

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Stabilizovaná senzorová plošina

Praha, 2009

Autor: Matej Pčolka

Prehlásenie

Čestne prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne a použil len literatúru, ktorú uvádzam v zozname.

Nemám závažný dôvod proti použitiu tohto školného diela.

V Prahe dňa _____

_____ podpis

Pod'akovanie

Moje poďakovanie patrí predovšetkým vedúcemu mojej bakalárskej práce, doc. Ing. Jiřímu Bayerovi, CSc., za jeho cenné rady a prívetivý prístup pri realizácii tejto práce. Ďakujem tiež všetkým, ktorí mi pomáhali pri riešení technických problémov. Osobitné poďakovanie patrí mojim rodičom, sestre a priateľom za optimizmus, ktorý mi po celý čas dodávali, za rozptýlenie a za dobrú náladu, ktorou ma zásobovali.

Abstrakt

Náplňou tejto práce je návrh a realizácia stabilizovanej sensorovej plošiny pre lietajúce stroje typu quadrotor a vzducholod.

Je v nej podrobne rozobratá teoretická stránka problematiky, ktorá sa týka robotiky, najmä kinematiky a inverznej kinematiky. Dostatočný priestor je venovaný popisu použitých súčastí a ich výberu, konkrétne použitých sensorov, servomotorov a riadiaceho mikroprocesora. Práca zahŕňa popis hardware a software finálneho riešenia. V prílohe sú uvedené schémy použitej elektroniky a zdrojový kód vyvinutého riadiaceho algoritmu.

Abstract

This bachelor thesis aims at the design and realisation of the stabilised sensor platform for the unmanned aerial vehicles, type quadrotor and airship.

The theoretical part of the problematics that pertains to robotics, especially to direct cinematics and inverse cinematics, is analysed in details. Adequate space is devoted to description of each used parts and their selection, in the concrete sensors, servomotors and microcontroller. The thesis includes characterization of hardware and software used as the final version, as well. Appendix consist of electrotechnical schemes and source codes of the operative algorithm.

Zadanie

Obsah

Zoznam obrázkov	viii
Zoznam tabuliek	ix
1 Úvod	1
1.1 Technické vybavenie robotov	2
1.1.1 Senzorika robotov	3
1.1.2 Riadiaci a rozhodovací subsystém	3
1.1.3 Konštrukcia robotov	3
1.2 Mechanika robotov	4
1.2.1 Kinematika	5
2 Cieľové uplatnenie	8
2.1 Vzducholod'	8
2.2 Quadrotor	8
3 Riešenie stabilizovanej plošiny	10
3.1 Mechanická koncepcia	10
3.1.1 Kinematika	11
3.1.1.1 Určenie počtu stupňov voľnosti	11
3.1.1.2 Priama kinematická úloha	12
3.1.1.3 Inverzná kinematická úloha	17
3.1.2 Pohony	18
3.2 Senzorový systém	19
3.2.1 Senzorový subsystém quadrotoru	21
3.2.1.1 Základný popis	21
3.2.2 Akcelerometer LIS3LV02DQ	23
3.2.2.1 Popis senzora	24

3.2.3	Výpočet uhlov náklonu a spracovanie dát	24
3.3	Riadiaci systém	26
3.3.1	HW riešenie	26
3.3.1.1	Doska LPC2119	26
3.3.1.2	Komunikácia so sensorovým systémom	26
3.3.2	SW riešenie	28
3.3.2.1	Inverzná kinematika	30
3.3.2.2	Regulácia pohonov	30
3.3.3	Dynamika stabilizovanej sensorovej plošiny	30
3.4	Spolupráca s nadriadeným systémom mobilného robota	31
3.4.1	Variantné riešenie stabilizovanej plošiny	31
3.4.1.1	Quadrotor	31
3.4.1.2	Vzducholod'	31
3.4.2	Spolupráca v distribuovanom systéme	32
3.4.2.1	Napájanie riadiacej dosky	32
3.4.2.2	Napájanie servomotorov	32
3.4.2.3	Komunikácia so sensorickým subsystémom	33
4	Záver	34
4.1	Servomotory	34
4.2	Mechanická konštrukcia	34
4.3	Riadiaca doska	35
4.4	Software	35
5	Zhrnutie	36
	Literatúra	37
A	Riadiaca doska LPC2119 - bloková schéma	I
B	Rozširujúca doska ebBoard - schéma zapojenia	II
C	Akcelerometer LIS3LV02DQ- schéma zapojenia	III
D	Obsah priloženého CD	IV

