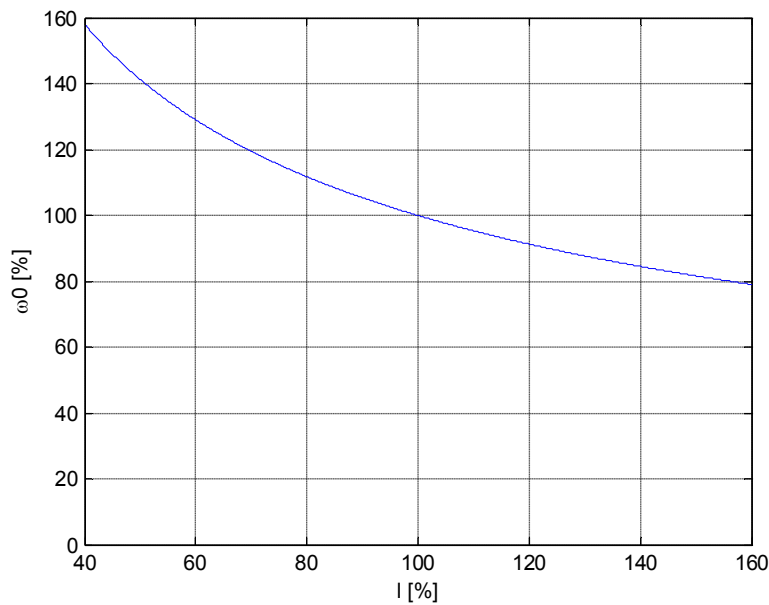
Obr. 3.3 Závislosť amplitúdy zrýchlení na kyvadle v tangenciálnom a radiálnom smere od amplitúdy výchylky

4 Adaptívne nastavovanie tvarovača

Počas prevádzky žeriava sa často mení aj dĺžka lana, ktorý má vplyv aj na vlastnú frekvenciu kmitov podľa vzťahu:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (4.1)$$

Daná závislosť je zobrazená graficky na Obr. 4.1. V prípade použitia štandardného tvarovača s pevne nastavenou frekvenciou znamená zmena vlastnej frekvencie systému nevhodne nastavené oneskorenie tvarovača a tým pádom zhoršenú redukciu reziduálnych kmitov.



Obr. 4.1 Závislosť vlastnej frekvencie kmitania bremena pri zmene dĺžky lana

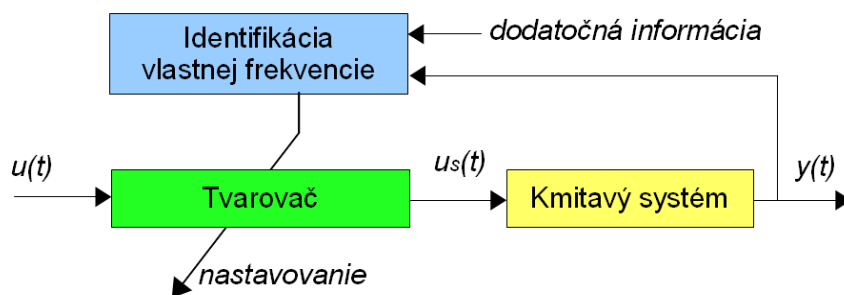
Preto sme sa rozhodli tvarovač nastavovať dynamicky. Na Obr. 4.2 je zobrazená bloková schéma tvarovača s identifikáciou vlastnej frekvencie ω_0 .

Oneskorenia impulzov tvarovača upravujúceho riadiaci signál pre kmitavý systém nie sú v tomto prípade pevne dané ale sú nastavené podľa pôvodne určenej vlastnej frekvencie. V prípade zistenej zmeny vlastnej frekvencie sa táto použije na nové nastavenie tvarovača. Samotnú identifikáciu frekvencie je možné robiť sledovaním vhodnej dodatočnej informácie, napr. konkrétneho parametra, od ktorého priamo ω_0 závisí (napríklad dĺžka lana), alebo frekvenčnou analýzou samotnej odozvy.

Využitie kmitavého priebehu odozvy so sebou prináša protichodné požiadavky. Na jednej strane je cieľom riadenia zabezpečiť čo najmenšiu kmitavú odozvu. Na druhej strane je na určenie vlastnej frekvencie potrebná určitá minimálna amplitúda kmitavej zložky. Stačí si však uvedomiť, že ak je vlastná frekvencia správne určená, netreba ju prestavovať a kmitavá odozva je nulová. Ak sa však systém rozladí, odozva už nie je nulová a využije sa na nové nastavenie tvarovača.

To si samozrejme vyžaduje použitie snímačov, čím sa stráca výhoda uvádzaných dopredných metód. Preto je vhodné zvážiť, či nie je lepšie použiť dané snímače radšej pre spätnoväzobné riadenie.

Nevýhodou tohto prístupu je, že pri zmene nastavenia tvarovača sa skokovo zmení oneskorenie jednotlivých impulzov. To znamená preskočenie alebo opätovné použitie niektorých vzoriek. Následkom je možnosť vzniku nezhody medzi plochou vstupného a tvarovaného signálu.



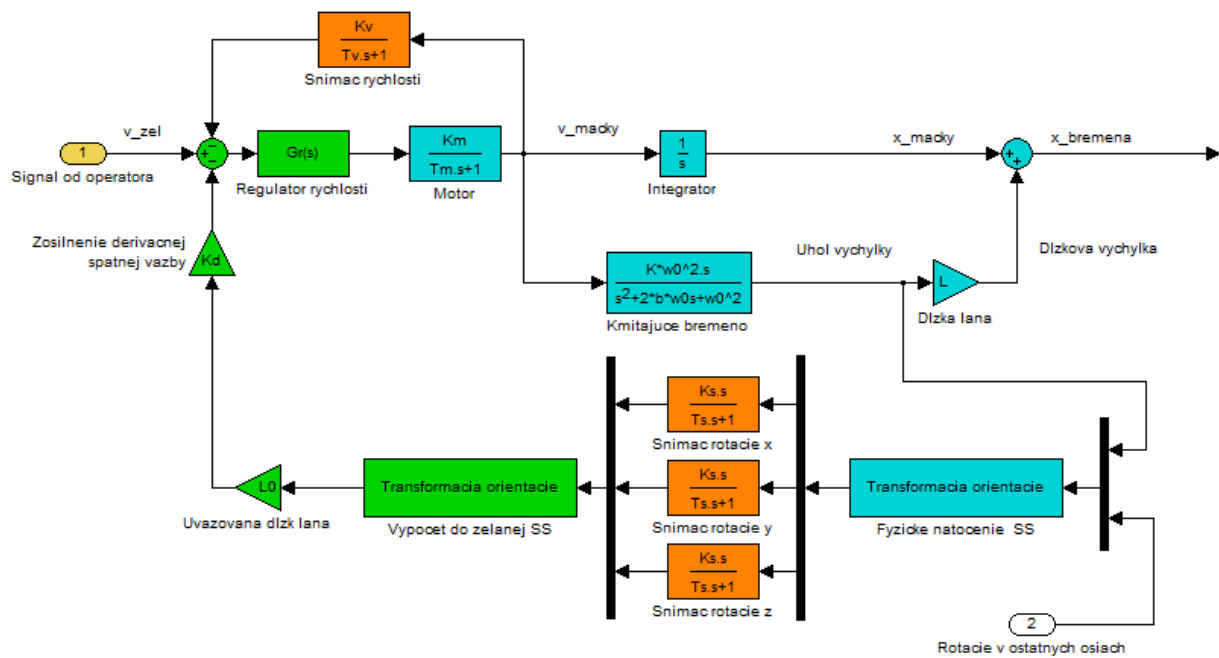
Obr. 4.2 Princíp adaptívneho nastavovania tvarovača

5 Riadenie

Pre riadenie sme využili zvýšenie tlmenia dominantnej pólovej dvojice pomocou derivačnej spätnej väzby. Deriváciu výchylky meriame získavame prirodzene pomocou gyroskopov. Zovšeobecnená schéma riadenia pre jednu os je na Obr. 5.1.

V oboch vodorovných osiach je použité rovnaké riadenie. Motor s jeho rýchlostným riadením je tu vyznačený všeobecne pomocou svojich prenosových funkcií. V našom prípade bol využitý krokový motor v otvorenej slučke a riadenie rýchlosti bolo realizované v otvorenej slučke vhodným časovaním krokov.

Na pohyb mačky reaguje bremeno žeriava cez svoju prenosovú funkciu, pričom na výstupe zodpovedajúceho bloku je uhol výchylky. Uhlovej výchylke je (pri malých výchylkách) priamo úmerná dĺžková výchylka ovplyvňujúca celkovú polohu bremena.



Obr. 5.1 Schéma riadenia žeriava s derivačnou spätnou väzbou u v s využitím gyroskopov

Vzhľadom na ľubovoľnú orientáciu bremena na meranú zmenu výchylky vplyvajú merania aj v ďalších dvoch osiach, je potrebné brať do úvahy zodpovedajúce priemety do iných osí a spätnú transformáciu do nami využíwanej osi.

Pre zatlmenie kmitov sa zmeraná zmena výchylky prenásobí koeficientom daným súčtom $L_0 K_d$, kde L_0 reprezentuje uvažovanú dĺžku lana a K_d zosilnenie derivačnej spätnej väzby. Zisk K_d sme zvolili 0,7, čo je hodnota zodpovedajúca dostatočnému zatlmeniu kmitov. L_0 by mala zodpovedať skutočnej dĺžke lana. Vtedy by sa kompenzovala s dĺžkou lana L vystupujúcou v prenosovej funkcii kmitavého systému.

