

Návrh riadenia stabilizácie diferenciálneho podvozku typu segway pomocou pohybových MEMS snímačov.

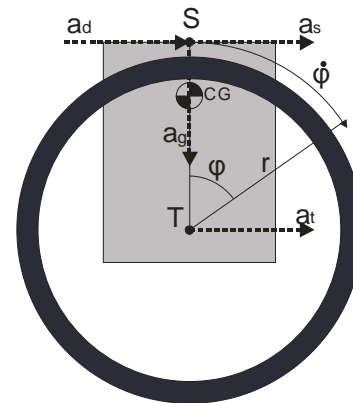
Bc. Jozef Rodina, doc. Ing. Peter Hubinský PhD.
URPI FEI STU Bratislava
rodina.jozef@gmail.com

Abstrakt

V tomto článku sa venujem použitiu MEMS pohybových snímačov, spracovaniu signálov pomocou ich vzájomnej fúzie a následne využitiu týchto signálov na riadenie stabilizácie diferenciálneho podvozku bez oporného kolieska. Ďalej je tu predložený návrh na fyzickú realizáciu takéhoto podvozku pomocou dostupných MEMS snímačov a DSP mikrokontroléra.

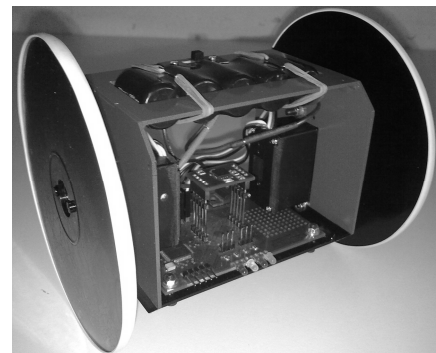
1. Úvod

Vďaka súčasnému vývoju v oblasti MEMS technológií a zavedeniu týchto technológií do výrobných procesov mnohých firiem zaoberajúcich sa výrobou polovodičových súčiastok sa na trh dostalo mnoho dostupných MEMS pohybových snímačov. Z toho dôvodu sme usúdili že by bolo vhodné odskúšať možnosti využitia týchto snímačov v robotike a to ako na riadenie tak aj na stabilizáciu systémov. Preto sme sa zamerali na dvojkolesový diferenciálny podvozok, ktorý je v mobilnej robotike veľmi často používaný, no len s oporným kolieskom (plní práve úlohu stabilizácie tohto podvozku). Takýto podvozok bez oporného kolieska a s ťažiskom nad osou koliesok tvorí nestabilný systém ekvivalentný s inverzným kyvadlom. Mnoho podobných projektov vychádza pri riadení zo síl a momentov pôsobiacich na podvozok takéhoto mobilného robota. Tento prístup je veľmi vhodný, no len v prípade ak vieme dostatočne presne určiť momenty zotrvačnosti koliesok a samotného telesa mobilného robota (ďalej MR) a ďalej aj ťažisko tohto systému. Keďže sme sa nechceli uberať týmto smerom, navrhli sme že by sme mohli riadenie stability založiť na vzájomnom sledovaní veľkosti zrýchlení dvoch bodov na MR. Bod T (viď. obr. 1.) sa nachádza v osi prechádzajúcej stredmi koliesok a bod S je nami zvolený bod na šasi MR vo vzdialenosti r od bodu T. Na šasi MR pôsobia zrýchlenia a_d (poruchové zrýchlenie) a gravitačné zrýchlenie a_g . Zrýchlenie a_t je jediné zrýchlenie, ktoré vieme riadiť pomocou zmeny zrýchlenia jednotlivých motorov MR. Základnou požiadavkou pre tento spôsob riadenia je aby moment sily ktorý sú motory schopne vyvinúť bol väčší alebo minimálne rovný momentu sily ktorý je potrebný na otočenie šasi MR okolo bodu T z vodorovnej polohy do