Zoznam obrázkov

2.1	Vzducholod' - Müller.	9
2.2	Quadrotor - Heinrich, Mareček.	9
3.1	Model SPT200. Zdroj: http://www.servocity.com/	10
3.2	Moje riešenie mechanickej konštrukcie, pohľad z boku	11
3.3	Moje riešenie mechanickej konštrukcie, pohľad zhora	12
3.4	Schéma stabilizovanej plošiny ako manipulátora	14
3.5	Reálny model s popisom jednotlivých častí	15
3.6	Použitý servomotor, HSR-5990TG.	19
3.7	Senzorový subsystém quadrotoru	20
3.8	Inerciálny senzor LIS3LV02DQ.	20
3.9	Princíp merania Coriolisovho zrýchlenia	22
3.10	Gyroskop ADXRS150.	22
3.11	Akcelerometer ADXL203.	23
3.12	Doska LPC2119 s rozširujúcou doskou ebBoard.	27
3.13	Zbernica SPI	28
3.14	Bloková schéma spracovania dát.	28
3.15	Schéma riadiaceho algoritmu.	29
A.1	Riadiaca doska LPC2119 - bloková schéma.	I
B.1	Rozširujúca doska ebBoard - schéma zapojenia.	II
C.1	Akcelerometer LIS3LV02DQ- schéma zapojenia.	III

Zoznam tabuliek

1.1	Druhy kinematických dvojíc	7
3.1	Parametre plošiny ako manipulátora	13
3.2	Skutočné rozmedzie hodnôt	14

Kapitola 1

Úvod

Robot je automatické zariadenie schopné prijímať podnety z okolia, reagovať na ne a následne na toto okolie spätne pôsobiť. Slovo robot sa používalo už v sedemnástom storočí, v rakúskej nemčine vo význame „otrocká práca poddaných“. Údajne ho po prvýkrát použil známy český spisovateľ Karel Čapek vo svojom diele R.U.R.. Hoci najprv zamýšľal použiť slovo „Labor“, na radu svojho brata nakoniec uprednostnil slovo robot, pretože chcel zdôrazniť, že roboty sú určené na vykonávanie ťažkej a úmornej práce (čiže roboty).

Dôvody, ktoré determinujú robotiku ako obor a ktoré podnecujú záujem ľudí o roboty sú nasledovné:

- Meranie si síl s prírodou, overenie dosahu tvorivých schopností ľudského ducha a snaha pokusom o napodobenie prírody preniknúť do jej zákonitostí.
- Túžba vytvoriť dokonalého pomocníka so schopnosťami porovnateľnými alebo presahujúcimi ľudské možnosti a neobmedzenou spoľahlivosťou (Smutný, 2008).

Zákony robotiky

1. Robot nesmie ublížiť človeku alebo svojou nečinnosťou dopustiť, aby bolo človeku ublížené.
2. Robot musí poslúchnuť rozkazy človeka, okrem prípadov, kedy sú tieto príkazy v rozpore s prvým zákonom.
3. Robot musí chrániť sám seba pred zničením, okrem prípadov, kedy je táto ochrana v rozpore s prvým alebo druhým zákonom.

(Isaac Asimov, The Caves of Steel)

Kargera, Kargerová (Karger, 2000), uvádzajú nasledovné delenie robotov:

1. Roboty sériové (seriálne) – u týchto sa výsledný pohyb skladá z jednotlivých pohybov, ktoré sú väčšinou elementárne a nadväzujú na seba. Jednotlivé časti sa pritom pohybujú navzájom nezávisle.
2. Paralelné roboty (manipulátory) – týmto pojmom označujeme roboty, u ktorých výsledný pohyb vzniká súčinnosťou všetkých pohyblivých častí, pričom jednotlivé časti robota sú radené vedľa seba.
3. Kombinované roboty – sú výsledkom kombinácie sériových a paralelných podštruktúr. U vybraných problémov je potrebné kombinovať poznatky získané ohľadom prvej resp. druhej skupiny robotov.

1.1 Technické vybavenie robotov

Roboty možno považovať za kybernetické systémy, zložené z troch základných subsystémov:

1. Senzorický subsystém zodpovedný za získavanie informácií
 - z okolia
 - z vnútra robota
2. Riadiaci a rozhodovací subsystém
3. Motorický subsystém zodpovedný za pohyb v priestore alebo jeho modifikovanie

Prvé dva subsystémy tvoria spolu kognitívny systém robota, ktorého štúdiom sa zaoberá teoretická robotika.