V našom prípade sa však môže L meniť a nevhodne určený koeficient L_0 má potom vplyv aj na celkové dosahované tlmenie. Preto je potrebné jeho voľbe venovať dostatočnú pozornosť. V prípade malých zmien L je vhodné nastaviť L_0 tak, aby výsledné tlmenie bolo v intervale asi 0,5 až 0,7.

V prípade prísnejších požiadaviek na výsledné tlmenie alebo veľkého rozsahu zmien dĺžky lana by bolo potrebné nahradiť konštantu L_0 premennou hodnotou získanou meraním skutočnej dĺžky lana alebo by bolo možné použiť identifikáciu nepriamo cez identifikáciu vlastnej frekvencie kmitov.

6 Určenie základnej orientácie voči súradnicovému systému základne

Pre spätnú väzbu využívame signál z gyroskopov v smere vodorovných osí žeriava. Bolo by však veľmi nepraktické vyžadovať od obsluhy žeriava presné umiestnenie a orientáciu snímača na bremeno vzhľadom na konštrukciu žeriava.

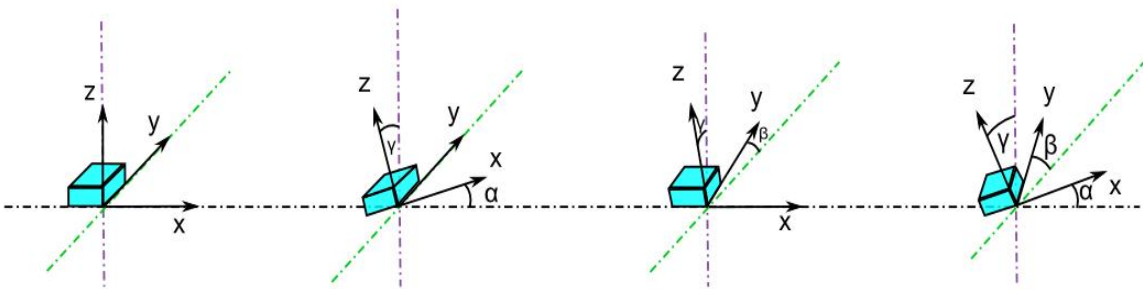
Preto sme sa zaoberali algoritmami ako určiť orientáciu snímača v ľubovoľnej konfigurácii voči základni žeriava a následne túto orientáciu využívať počas určovania orientácie samotného bremena.

Na to treba vykonať nasledovné kroky:

1. Zabezpečiť známu referenčnú polohu bremena. Vhodné je bremeno visiace v pokoji.
2. Určiť sklony jednotlivých osí a zmerať sklon voči vertikále definovanou orientáciou vektora zemskej tiaže.
3. Zabezpečiť dodatočnú podmienku pre určenie orientácie v rámci horizontálnej roviny.
4. Určiť orientáciu v rámci horizontálnej roviny.
5. Tým sa určí celková orientácia snímača voči súradnému systému žeriava. V prípade využitia rotačných matic môže byť celková orientácia snímača na bremene voči žeriavu určená jednou maticou \mathbf{R}_{sb} .
6. Počas prevádzky využiť zmeranú orientáciu snímača na výpočet orientácie, resp. rotácie bremena na účely riadenia. Do riadenia bude teda vstupovať súčin matice \mathbf{R}_{sb} a zmeraného vektora (zrýchlenia, rotácií a pod.) v orientácii snímača.

6.1 Určenie sklonu a klopenia pomocou akcelerometra

Pre určenie orientácie snímača voči vektoru zemskej tiaže budeme predpokladať, že os z bremena bude prechádzať jeho ťažiskom a v ustálenom stave bude totožná so zvislým smerom (a tým aj s osou z základne). V takom prípade bude gravitačné zrýchlenie pôsobiť v osi z bremena. V jednotlivých osiach snímača sa budú merať priemety gravitačného zrýchlenia. Z nich je možné určiť orientáciu snímača v priestore, čo si ukážeme v nasledujúcom texte.



Obr. 6.1 Osi a uhly pri meraní sklonu

Vektorový súčet jednotlivých zložiek v statickom stave tvorí práve gravitačné zrýchlenie, a preto po aplikovaní Pytagorovej vety a zahrnutí určitej tolerance môžeme písať:

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \in \langle (1 - k); (1 + k) \rangle \quad (6.1)$$

Meranie sklonu s využitím zrýchlení má zmysel robiť len v prípade splnenia tejto podmienky. Pre úplnosť treba uviesť, že tá môže byť splnená aj v prípade vhodnej kombinácie lineárnych zrýchlení. Kde k predstavuje pásmo tolerance, v našom prípade sme použili hodnotu $k = 0,01$.

Pre zrovnobežnenie xy roviny snímača a xy bremena (vodorovná rovina) potrebujeme získať maticu rotácie. Tá bude zahŕňať sklon dvoch osí, a teda dve samostatné rotácie za účelom stotožnenia osí z snímača s osou z bremena. V našom prípade si vyberieme najprv rotáciu vektora nameraných zrýchlení okolo osi x o uhol ϕ

$$\phi = -\text{atan2}(a_y, a_z) \quad (6.2)$$

Následne rotujeme vektor meraní okolo osi y o uhol θ .

$$\theta = \text{atan2}\left(a_x, \sqrt{a_y^2 + a_z^2}\right) \quad (6.3)$$

Tieto dve rotácie možno skombinovať do jedinej matice, ktorú nazveme matica inklinácie

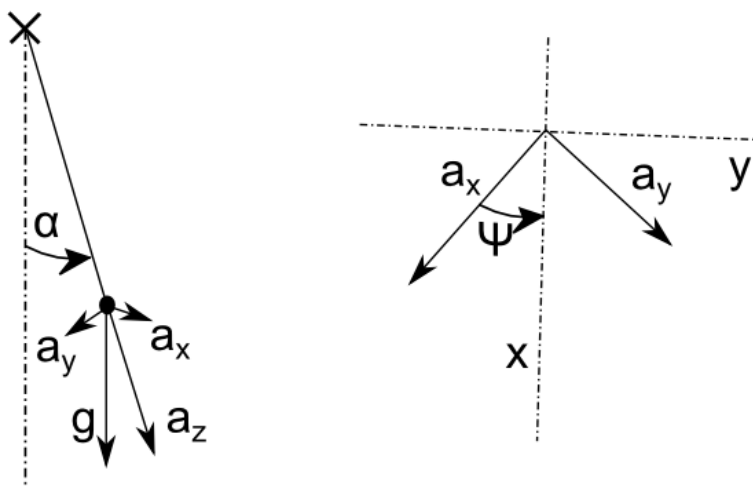
$$\mathbf{R}_{in} = \mathbf{R}_x(\phi)\mathbf{R}_y(\theta) \quad (6.4)$$

6.2 Určenie orientácie v horizontálnej rovine pomocou akcelerometra

Pomocou samotného signálu akcelerometra nie je v statickom stave možné určiť orientáciu v rámci horizontálnej roviny.

Toto je možné spraviť s využitím inej polohy bremena. Táto poloha vznikne vychýlením lana v presne určenom smere. Z výpočtového pohľadu je vhodné použiť vychýlenie okolo jednej z osí bremena, resp. pozdĺž niektorej z osí základne, avšak metóda sa dá rozšíriť aj na iný známy uhol k osi x .

Podmienkou je, aby sa v momente merania nepôsobili iné zrýchlenia ako gravitačné (opäť možno použiť vzťah (6.1) a aby sa rovina xy bremena líšila od roviny horizontálnej. V nej je priemet zrýchlení v osiach x a y po rotácii pomocou matice \mathbf{R}_{in} nulový.



Obr. 6.2 Priemety zrýchlení pri vychylke kyvadla v 3D a priemet do roviny xy

Pri vychýlení o uhol α sa gravitačné zrýchlenie prejaví aj v osiach x a y .

$$a_x = g \sin(\alpha) \cos(\psi) \quad (6.5)$$

$$a_y = g \sin(\alpha) \sin(\psi) \quad (6.6)$$

Z týchto priemetov je potom možné určiť priemetov je potom možné zistiť uhol ψ .

$$\psi = \text{atan2}(a_y, a_x) \quad (6.7)$$

Nevýhodou tejto metódy je, že vo vzťahu vystupuje člen $\sin(\alpha)$ a ten pri malých výchylkách nadobúda malé hodnoty a následne aj rádovo znižuje namerané zrýchlenia a_x a a_y . Malé hodnoty blízke úrovni šumu, najmä v prípade uhlov blízkych násobku 90° spôsobia významné nepresnosti v meraní.

Okrem toho môže byť komplikované zabezpečiť vyžadovanú polohu pomocou nadradeného riadiaceho systému.

Výslednú rotačnú maticu \mathbf{R}_{sb} získame kombináciou rotácie okolo osi z a matice inklinácie.

$$\mathbf{R}_{sb} = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_{in} \quad (6.8)$$

6.3 Určenie orientácie v horizontálnej rovine pomocou gyroskopu alebo magnetometra

Vhodnejšou a ľahšie realizovateľnou alternatívou sa javí využitie signálu z gyroskopu a kmitanie bremena v presne definovanom smere, pričom sa využije výpočet rovnaký ako v prípade akcelerometra. Túto alternatívu sme nakoniec implementovali.

Ďalšou možnosťou je využitie magnetometra a magnetického poľa Zeme. Orientácia v horizontálnej rovine je teda daná azimutom, pričom treba brať do úvahy aj orientáciu základne žeriava voči magnetickému poľu Zeme.