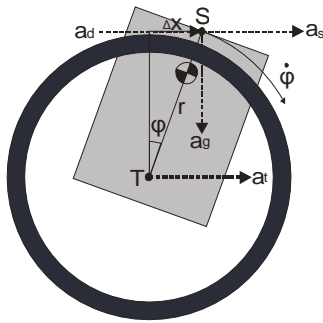
Obr.1. Schematické znázornenie zrýchlení pôsobiacich na segway

zvislej (pracovnej polohy). Pre potreby riadenia stability MR boli zvolené dvojosí snímač uhlovej rýchlosti od firmy Invensense (ďalej gyroskop) a trojosí snímač zrýchlenia od firmy Freescale (ďalej akcelerometer). Tieto snímače sú umiestnené na šasi v osi ktorá prechádza bodom T. Samotná fyzická realizácia takéhoto MR bola navrhnutá s ohľadom na čo najrýchlejšiu stavbu, preto boli použité materiály ako sklolaminát a boli spracované na CNC fréze. Ako pohonne jednotky boli zvolené upravené modelárske servomotory pre ich dostupnosť, vysoký moment sily a malé rozmery. Riadenie bolo prenechané 16-bitovému DSP mikrokontroléru pre všeobecne použité od firmy Microchip. Na obr. 2. je vidieť výslednú realizáciu MR.



Obr.2. Realizácia diferenciálneho podvozku typu segway

2. Matematický model riadenia stability



Obr.3. Schéma šasi MR

Z obr. 3. si vieme určiť základne rovnice modelu MR. Pre zrýchlenie a_s platí :

$$a_s = a_d + a_g \tan j \quad (1)$$

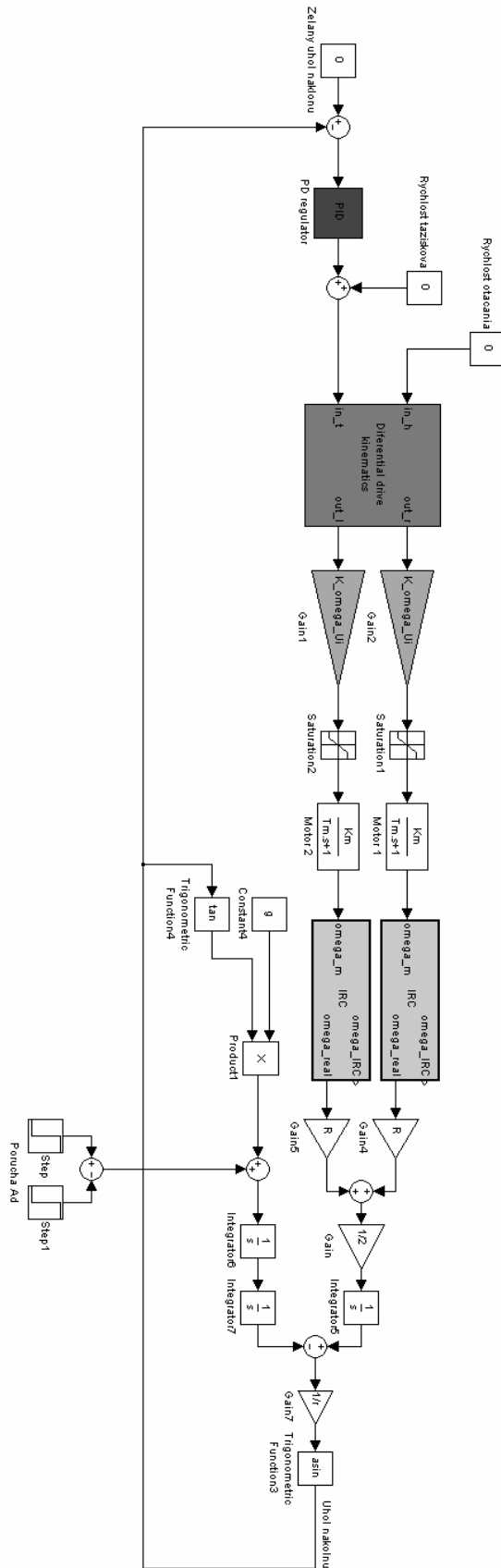
Pre vzdialenosť Δx platí :