U stabilizovanej sensorovej plošiny môžeme takisto zaradiť jednotlivé časti do vyššie uvedených skupín:

- senzorický systém je zastúpený kombináciou gyroskop - akcelerometer
- úlohu riadiaceho systému plní mikroprocesor LPC2119
- motorický systém zastupujú servomotory HSR-5990TG

1.1.1 Senzorika robotov

Senzorika robotov dokáže emulovať nielen všetky zmysly človeka, ale aj mnohé, ktorými ľudia nedisponujú. Sensory môžu byť podľa prostredia, z ktorého prinášajú informácie, rozdelené na interné a kognitívne.

Interné senzory

Interné senzory prinášajú riadiacemu systému informácie o vnútornom prostredí robota. Sú to zväčša senzory pre meranie polohy, ktoré konkrétne merajú uhol natočenia (tieto sú najčastejšie, keďže u riadených kĺbov je potreba merať jednotlivé uhly, aby mohli byť tieto informácie využité v samotnom procese riadenia), lineárny posun (u karteziánskych robotov) a polohu koncového bodu.

Kognitívne senzory

Kognitívne senzory sú určené pre vnímanie informácií z okolitého prostredia, analogicky k ľudským zmyslom. Zrak nahradzujú kamery, sluch je zastúpený mikrofónmi, hmat sa simuluje pomocou taktilných čidiel. Dnes sú roboty schopné využívať aj zmysly, ktoré je zdanlivo ťažké technicky realizovať. Na vnímanie čuchových podnetov sa využívajú plynové chromatografy, otvorené výbojky či špeciálne tranzistory s organickou tenkou vrstvou, chuťové vnemy sa vyhodnocuje napríklad kvapalinovým chromatografom. Roboty však disponujú aj mnohými inými „zmyslami“, ktorými človeka preyšujú, napr. proximitnými snímačmi, radarmi, meračmi vzdialenosti a mnohými inými.

Senzory stabilizovanej sensorovej plošiny

V mojej bakalárskej práci využívam senzory určenia polohy resp. náklonu. Podrobnejšie je táto problematika rozobratá v kapitole 3.2.

1.1.2 Riadiaci a rozhodovací subsystém

Prakticky výlučne ho tvorí počítač (najčastejšie ale v špeciálnom vyhotovení ako PLC alebo SLC) v kombinácii s vhodným softvérom.

1.1.3 Konštrukcia robotov

V nasledujúcom texte sú uvedené základné pojmy z konštrukcie robotov (Smutný, 2008).

Ramenom (link) nazývame pevnú časť robota.

Kĺb (joint) je časť robota, ktorá umožňuje pohyb dvoch ramien, ktoré spája. Podľa pohybu, ktorý kĺb umožňuje, sa kĺby rozdeľujú na riadené a voľné. Riadený kĺb je riadený pohonom a riadiaci systém teda môže meniť jeho polohu podľa programových inštrukcií. Poloha voľne pohyblivého kĺbu je plne závislá na polohe ostatných kĺbov a nie je externe riadená.

Chápadlom (end effector) rozumieme časť manipulátora, ktorá slúži na uchopovanie, manipuláciu alebo namontovanie ďalších nástrojov (zváracie hlavice, striekacie hlavice a podobne).

Základňa (rám, base) označuje časť manipulátora pevne spojenú so zemou.

Kinematickou dvojicou (kinematic pair) označujeme dvojicu ramien, ktoré sú spojené jedným spoločným kĺbom.

Kinematický reťazec je množina ramien navzájom spojených kĺbmi. Kinematický reťazec môže byť reprezentovaný grafom, v ktorom uzly grafu predstavujú ramená a hrany reprezentujú jednotlivé kĺby. Rozlišujeme viacero druhov kinematických reťazcov, v závislosti na ich konštrukcii. Otvorený kinematický reťazec predstavuje reťazec, ktorý môže byť popísaný acyklickým grafom. Ak je možné reťazec popísať grafom obsahujúcim slučku, ide o zmiešaný kinematický reťazec. O paralelnom manipulátore hovoríme v prípade, že graf obsahuje ekvivalentné slučky.

Mechanizmus je kinematický reťazec s jedným ramenom (to označujeme ako základňa) pripevneným k zemi.