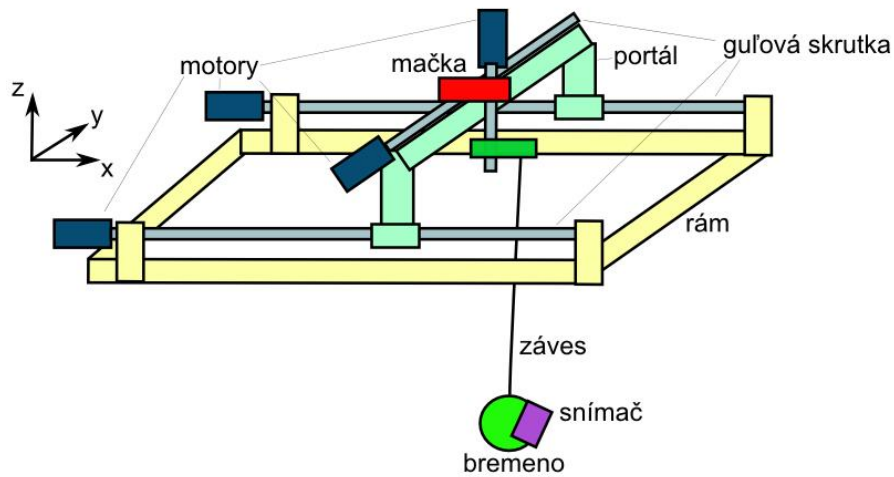
7 Použitý hardvér

Pre overenie teoretických predpokladov a navrhnutého riadenia bol vytvorený reálny systém pozostávajúci z mechanickej časti reprezentujúcej mechaniku žeriava, snímačej dosky uchytenej na bremeno a riadiacej elektroniky ovládajúcej žeriav.

7.1 Mechanika

Pre praktické merania bol použitý model žeriava založený na mechanike komerčnej frézy CauCau Kompas H-1000, z ktorej bolo odmontované vreteno. Namiesto neho bolo zavesené bremeno so snímacou jednotkou. Druhou podstatnou zmenou bolo odobratie podložky, aby sme mali voľný priestor pre bremeno a jeho záves.

Žeriav pracuje v kartézskom súradnicovom systéme a zdrojom pohybu v smeroch jednotlivých osí sú krokové motory napájané z CNC kontroléra dodaného spolu s frézou. Pôvodné riadenie z počítača (cez paralelný port) bolo nahradené vlastnou riadiacou jednotkou.



Obr. 7.1 Náčrtok emodelu žeriava

Bremeno je tvorené podlhovastou batériou o hmotnosti 140 g orientovanou vodorovne. Zavesená bola za rohy štyrmi lankami, čím sa obmedzilo skrúcanie okolo vertikálnej osi v porovnaní s jedným lankom a zároveň sa zamedzilo vzniku viacerých kmitavých módoov. Snímač je na batériu pripevnený zvrchu prostredníctvom gumičiek. Batéria zároveň slúži na napájanie snímača.

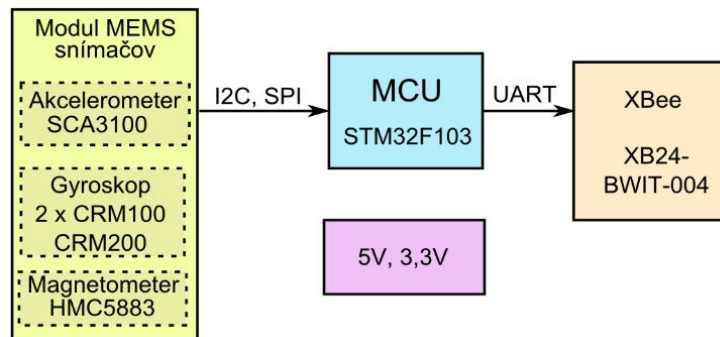


Obr. 7.2 Fotografia modelu žeriava vytvoreného úpravou frézy

7.2 Hardvér snímačovej jednotky

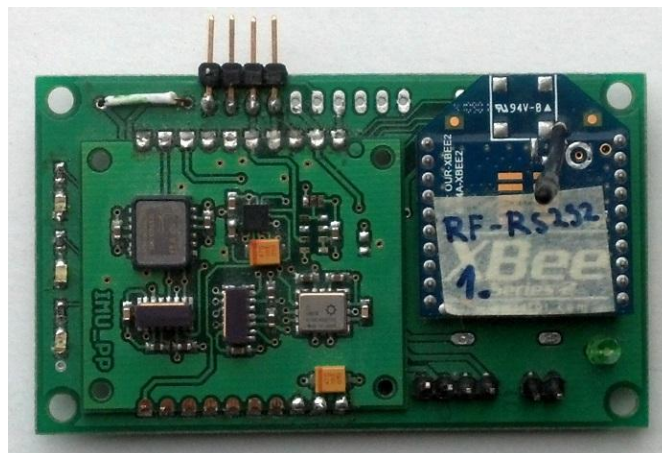
Za účelom zisťovania stavových veličín bremana a ich spracovanie sme zhotovili dosku obsahujúcu príslušné MEMS snímače (akcelerometer, gyroskopy, magnetometer). Pri jej návrhu boli brané do úvahy faktory ako univerzálnosť, dostatočný výpočtový výkon, nízka spotreba a možnosť širokého rozsahu napájacieho napätia.

Bloková schéma dosky je na Obr. 7.3. Jadrom je mikrokontrolér STM32F103C8T6, zabezpečujúci zber dát zo snímačov, ich spracovanie a odoslanie do riadiacej elektroniky prostredníctvom modulu XBee.



Obr. 7.3 Bloková schéma inerciálnej jednotky

Jednotlivé snímače sú umiestnené na samostatnej doske, čo umožňuje vymeniteľnosť snímačov v prípade potreby a zvyšuje jej univerzálnosť. V našom prípade boli použité akcelerometer SCA3100 a gyroskopy CRM100 a CRM200 využívajúce SPI a magnetometer HMC5883 využívajúce I2C zbernicu.

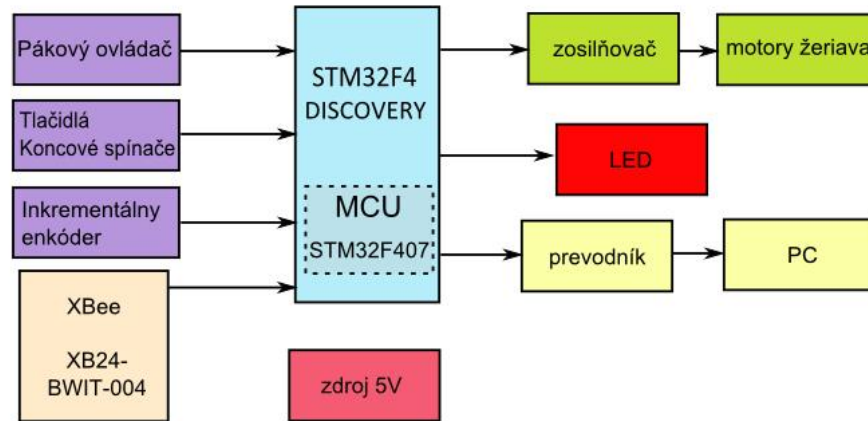


Obr. 7.4 Inerciálna jednotka pre uchytenie na bremano

7.3 Hardvér riadiacej jednotky

Pre ovládanie pohybu modelu žeriava, implementáciu riadiacich algoritmov, zber dát z bezdrôtovej snímačovej dosky bola pripravená riadiaca jednotka.

Jadrom je doska STM32F4DISCOVERY postavená na mikrokontroléri STM32F407VGT6 doplnená pomocnými obvodmi. Mikrokontrolér meria napätie z pákového ovládača ovládaného používateľom. Toto napätie zodpovedá želanej hodnote rýchlosti. Na stráženie okrajových polôh slúžia koncové snímače pripojené k binárnym vstupom.



Obr. 7.5 Bloková schéma prepojenia riadiacej jednotky

Žeriav je ovládaný cez paralelný port prostredníctvom 9 signálov. K dispozícii sú 4 motory, pričom 2 slúžia na presun celého portálu, jeden pohybuje mačkou a tretí vytvára vertikálny pohyb, no my ho nevyužívame. Na každý z týchto motor sa využívajú 2 signály – jedným sa mení smer a druhým sa riadia jednotlivé kroky. Posledný signál slúži na aktivovanie vyššieho momentu počas pohybu a jeho deaktivovanie v stojacom stave.

Riadiaca jednotka využíva dáta zo snímačovej jednotky. Tie získava prostredníctvom bezdrôtovej komunikácie, ktorú zabezpečuje modul XB24-BWIT-004. Pre komunikáciu s počítačom sa používa sériová linka.

8 Merania a dosiahnuté výsledky

Na uvedenom hardvéri bola vykonaná séria pokusov, ktoré mali za cieľ zistiť správanie sa bremena a preveriť vybrané metódy riadenia.

Pre korektnosť uvedieme, že pri meraní bola vo väčšine prípadov doska so snímačmi umiestnená tak, že rovina xy bola vodorovne a jej os y je orientovaná v smere osi x žeriava. Výhodou je, že v spätnoväzobnom riadení berieme rotáciu okolo osi y pre riadenie pohybu v smere y , obdobne to platí s osou x . Rozdiel je potom v znamienkach. V meraniach však budeme vyhodnocovať najmä pomery meraných veličín a amplitúdy kmitov.