$$\Delta x = \frac{a_T}{s^2} - \frac{a_S}{s^2} \quad (2)$$

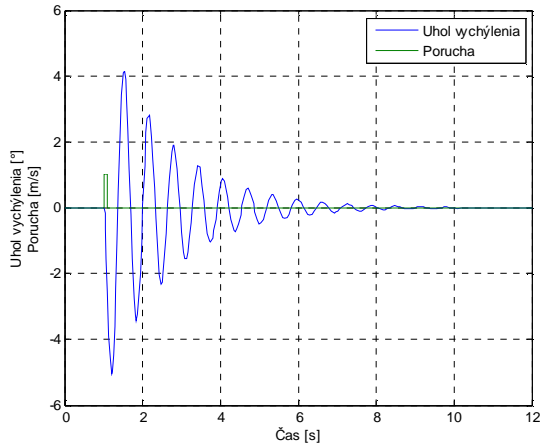
Z tohto vieme určiť uhol φ :

$$j = \arcsin \frac{\Delta x}{r} \quad (3)$$

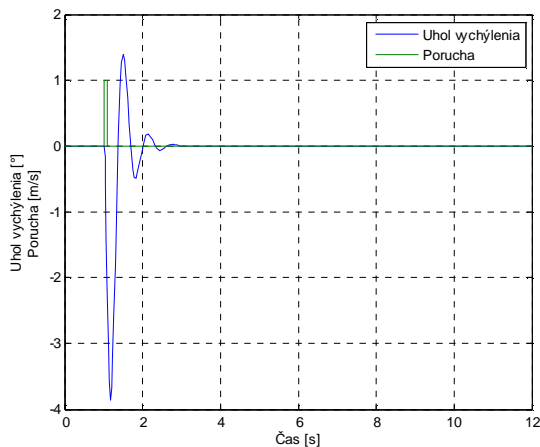
Pre potreby matematického modelu bolo potrebné ešte identifikovať použité servomotory. Toto bolo prevedené pomocou skoku napätia na motore a odmerania prechodovej charakteristiky, z ktorej bola určená časová konštanta motora T_m a zosilnenie motora K_m . Celková schéma matematického modelu v simulinku je vidieť na obr. 4. Na riadenie je použitý PD regulátor. Do spätnej väzby vstupuje aktuálny uhol náklonu, ktorý sa snažíme udržiavať na nulovej hodnote. Akčný zásah je želaná okamžitá rýchlosť bodu T, ku ktorej ešte pripočítavame hodnoty našej želanjej ťažiskovej rýchlosti a cez kinematiku diferenciálneho podvozku ešte aj rýchlosť otáčania. Toto cez kinematiku rozdelíme na rýchlosti pre každý jeden motor MR. Pretože sú v matematickom modeli zavedené nelinearity z funkcií tangens a arkus sínus treba urobiť linearizáciu tohto modelu čo je možné urobiť v oblasti predpokladaných uhlov riadenia $\pm 10^\circ$, kde sú funkcie tangens a arkus sínus takmer lineárne. Výber zosilnení PD regulátora bol prevedený tak aby sa D zložkou zrušili póly T_m v motoroch a P zložka sa nastavila experimentálne aby bola dosiahnutá požadovaná dynamika systému a pritom aby systém nekmital. Preto je D zložka nastavená podľa hodnoty časovej konštanty motora T_m . Na súbore obrázkov 5. až 7. je vidieť reakciu systému na poruchu a_d o veľkosti 1m/s ktorá trvá po dobu 0.1s, pri $D = T_m$ a rôznych nastaveniach P zložky. Konečné nastavenie PD regulátora bolo vybrané podľa poslednej simulácie, kde $P = 10$ a $D = T_m$. Ako vidieť MR sa vychýlil o necelé 3° stupne od zvislej polohy pri relatívne veľkom impulze poruchy.