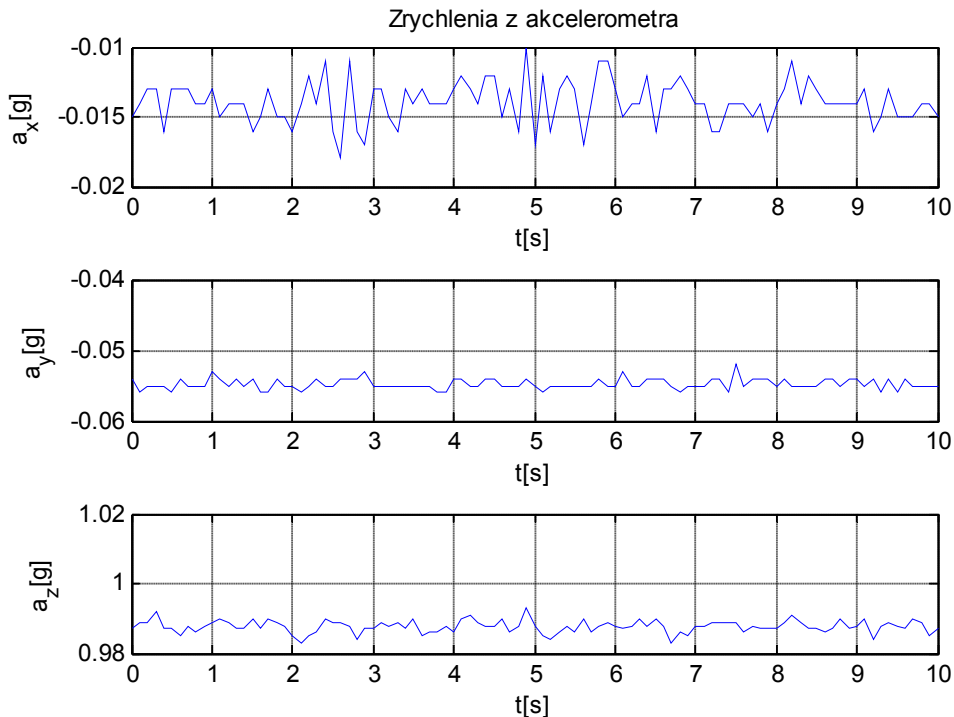
Merané boli zrýchlenia pomocou akcelerometra, rýchlosti rotácie pomocou gyroskopu a magnetická indukcia pomocou magnetometra. Vzhľadom na nízky rozsah rýchlostí žeriava boli dosahované aj relatívne malé výchylky. Tie sme nemali fyzicky čím merať, avšak pre orientáciu sa dá z amplitúdy rotácie určiť aj príslušná amplitúda výchylky využitím vzťahu

$$\dot{\theta}_0 = \omega_0 \theta_0 \quad (8.1)$$

8.1 Vofné kyvadlo bez riadenia

Pre úvodnú analýzu sme bremeno vychýlili okolo osi x snímača asi o $2,5^\circ$. Bremeno sme nechali v pokoji kmitať. Obr. 8.1 zobrazuje zrýchlenia príslušné zo začiatku záznamu.

Na grafe si možno všimnúť, že sa nepodarilo dodržať presnú vodorovnú polohu. To je vidieť v osiach x a y, ktoré sú nenulové. Zrýchlenie v osi z nadobúda hodnotu asi 0,99 g, čo zodpovedá reálnemu 1 g. Tento rozdiel svedčí o určitej chybe zosilnenia akcelerometra. Obr. 8.1 zobrazuje zrýchlenia príslušné zo začiatku záznamu detailnejšie. Signál je zašumený a nie je na ňom vidieť náznakov periodicity. Z toho dôvodu sa pri ďalších pokusoch zrýchleniu venovať nebudeme.



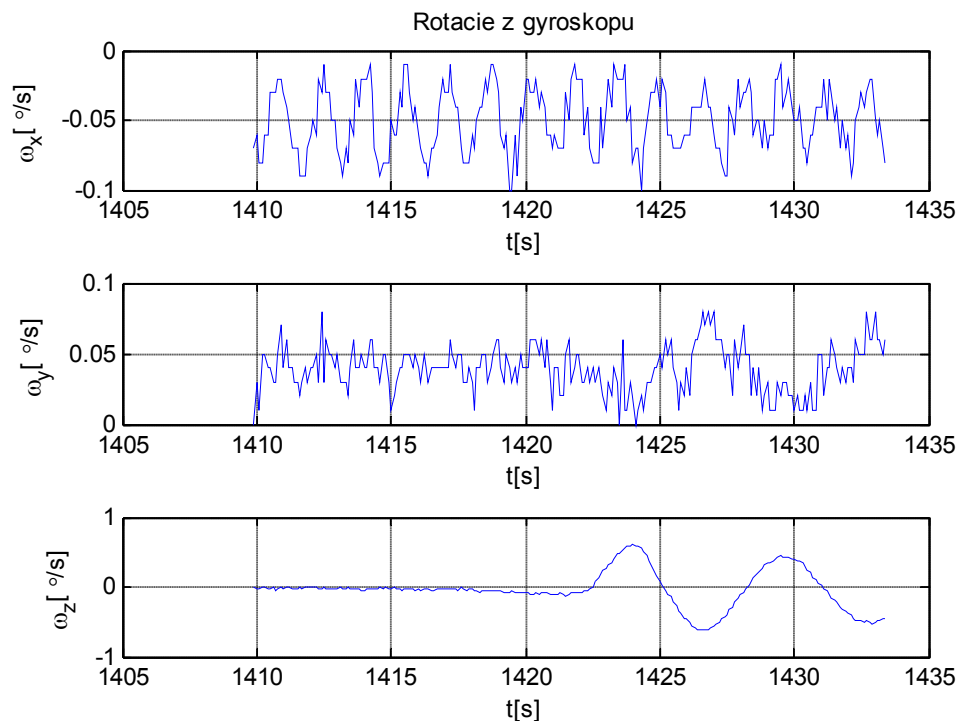
Obr. 8.1 Detail priebehu zrýchlenia pri výchylke $2,5^\circ$

V prípade gyroskopu nás bude zaujímať záznam po 1400 s, ktorý je v detaile vykreslený na Obr. 8.2. Okolo osi x je ešte stále zreteľný, aj keď už zašumený harmonický signál s amplitúdou asi $0,4^\circ$, zodpovedajúci amplitúde výchylky $0,1^\circ$ v našom prípade. Čiže vlastnú frekvenciu je možné určiť už pri takej malej výchylke.

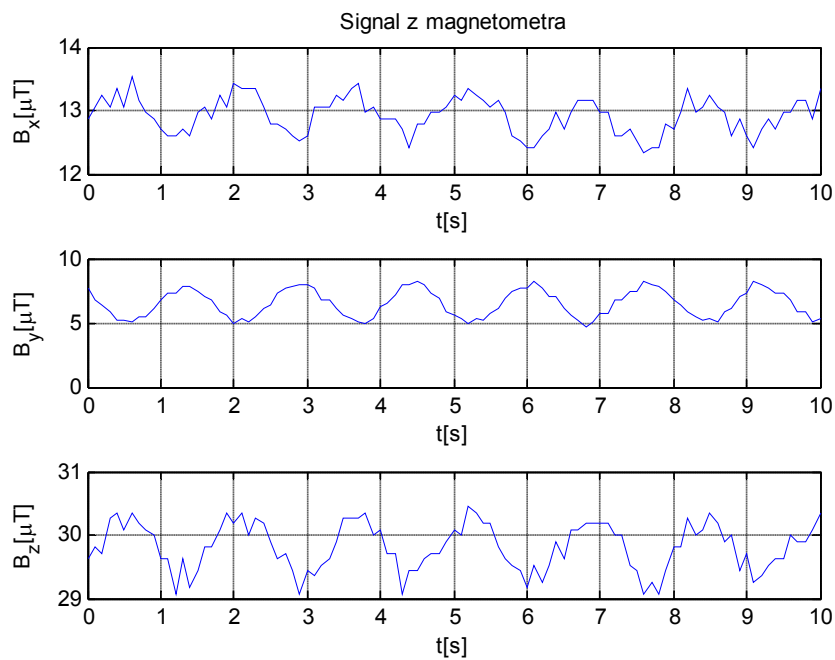
Zaujímavosťou je posledných asi 10 s záznamu, kedy sa bremeno začalo stáčať okolo osi z. Tento čas zodpovedá vstupu do miestnosti pred vypnutím merania, čiže bremeno je citlivé už na malé pohyby vzduchu v miestnosti. V reálnom nasadení nepredpokladáme až takú citlivosť, avšak na druhej strane možno predpokladať intenzívnejšie poruchy (napr. vietor, drgnutie do bremena zvonka).

Záznam z magnetometra zo začiatku merania je na Obr. 8.3. Pri vyšších výchylkách je poznať harmonický charakter a z merania je možné určiť sklon voči vektoru magnetickej indukcie Zeme. Pri ešte menších výchylkách (pod 1°) sa však užitočný signál už stratí v šume. Z tohto pohľadu je možné magnetometer zaradiť niekde medzi akcelerometer a gyroskop.

Nakoľko sa signál z gyroskopu ukázal ako najpoužiteľnejší pri malých výchylkách, budeme sa v ďalšom texte zaoberať najmä ním.