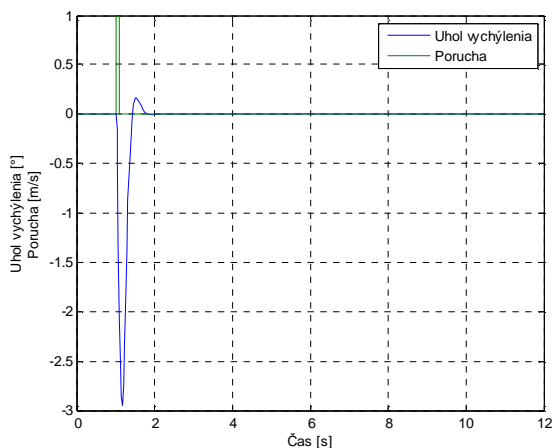
Obr.4. Matematický model riadenia stability MR typu segway



Obr.5. Reakcia riadenia na impulz poruchy pri nastaveniach PD regulátora $P = 1$ a $D = T_m$



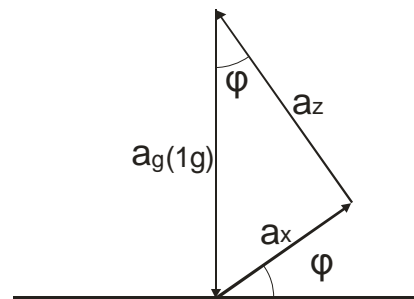
Obr.6. Reakcia riadenia na impulz poruchy pri nastaveniach PD regulátora $P = 5$ a $D = T_m$



Obr.7. Reakcia riadenia na impulz poruchy pri nastaveniach PD regulátora $P = 10$ a $D = T_m$

3. Spracovanie signálov z MEMS snímačov, komplementárny filter

Na realizáciu vyššie uvedeného riadenia je treba mať dostatočne presné možnosti merania uhla náklonu MR. Na meranie tohto uhla máme k dispozícii dvojsoj gyroskop a trojsoj akcelerometer. Napätový výstup z gyroskopu je priamo úmerný rýchlosti jeho otáčania. Preto ak chceme merať uhol treba tento signál integrovať. Tu vzniká problém pretože stredná hodnota šumu na signáli z gyroskopu nie je nulová, z toho nám po integrácii vzniká na signáli časový drift, okrem neho ma samotný gyroskop aj tepelný drift. Preto je vhodné gyroskop použiť iba pre meranie rýchlych zmien uhlu. Naproti tomu sa dá akcelerometer využitím signálov z jeho dvoch osí použiť na meranie uhla náklonu pomocou základnej trigonometrie za predpokladu keď na akcelerometer pôsobí len gravitačné zrýchlenie a to zvolíme ako referenciu $1g$ (viď. obr. 8.).

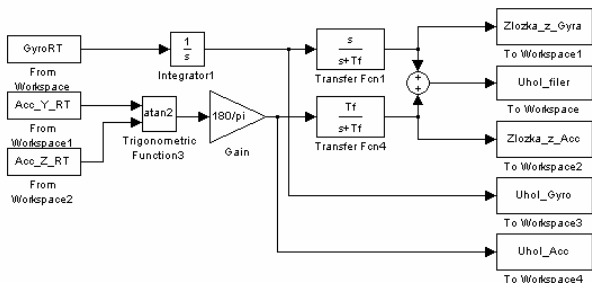


Obr.8. Základná trigonometria pre meranie uhla náklonu pomocou dvoch osí akcelerometra.

Z tohto vieme určiť uhol náklonu ako :

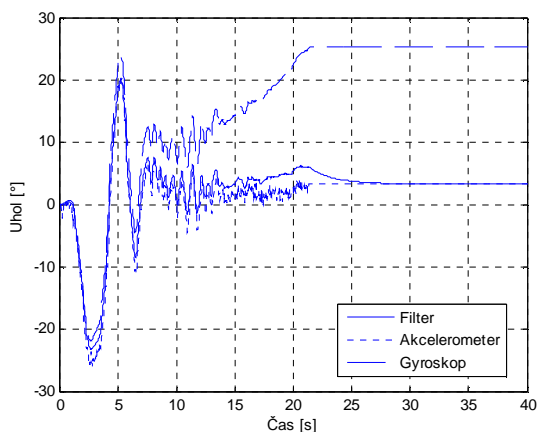
$$j = \arctan \frac{a_x}{a_z} \quad (4)$$

Problém pri meraní uhla náklonu nastáva pri pripočítaní ďalších zrýchlení pôsobiacich na akcelerometer okrem gravitačného. Znalosť obmedzení meraní uhla gyroskopom a meraní akcelerometrom nám umožňuje využiť obe merania a urobiť tak fúziu oboch snímačov pomocou komplementárneho filtra. Komplementárny filter kombinuje obe merania do jedného. Vysokofrekvenčnú zložku merania uhla získava z gyroskopu, čím sa vyhneme dlhodobému meraniu a tým aj jeho časovému driftu a nízkofrekvenčnú zložku získame pomocou merania s akcelerometrom. Vďaka tejto fúzii získavame použiteľný signál pre riadenie stability MR. Na obr. 9. je simulačná schéma realizácie komplementárneho filtra. Časová konštanta hornopriepustného a dolnopriepustného filtra sú rovnaké a bola experimentálne zvolená podľa hraničnej frekvencie 5Hz.



Obr.9. Simulačná schéma realizácie komplementárneho filtra

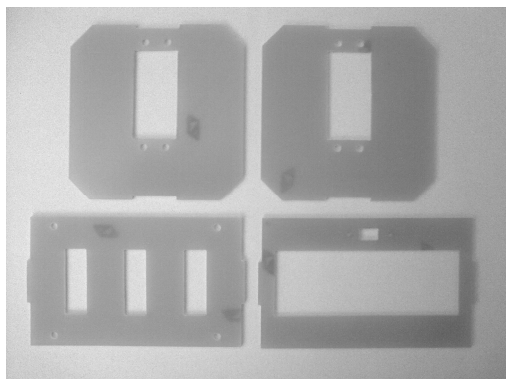
Pre otestovanie boli namerané reálne dáta z gyroskopu a z akcelerometra, funkčnosť filtra je vidieť na obr. 10.



Obr.10. Graf overenia funkčnosti komplementárneho filtra s nameranými dátami

4. Fyzická realizácia MR

Na otestovanie funkčnosti návrhu riadenia stability, bola navrhnutá fyzická realizácia takéhoto MR. Z dôvodu čo najrýchlejšej stavby tohto MR boli na jeho stavbu vybrané materiály a komponenty, ktoré sú bežne dostupné na trhu. Stavebným materiálom šasi sú sklolaminátové dosky, z ktorých boli vyrezané na CNC fréze diely pre jeho stavbu (viď. obr. 11.), kolieska sú vyrobené z diskov o priemere 12 cm, pričom sú opatrené gumovou obručou. Hotové šasi je vidieť na obr. 12.