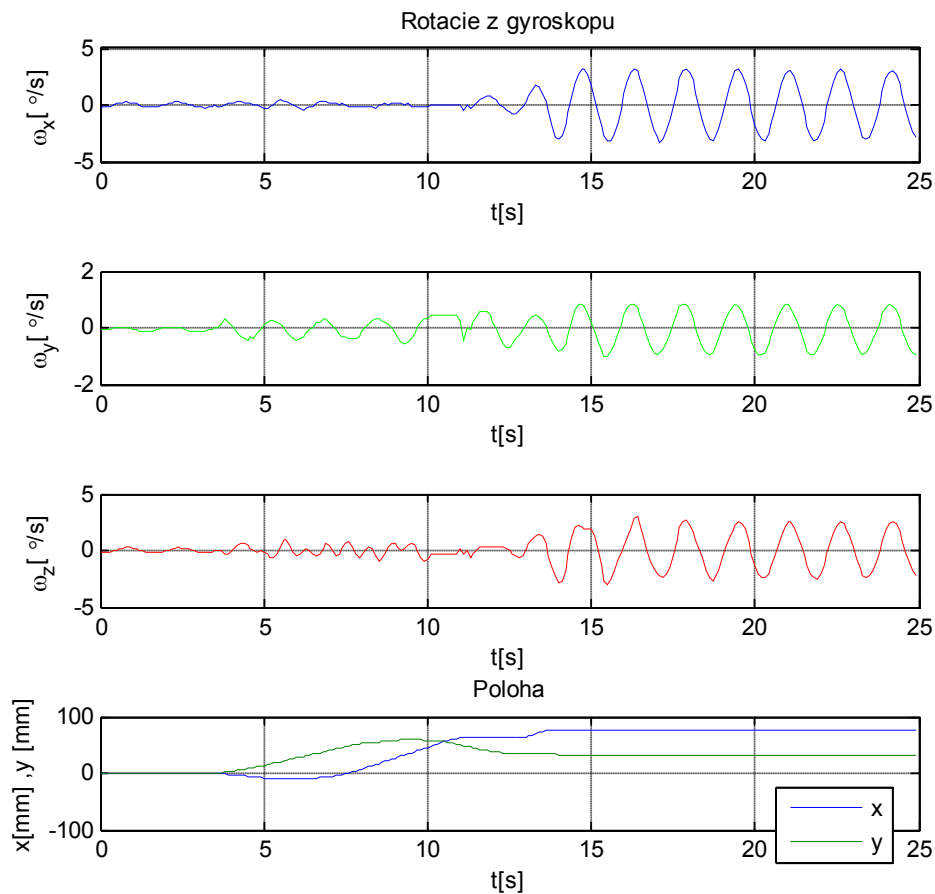
Obr. 8.2 Detail signálu z gyroskopu na konci merania



Obr. 8.3 Detail priebehu magnetickej indukcie pri výchylke $2,5^\circ$

8.2 Polohovanie bez riadenia

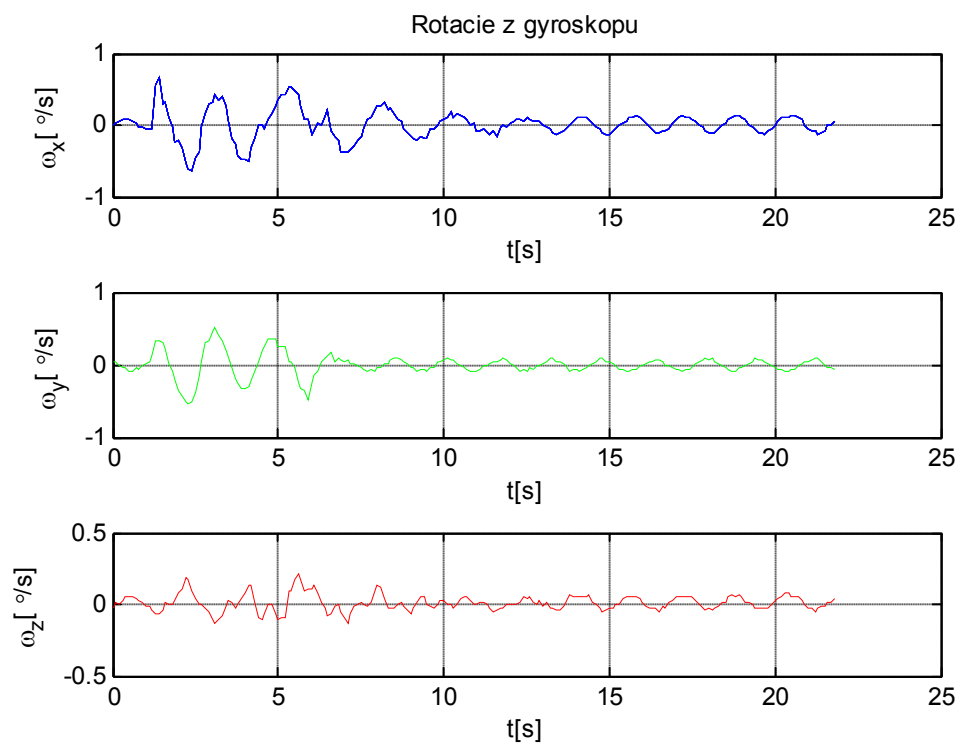
Pri priamom polohovaní bremena pomocou pákového ovládača vznikajú reziduálne kmity. To dobre ilustruje Obr. 8.4. V spodnom grafe je zobrazený priebeh polohy mačky pri náhodnom manuálnom polohovaní. Príslušné vybudené kmity sa prejavili vo všetkých troch osiach žeriava. Po zastavení polohovania je amplitúda rotácie okolo osi x asi 3 °/s a okolo osi y asi 1 °/s. To zodpovedá amplitúde výchylky asi 0,8 °, pričom toto kmitanie slabne len veľmi pomaly, ide rádovo o minúty. To bolo vlastne ukázané v prípade bez riadenia (kapitola 8.1).



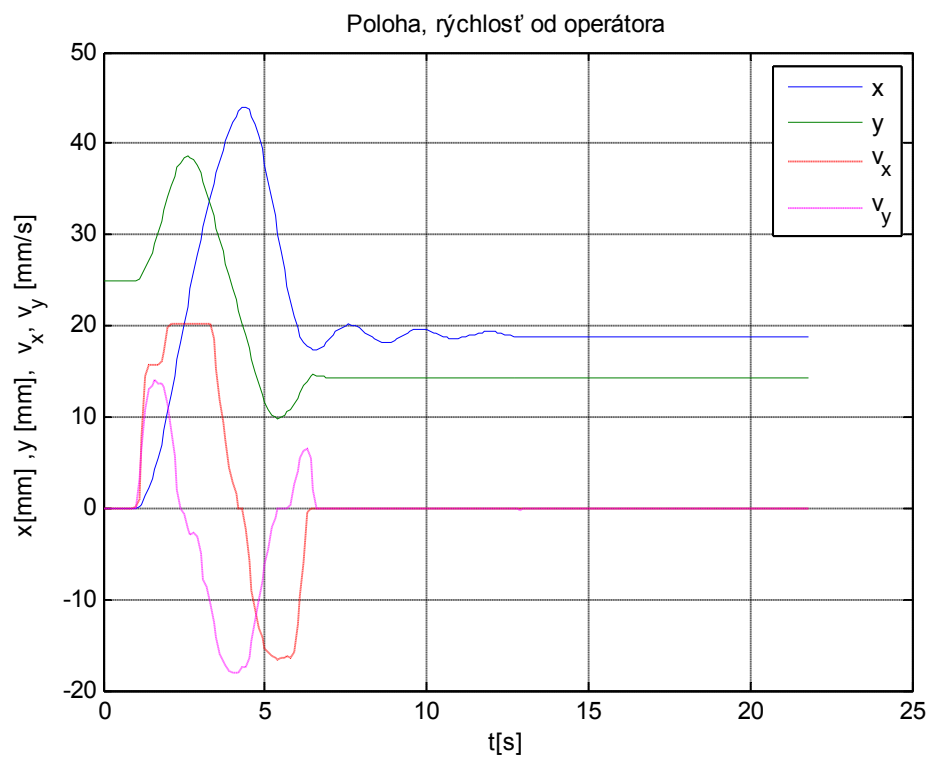
Obr. 8.4 Priebeh signálu gyroskopu pri polohovaní bremena

8.3 Polohovanie s riadením s derivačnou spätnou väzbou

V prípade riadenia pomocou derivačnej spätnej väzby sme získali signál na Obr. 8.5, pričom priebeh vstupnej rýchlosti z pákového ovládača ako aj priebeh polohy mačky je zobrazený na Obr. 8.6. Je vidieť, že ku kmitom s najväčšou intenzitou prichádza počas samotného polohovania v intervale medzi 2 s a 5 s. Intenzita je však do 0,5 °/s a teda rádovo nižšia ako v prípade bez riadenia. Do času asi 13 s prebieha automatické riadenie. Po poklese pod 0,15 °/s (zodpovedá výchylke 0,04 °) už kmity považujeme za dostatočne malé a riadenie sa deaktivuje.