Obr.11. Časti šasi po spracovaní na CNC fréze

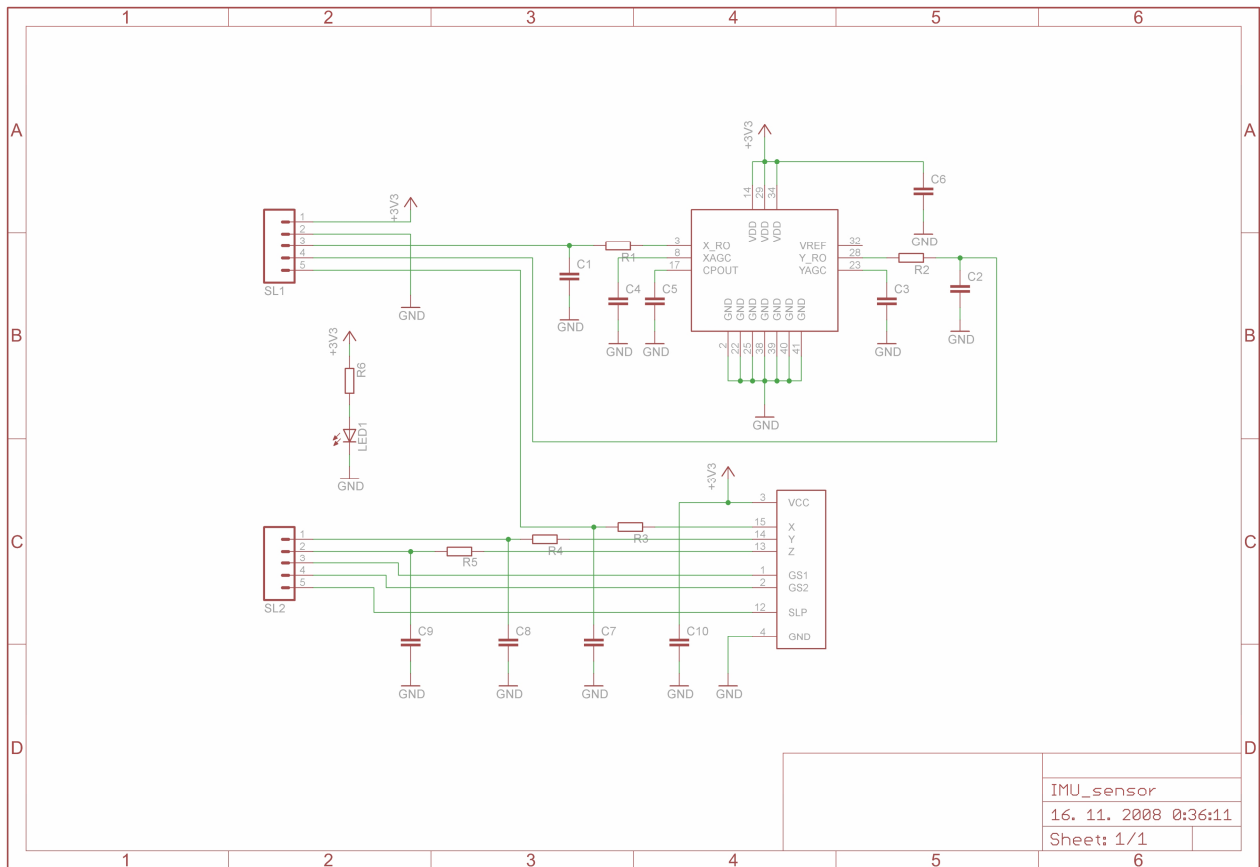


Obr.12. Hotové šasi

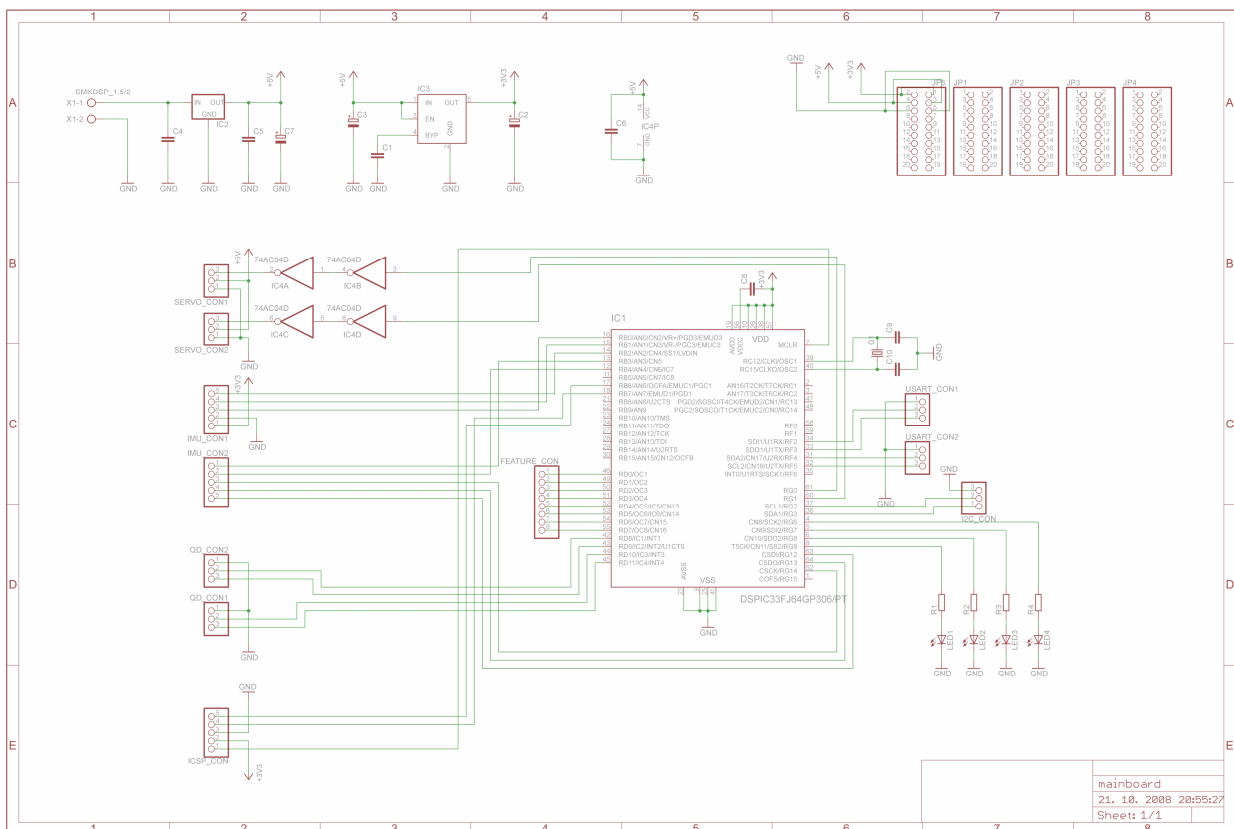
Ako pohon boli zvolené modelárske servomotory, ktoré bolo potrebné najprv upraviť pre kontinuálny pohyb, keďže neupravené sa dokážu otáčať len v rámci cca 180°. Aj napriek tomu že bola potrebná uvedená úprava je výhoda týchto motorčekov v tom, že nie je potrebné pre ne robiť riadenie a zároveň majú integrovanú prevodovku a vysoký krútiaci moment. Ďalej bolo do týchto motorov doplnený jednoduchý IRC snímač pre účely polohovania MR v priestore. Kompletne osadený MR je vidieť na obr. 2.

5. Elektronika snímačov a riadenia

Snímačovú časť elektroniky tvoria snímač uhlovej rýchlosti IDG300 od firmy Invensense a snímač zrýchlenia MMA7260Q od firmy Freescale. IDG300 je dvojosý gyroskop s rozsahom merania +- 500°/s, jeho výstup je napätie priamo úmerne uhlovému zrýchleniu. MMA7260Q je trojosý akcelerometer s voliteľnou citlivosťou merania od 1.5G do 6G. Ide o moderné a dostupné súčiastky vyrobené MEMS