Obr. 8.5 Signál z gyroskopu pri polohovaní so spätnoväzobným riadením

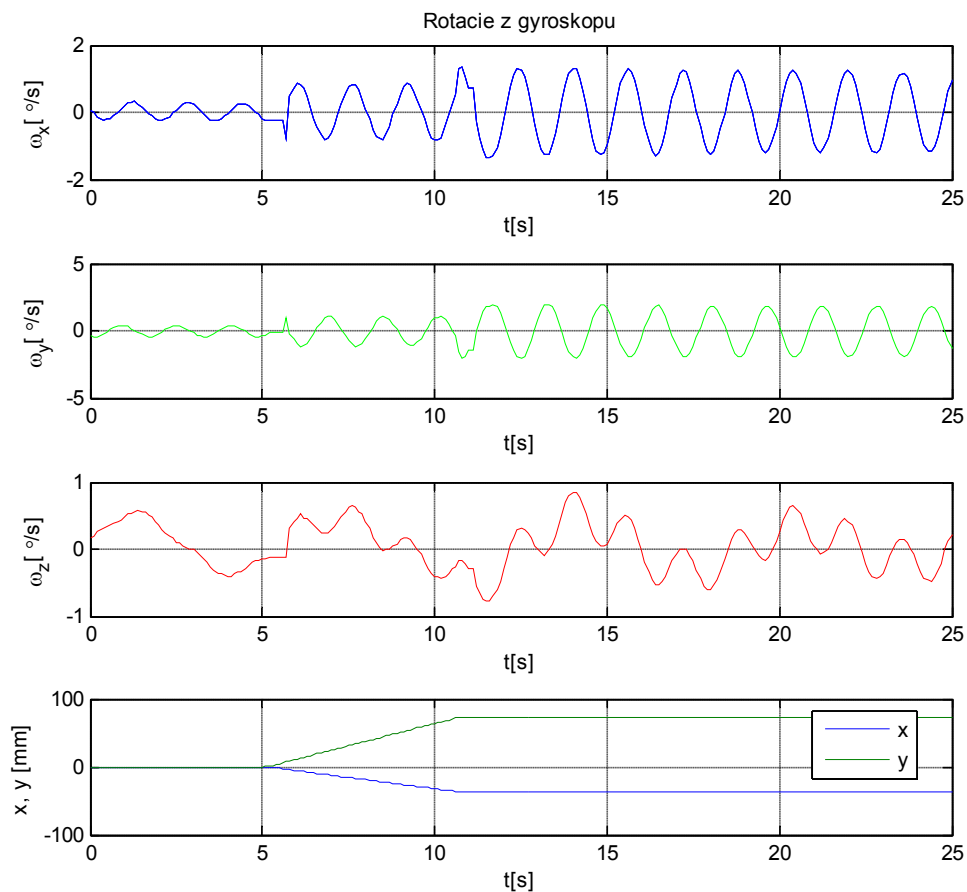


Obr. 8.6 Priebeh želanej rýchlosti z pákového ovládača a polohy s riadením s využitím gyroskopu

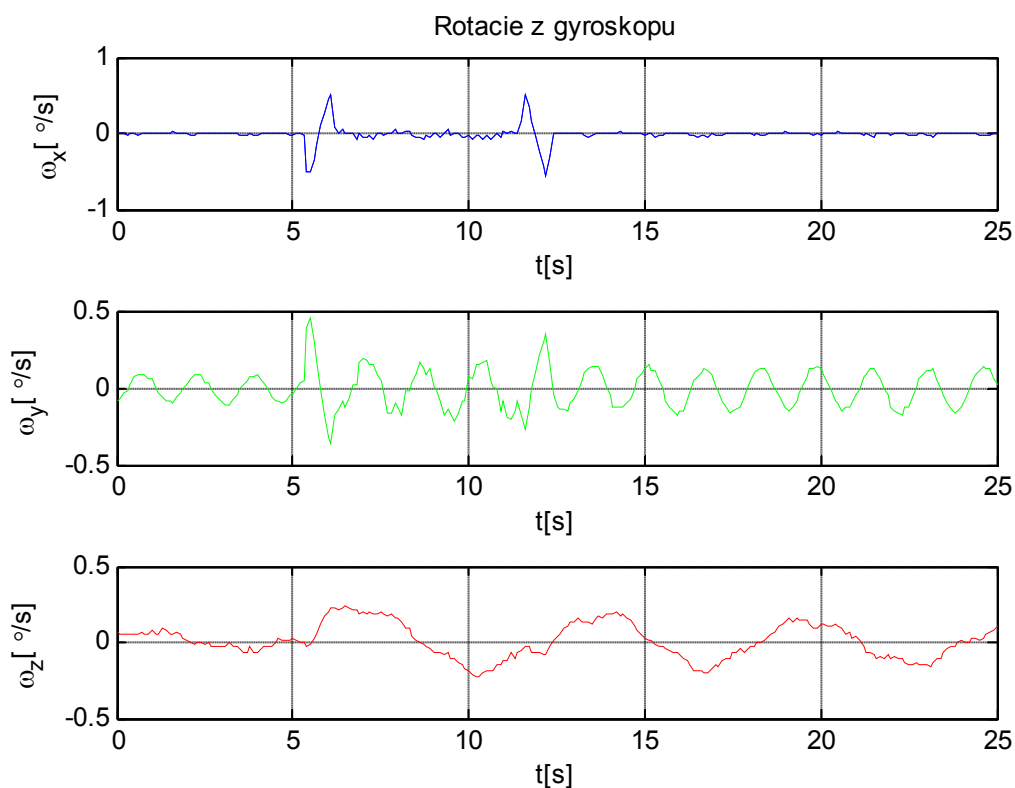
8.4 Polohovanie so ZV tvarovačom

V ďalšom sa budeme venovať dopredným metódam, konkrétne použijeme ZV tvarovač. V prípade bez tvarovača získame signál na Obr. 8.7. Je vidieť, že začiatok pohybu mačky vybudí kmity asi $1^\circ/\text{s}$, pričom po zastavení mačky sa kmity zdvojnásobia.

Na Obr. 8.8 je podobný prípad polohovania, avšak bol použitý ZV tvarovač. Tu je vidieť vybudenie kmitu pri zmene stavu mačky a teda v čase 5 s a 7 s. Tieto kmity sú však následne utlmené o pol periódy vlastných kmitov neskôr. V prípade okolo osi x je eliminácia prakticky úplná. V prípade okolo osi y ostáva kyvadlo kmitať. Kmity s porovnateľnou intenzitou však boli v systéme aj pred polohovaním. Pripomeňme, že ZV tvarovač nie je z princípu schopný tieto kmity odstrániť, nakoľko odstraňuje len kmity vznikajúce od riadenia. Tieto kmity však možno využiť pre identifikáciu vlastnej frekvencie.



Obr. 8.7 Zmena polohy po rampe a kmitavá odozva



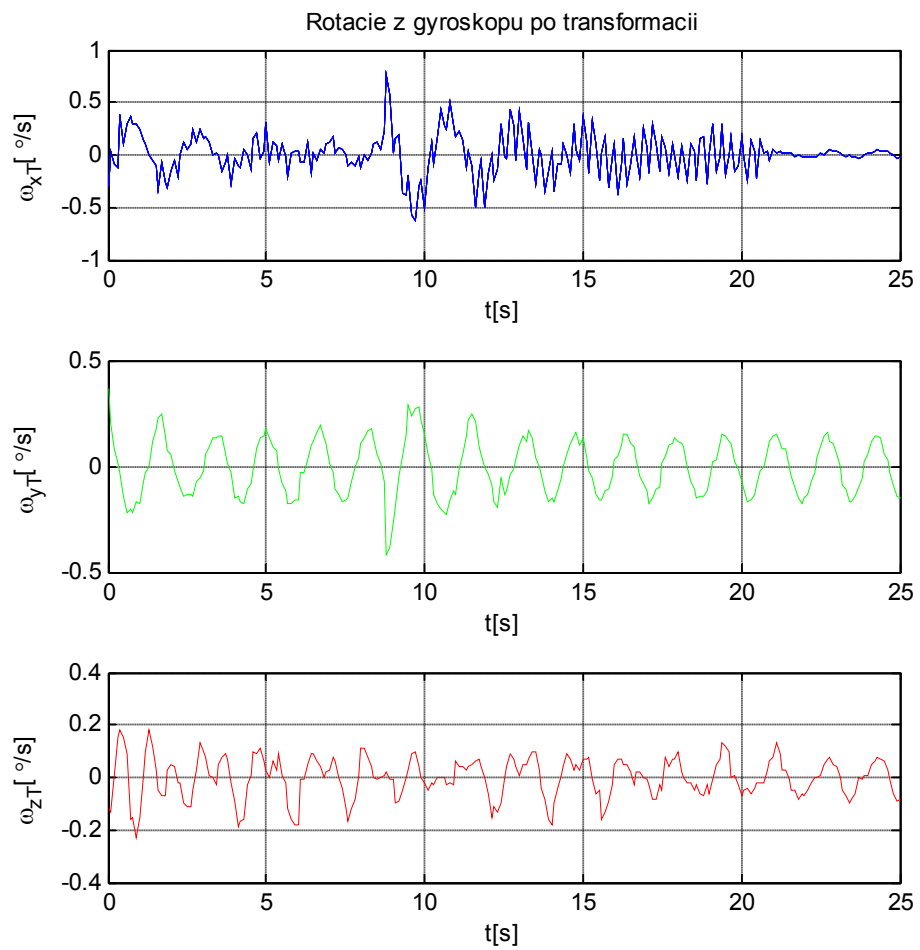
Obr. 8.8 Signál z gyroskopov pri použití ZV tvarovača

8.5 Polohovanie s riadením s natočeným snímačom so identifikovanou orientáciou bremena

Riadenie na princípe derivačnej spätnej väzby sme otestovali aj spolu so zistením orientácie súradných osí. Pre toto meranie sme vybrali orientáciu, kedy je význam osí poprehadzovaný a zároveň žiadna nie je zvislá. Pre identifikáciu sme postupovali podľa metód opísaných v kapitole 17 a 19, čiže zistili sme sklon pomocou akcelerometra a tretie natočenia pomocou rozkývaná v známom smere.

Priamy signál z gyroskopu sa transformuje pomocou rotačných matic do orientácie opísanej na začiatku tejto kapitoly. Po transformácii získavame signál zobrazený na Obr. 8.9. Aj v tomto prípade sa darí dosiahnuť amplitúda kmitov výrazne pod 0,5 °/s a to aj počas polohovania samotného. V tomto prípade sme nastavili vypnutie riadenia na úroveň 0,25 °/s. Práve z tohto dôvodu je v čase asi 11 s na chvíľu poloha y mačky konštantná – riadenie je deaktivované z dôvodu nízkej amplitúdy kmitov.

Na rotácii okolo osi x sú vidieť kmity s vyššou frekvenciou namodulované na kmity očakávané. Je evidentné, že sú budené priamo pohybom mačky a po jej zastavení zmiznú. Tieto kmity sú pravdepodobne dané ďalším rezonančným módom spôsobeným nevhodným voľným uchytením snímača v upravenej orientácii. Je však vidieť, že aj v tomto prípade sa podarilo kmity znížiť na akceptovateľnú úroveň.



Obr. 8.9 Signál z gyroskopov po transformácii

9 Pojednanie o praktickej realizovateľnosti.

9.1 Tvarovanie riadiaceho signálu

Po technickej stránke najjednoduchším riadením žeriava zabezpečujúcim obmedzenie reziduálnych kmitov je on-line tvarovanie riadiaceho signálu pomocou tvarovačov. Jednoduchou softvérovou úpravou je možné docieľiť takmer úplnú elimináciu kmitov vybudovaných pohonmi na jednej vlastnej frekvencii, ako aj na viacerých vlastných frekvenciách.

Principiálnym nedostatkom je však to, že sa jedná o dopredné riadenie, a teda nie je zavedená spätná väzba. Toto riadenie teda nemá žiadny vplyv na kmity vybudované externými vplyvmi ako je vietor, alebo manuálne vychýlenie bremena.

Základným predpokladom správneho fungovania je nastavenie tvarovača na vlastnú frekvenciu systému. V prípade, že táto sa nemení, je možné jej jednorazové nastavenie. V prípade, kedy však prichádza k jej zmene (ovplyvnenej najmä dĺžkou lana), je potrebné túto skutočnosť zohľadniť. Najjednoduchším riešením je použitie vyššieho stupňa tvarovačov vyznačujúcich sa nízkou citlivosťou na zmenu vlastnej frekvencie. Tým sa ale nie vždy pokryje celý rozsah možných frekvencií, najmä ak sa výrazne mení dĺžka závesu. Nevýhodou je potom vnášané oneskorenie, ktoré negatívne vplyva na polohovanie. Na to je vhodné operátorovi naznačiť výsledný bod zastavenia.

Iným prístupom je priebežná identifikácia vlastnej frekvencie. To môže byť realizované meraním dĺžky lana pri odmotávaní a namotávaní, čo môže byť nepraktické. Na druhej strane dĺžka lana nemusí presne odzrkadľovať polohu ťažiska a vlastná frekvencia tým pádom nemusí byť určená presne.

Alternatívou je nami navrhnuté použitie MEMS akcelerometrov alebo gyroskopov uchytených na bremene. Pri kmitaní sa v ich výstupnom signáli objaví frekvenčná zložka zodpovedajúca vlastnej frekvencii kmitov (alebo jej dvojnásobku).

Nedostatkom tohto prístupu je, že pri prudkých zmenách v riadení prípadne pri pôsobení externých vplyvov môžu byť vybudované impulzy, ktoré majú za následok, že zmeraný signál nebude mať harmonický charakter daný len reziduálnymi kmitmi. Toto treba zobrať do úvahy a adaptáciu tvarovača na riadiacu frekvenciu robiť len v prípade, kedy neprichádza k výraznému vplyvu riadenia na kmity (napr. keď je ustálený vstupný signál od operátora). Prípadne je možné zohľadniť časové intervaly, keď sa nepredpokladajú výrazné externé vplyvy. To už je však ťažšie realizovateľné a pomohla by informácia od používateľa. Ďalšou možnosťou je dodatočná analýza signálu, ktorej úlohou by bolo identifikovať periódy pokoja, kedy je možné pristúpiť k adaptácii.

Ukázalo sa, že pre použitie akcelerometrov je treba výchylky s amplitúdou aspoň 5° , inak sa signál stratí v šume. Výchylka 5° však zodpovedá výchylke asi 87 cm pri dĺžke lana 10 m, čo už nemusí byť akceptovateľné. Pri použití kvalitnejších snímačov, vyššieho prevzorkovania a doladení algoritmov frekvenčnej analýzy odhadujeme zlepšenie umožňujúce identifikáciu už pri 2° . Identifikácia však vyžaduje niekoľko periód ustálených kmitov, čo nemusí byť vždy možné, najmä v prípade dlhého lana a veľkej vlastnej periódy kmitov.

Pomocou gyroskopov je možné zmerať zreteľný periodický signál aj pri rádovo menších výchylkách zodpovedajúcim asi desatine stupňa, čo je výchylka v praxi plne akceptovateľná.

9.2 Riadenie s derivačnou spätnou väzbou

V prípade riadenia so spätnou väzbou je možné zatlmiť aj kmity budené vonkajšími vplyvmi. Ukázalo sa, že je to možné len do určitej miery, nakoľko pri vyšších výchylkách použité pohony nevládali vykonať dostatočný akčný zásah. To je ostatne ale záležitosťou vhodnej voľby pohonu.

Na druhej strane možno konštatovať, že toto riadenie je vždy schopné utlmiť kmity, ktoré boli vybudené počas pohybu vlastnými pohonmi.

Jednou z nevýhod je, že toto riadenie nie je vhodné vtedy, keď systém kmitá na viacerých frekvenciách. Tlmenie jedného kmitavého módu síce zvýši, avšak póly zodpovedajúce druhému módu majú tendenciu sa tlačiť do nestabilnej oblasti, a teda systém sa od istého zisku spätnej väzby stáva nestabilným.

Možným riešením je umiestnenie snímačej jednotky na časti lana, resp. háku, kde neprichádza k prejavu sa druhého módu. Čiže v princípe by sa tlmili kmity hornej časti závesu, avšak dolná časť s bremenom by nebola braná do úvahy a kmitala by na svojej vlastnej frekvencii. Záleží už na konkrétnej aplikácii, či sú tieto kmity prípustné. Predpokladáme totiž vo väčšine prípadov malé dĺžkové výchylky.

Iným problémom je skrúcanie lana, resp. otáčanie bremena okolo vertikálnej osi, pri presune bremena neprichádza len k výchylke okolo horizontálnych osí. V prípade skrúcania sa časť kmitov premietne do nesprávneho smeru. V prípade malého skrútenia rádovo do 10° je vplyv zanedbateľný, ale v prípade vyšších uhlov už sa výchylka môže merať v kolmom smere. V krajnom prípade môže prísť k meraniu v opačnom smere, čo má za následok kladnú spätnú väzbu.

Problém sa ešte zhorší, ak ku skrúcaniu príde počas identifikácie orientácie snímača. To má za následok chybu počas celej doby používania takto zle nastavenej snímačej jednotky.

Potenciálnym riešením skrúcania je použitie magnetometra na priebežné určenie natočenia voči zemskému magnetickému poľu a nasledovnú korekciu zmeraných údajov. Možné je použiť aj integráciu signálu gyroskopu okolo osi z. Je treba brať do úvahy drift snímača, a teda je treba priebežne integrovaný uhol korigovať, napr. práve spomínaným magnetometrom.

Nevýhodou magnetometra je zasa to, že snímacia jednotka môže pracovať v prostredí s výskytom magneticky tvrdých materiálov, ako aj ďalších magnetických polí, ktoré môžu byť dokonca premenlivé.

Inou možnosťou ako zamedziť skrúcaniu lana je vhodné konštrukčné uchytenie bremena. Záves tvorený viacerými lanami, ktoré nie sú uchytené v jednom bode značne redukuje skrúcanie.

To má ale aj vplyv na geometriu celého závesného systému, kedy už sklon bremena nie je totožný so sklonom lana. V takom prípade sú namerané signály iné ako uvádzané v tejto práci. To platí najmä pre zrýchlenia zo vzťahov (3.5) a (3.6), ktoré platia pre ideálny záves. Najvýraznejšie sa to prejaví zreteľným kmitaním aj v tangenciálnej osi pri relatívne malých výchylkách snímačej jednotky.

10 Záver

Hlavným cieľom tejto práce bolo analyzovať možnosti použitia MEMS inerciálnych snímačov pri riadení žeriavov.

Začiatok práce tvorí rozbor rôznych matematických modelov žeriavov, ako aj iných vybraných kmitavých systémov, keďže niektoré prístupy k riadeniu sú analogické.

Teoreticky sa venujeme najčastejšie používaným inerciálnym snímačom, ich princípom a praktickými aspektami spojenými s ich použitím.

V ďalšom texte boli preberané rôzne typy riadenia so spätnou väzbou používané na riadenie žeriavov. Spomíname jednoduché PD regulátory, zaoberali sme sa možnosťou zvýšenia tlmenia dominantnej pólovej dvojice, no venujeme sa aj stavovej regulácii, optimálnemu a robustnému riadeniu.