technológiou. Schéma zapojenia snímačovej časti je na obr. 13. Na samotné riadenie bol vybraný 16-bitový DSP mikrokontrolér od firmy Microchip pre všeobecne použitie s 18 kanálovým 12-bitovým AD prevodníkom s deviatimi 16-bitovými časovačmi, 64 KB flash pamäťou a 16KB RAM. Okrem toho ma mnoho ďalších vlastností ako sú dva moduly sériovej zbernice (I2C, SPI, UART), 8 capture/compare/PWM modulov, DMA modul atď. Napájanie bolo prenechané 5-člankovej 1100 mAh NiMh batérii. Toto napájanie je ďalej usmernené na 5V, ktoré sú použité pre motory a 3.6V, ktoré je potrebné na napájanie snímačov a procesora. Schéma zapojenia riadiacej časti je na obr. 14. Po hw stránke sú tak isto rozdelené časti snímačová a riadiaca na dvoch doskách s plošným spojím (ďalej DPS). Návrh DPS bol urobený v návrhovom systéme EAGLE 5.0, odtiaľ bol exportovaný do formátu pre vŕtanie a výrobu DPS. Keďže ide o obojstranné DPS a bolo potrebné aby mali nespakovateľnú masku, kvôli osádzaniu SMD súčiastok bola ich výroba zverená profesionálnej firme zaoberajúcej sa výrobou DPS.