Iným podrobne rozobratým prístupom pri riadení spomínaných systémov je dopredné riadenie tvarovačmi, kedy sa snažíme upraviť vstupný signál tak, aby nebol schopný vybudíť kmity bremena.

Postupne sme sa dostali k jadrú samotnej práce, ktorým je analýza signálov meraných inerciálnymi snímačmi na bremene počas jeho polohovania. Nasleduje časť venovaná možnostiam využitia týchto signálov.

Vypracovali sme dve základné metódy. Obidve sú založené na umiestnení snímačnej jednotky tvorenej MEMS inerciálnymi snímačmi na bremeno alebo hák žeriava.

V jednom prípade využívame nameraný signál na identifikáciu vlastnej frekvencie kmitov žeriava, na základe ktorej sa adaptívne nasleduje tvarovač vstupného signálu od operátora žeriava. Ukázalo sa, že na túto aplikáciu sú dostatočne citlivé gyroskopy schopné zmerať použiteľný signál aj pri výchylkách hlboko pod 1° , kým akcelerometre potrebujú výchylky nad 5° . Na samotnú identifikáciu vlastnej frekvencie je vhodné používať spracovanie signálov vo frekvenčnej oblasti.

Druhým prípadom je použitie signálu zo snímačnej jednotky v spätnej väzbe. Zvolili sme riadenie pomocou zvýšenia tlmenia dominantnej pólovej dvojice s využitím derivačnej spätnej väzby. K tomu sa prirodzene hodí derivácia polohy, ktorú získame pri malých výchylkách z merania uhlovej rýchlosti pomocou gyroskopu.

K overeniu tohto konceptu sme na pracovisku postavili snímaciu jednotku s inerciálnymi snímačmi a bezdrôtovým prenosom dát do riadiacej jednotky, v ktorej sme implementovali navrhnuté algoritmy. Pri praktických meraniach sa ukázalo, že takéto riadenie je funkčné a reziduálne kmity sa podarilo viac ako rádovo zmenšiť.

Ďalšou významnou časťou práce je identifikácia orientácie snímačnej jednotky, nakoľko je možné predpokladať, že táto jednotka bude umiestňovaná obsluhou, ktorá nebude (musieť) dbať na jej presné umiestnenie. Bolo predstavených niekoľko metód využívajúcich samotné akcelerometre, ale aj akcelerometre v kombinácii s gyroskopom alebo magnetometrom. Pri praktických pokusoch sa ukázalo, že aj pri ľubovoľnej orientácii snímačnej jednotky je možné žeriav riadiť, aj keď kvalita riadenia v tomto prípade už bola nižšia. To dávame za vinu nepresnému určeniu orientácie a v našom prípade aj nedokonalým uchytením snímačnej jednotky v jeho polohe.

10.1 Prínosy dizertačnej práce

Medzi hlavné prínosy dizertačnej práce možno zaradiť:

- Analýza signálov meraných inerciálnymi snímačmi umiestnenými na bremene žeriava
- Návrh adaptívneho nastavovania tvarovača vstupného signálu
- Syntéza riadenia žeriava s využitím derivačnej spätnej väzby
- Návrh metód pre určenie orientácie snímačnej jednotky na bremene voči súradnicovému systému žeriava
- Implementácia snímačnej jednotky s určovaním orientácie a jej použitie pri riadení reálneho modelu žeriava

11 Bibliografia

- [1] W. Atherton, P. Flanagan, A. Messuri a M. Stojkov, „Controlling Residual Vibration of Robotic Structures,“ *Journal of Manufacturing Systems*, p. 59–62, 1987.
- [2] P. Meckl, „Experimental Evaluation of Shaped Inputs to Reduce Vibration for a Cartesian Robot,“ *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 159-165, 1990.
- [3] D. Aspinwall, „Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response,“ *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 3-66, 1980.
- [4] P. Hubinský, T. Pospiech a B. Vranka, „Slosh-free Positioning Of Liquid- Containers Using A Machine With Flexible Conveyor Belt,“ rev. *9th International Conference Control of Power Systems*, 2010.
- [5] T. Singh a S. Vadali, „Input-Shaped Control of Three-Dimensional Maneuvers of Flexible Spacecraft,“ *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, pp. 1063-1068, 1993.
- [6] L. Pao, „Precise Control of Elastic Components for Tape Systems; Final Report of the Project,“ Colorado Advanced Software Institute, 1999.
- [7] W. Singhose a J. Vaughan, „Reducing Vibration and Providing Robustness with Multi-Input Shapers,“ rev. *American Control Conference*, St. Louis, USA, 2009.
- [8] M. Ahmad, R. Raja Ismail, M. Ramli a A. Nasir, „Anti-sway Control of a Gantry Crane System based on Feedback Loop Approaches,“ rev. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapur, 2009.
- [9] M. Ahmad, R. Raja Ismail a M. Ramli, „Input Shaping Techniques for Anti-sway Control of a 3-D Gantry Crane System,“ rev. *ICMA International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, 2009.
- [10] C. W. De Silva, *Vibration And Shock Handbook*, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- [11] P. Hubinský, *Riadenie mechatronických systémov s nízkym tlmením*, Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2010.

- [12] P. Hubinský, Tvarovanie spektra riadiacich signálov mechatronických systémov; Habilitačná práca, Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1998.
- [13] I. Iwan Solihin a Wahyudi, „Sensorless Anti-Swing Control Strategy for Automatic Gantry Crane System: Soft Sensor Approach,“ rev. *IEEE Internation Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, 2007.
- [14] T. Pospiech, Optimized Algorithms for Control of Mechatronic System, Dizertačná práca, Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009.
- [15] W. Singhose, Command Generation for flexible systems, MIT PhD-Thesis, Massachusetts Institute of technology, 1997.
- [16] K. Tuck, „Tilt Sensing Using Linear Accelerometers,“ 2007. [Online]. Available: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf.
- [17] P. D. Welch, „The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms,“ *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, pp. 17 - 20, 1967.
- [18] J. Kotuliaková a G. Rozinaj, Číslíkové spracovanie signálov, Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2001.
- [19] N. Singer a W. Seering, „Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration,“ rev. *Trans. of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1990.

1 Publikované práce autora

1.1 Autorské osvedčenia, patenty, objavy

Palkovič, Lukáš – Rodina, Jozef – Kostroš, Juraj – Hubinský, Peter – Hubinský, Ľubomír: Zariadenie na čistenie nástrojov, Prihláška na úžitkový vzor PÚV 81-2014, z 25.6.2014

1.2 Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

Hubinský, Peter - Palkovič, Lukáš: **Stop Point Prediction in Portal Crane Control Design.** In: *Metalurgija. Metallurgy.* - ISSN 0543-5846. - Roč. 49, č. 2 (2010), s. 288-291

1.3 Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

Hubinský, Peter - Palkovič, Lukáš: **Predikcia dobehu pri tlmení kmitov portálového žeriava.** In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku.* - ISSN 1335-2547. - Roč. 15, č. 5 (2009), s. 22-24

Hubinský, Peter - Kurilla, Jozef - Palkovič, Lukáš: **Estimation of the Gantry Crane Natural Frequency Using MEMS Accelerometer**. In: AT&P Journal Plus. - ISSN 1336-5010. - Č. 1: Systémy automatického riadenia (2010), s. 89-94

Palkovič, Lukáš, **Autonómne riadené autičko pre autodráhu**, Posterus portál pre odborné publikovanie, 2009 ISSN 1338-0087

Citované v :

Marek, J. – Návrh řídicího systému pro autodráhové autičko pro soutěž Freescale Race Challenge. Diplomová práce, Praha, 2013

Palkovič, Lukáš – Hubinský, Peter, **Modeling of the Bridge Crane Feedback Control Using MEMS Gyroscopes**. ATP Journal plus č. 1 : Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. s. 57--61. ISSN 1336-5010.

1.4 Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

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

Hubinský, Peter - Palkovič, Lukáš, **Resonance-Free Control of Portal Crane with Prediction of the Stop Position**, 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. - ISBN 978-80-553-0288-1. - S. 206-209

1.5 Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

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

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 :

-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

-МОТОРИН, АВ, ОА СТЕПАНОВ. „РАЗРАБОТКА МАКЕТА МАЛОГАБАРИТНОЙ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ С КОРРЕКЦИЕЙ ПО ВНЕШНИМ ДАННЫМ“ pp, 62. Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Pásztó, Peter – Klíčik, Marian – Palkovič, Lukáš, Hubinský, Peter: **Light conditions independent circular marks recognition for the purpose of mobile robot navigation**, In Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012 (MMK 2012): Sborník příspěvku z mezinárodní vědecké konference; 10.-14.prosince 2012, Hradec Králové. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012, s. 3337--3343. ISBN 978-80-905243-3-0.

1.6 Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Hubinský, Peter - Palkovič, Lukáš: **Bezrezonančné riadenie portálového žeriava s priebežným odhadom doby periódy pomocou akcelerometra** In: Technológia zvráania 2010 - Technológia rozvoja priemyslu Európskej únie : Vedecký seminár v rámci " Týždňa vedy a techniky na Slovensku 2010". Bratislava, 9. november 2010. - Trnava : AlumniPress, 2010. - ISBN 978-80-8096-130-5. - CD-Rom

Hubinský, Peter - Palkovič, Lukáš: **Bezrezonančné riadenie portálového žeriavu s predikciou bodu zastavenia**. In Technológia zvráania 2009 : Technológia rozvoja priemyslu Európskej únie. Bratislava, 2. november 2009. - Trnava : AlumniPress, 2009. - ISBN 978-80-8096-102-2

1.7 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