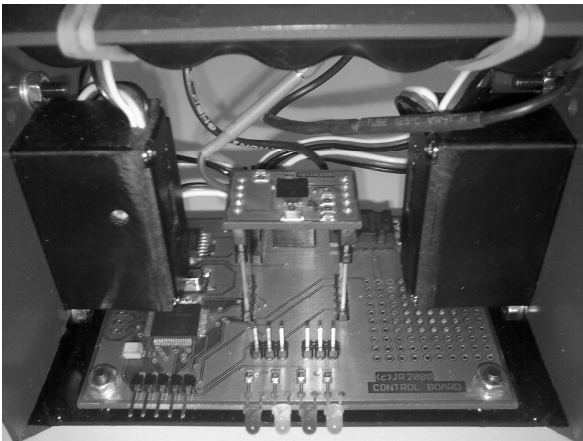


Obr.13. Schéma zapojenia snímačovej časti MR



Obr.14. Schéma zapojenia riadiacej časti MR

Firmware riadenia je programovaný v programovacom prostredí MPLAB v8.20 od firmy Microchip a v programovacom jazyku ANSI C. Pre účely riadenia bolo potrebné vytvoriť knižnice pre základne bloky potrebné pri riadení ako sú PID regulátor, integrátor, FIR filter hornopriepustný a dolnopriepustný filter, derivátor. V čase písania tohto textu ešte nebol úplne dokončený riadiaca časť programu, no bolo už naprogramované všetky časti potrebné pre prácu so snímačmi, motormi, komunikácia s PC, numerika a doplnkový filter. Perióda vzorkovania výpočtu aktuálnych hodnôt pre riadenie je 5ms. Na obr. 15. je vidieť detail elektroniky MR.



Obr.15. Detail elektroniky MR

5. Záver

Táto práca popisuje možnosť použitia MEMS snímačov na riadenie stabilizácie mobilného robota s diferenciálnym podvozkom bez oporného kolieska typu segway. Je tu predložený návrh riadenia ktorý bol otestovaný v simulinku, návrh fúzie signálov zo snímačov a ktorý bol tak isto otestovaný v simulinku a zároveň aj numerický v programovacom jazyku C. Za účelom otestovania tohto riadenia bol vytvorený aj fyzický model tohto MR ktorý sa nachádza v čase písania článku už vo fáze dokončenia firmware. V budúcnosti je pripravované aj otestovanie fúzie snímačov pomocou kalmanovho filtra, ktorý sa zdá byť podľa jeho referencií veľmi dobrým estimátorom pri fúzii rôznych snímačov.

6. Literatúra

- [1] Tuck, K.: Tilt sensing using linear accelerometers [online] Dostupné z http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf
- [2] Bearveldt, A. J., Klang, R.: A low cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter [online] Dostupné z

http://www.robot.uvsq.fr/accueil/stages/MIS/articles/inertial_sensor_for_helicopter.pdf

- [3] Microchip : dsPIC33FJXXXGP06/X08/X10 Data Sheet. [online] Dostupné z <http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70286C.pdf>
- [4] Freescale : +-1.5g - 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer [online] Dostupné z http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf?pspl=1
- [5] Invensense : Integrated Dual-Axis Gyro IDG-300 [online] Dostupné z http://www.invensense.com/shared/pdf/DS_IDG300.pdf