1.2 Mechanika robotov

Mechaniku robotov môžeme rozdeliť na tri základné časti:

1. Kinematika – zaoberá sa geometriou pohybu robota a trajektóriami, ktoré prináležia jednotlivým pohybujúcim sa bodom. Za kľúčový pojem v kinematike označujeme pojem *poloha*.
2. Statika – analyzuje vplyv síl, ktoré pôsobia na robota a popisuje ich vplyv na jeho deformácie. Kľúčovým pojmom rozumieme *pružnosť*.
3. Dynamika – skúma vplyv síl a momentov pôsobiacich na robota pri jeho pohybe.

1.2.1 Kinematika

Za základné úlohy v kinematike považujeme:

1. Priama kinetická úloha – na základe známych polôh jednotlivých kĺbov hľadáme polohu chápadla, pracovného nástroja. V prípade paralelného robota je vzájomná poloha určená pomocou dĺžok jednotlivých teleskopických ramien, u sériového robota je rozhodujúcou vzdialenosť a uhly jednotlivých ôs.
2. Inverzná kinetická úloha – poznáme požadovanú polohu koncového bodu a hľadáme polohy jednotlivých kĺbov, pomocou ktorých sme schopní túto požadovanú výslednú polohu dosiahnuť.

Základné pojmy

Počet stupňov voľnosti (intuitívna definícia; DOF) je minimálny počet nezávislých parametrov, ktorými je možné daný systém jednoznačne popísať.

Príklady: U tuhého telesa v rovine rozlišujeme 3 DOF, v priestore má tuhé teleso 6 DOF. Bod v rovine vyžaduje 2 DOF, bod v priestore 3 DOF.

Nielen v robotike využívame pojem počet stupňov voľnosti. Nasleduje niekoľko pojmov, ktoré s ním súvisia:

Okolitý priestor – priestor, v ktorom sa robot alebo mechanizmus pohybuje a vykonáva svoju činnosť. Ak ide o rovinu, teda E^2 , hovoríme o planárnom manipulátore. V prípade, že robot využíva E^3 , teda priestor, ide o priestorový manipulátor.

Obvykle nás z praktického hľadiska zaujímajú možné polohy manipulovaného objektu alebo nástroja. V ďalšom texte budeme predpokladať, že manipulovaný objekt môže byť reprezentovaný tuhým telesom. Ako sa vyššie uvádza, tuhé teleso má v 3D priestore 6 stupňov voľnosti, teda jeho *poloha telesa* v trojrozmernom okolitom priestore vyžaduje popis pomocou šiestich parametrov. Význam jednotlivých parametrov závisí na zvolenej parametrizácii, väčšinou ide o súradnice zvoleného bodu (3 parametre) a orientáciu, ktorá je určená tromi uhlami.

Priestorom všetkých polôh potom označujeme šesťrozmerný priestor, ktorý predstavuje všetky možné polohy tuhého telesa.

Poloha chápadla môže byť študovaná v spomínanom priestore všetkých polôh.

Pracovným priestorom rozumieme podpriestor priestoru všetkých polôh, ktorý obsahuje všetky realizovateľné polohy chápadla. V tomto šesťrozmernom pracovnom priestore následne posudzujeme riešiteľnosť každej konkrétnej úlohy.

Podľa Smutného (Smutný, 2008) rozlišujeme nasledujúce kinematické dvojice:

- sférická,
- rotačná,
- posuvná,
- valcová,
- plochá.

V technickej praxi spravidla dávame prednosť rotačnému kĺbu z dôvodu lacnej realizácie a dobrých vlastností. Ide najmä o malé trenie a vysokú tuhosť. V nasledujúcom texte sa budeme preto venovať predovšetkým rotačným a posuvným kĺbom.

Počet stupňov voľnosti – Grüblerovo-Kutzbachovo kritérium

Označme si jednotlivé parametre mechanizmu:

c_i počet obmedzení odobraných kĺbom i

f_i počet stupňov voľnosti kĺbu i

n počet ramien mechanizmu (mechanizmus zahŕňa fixný rám)

j počet kĺbov mechanizmu (všetky kĺby považujeme za binárne)

λ počet stupňov voľnosti okolitého priestoru

Potom počet stupňov voľnosti F , ktoré tomto mechanizmu prislúchajú, môžeme určiť ako:

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1.1)$$

alebo

$$F = \lambda(n - 1) - \sum_{i=1}^j c_i \quad (1.2)$$

Toto kritérium poskytuje správne výsledky v prípade, že všetky kĺby sú navzájom nezávislé a v mechanizme sa nevyskytujú nepozorovateľné stupne voľnosti.

Stručný prehľad kinematických dvojíc spolu s parametrami c_i , resp. f_i podľa Smutného (Smutný, 2008) prikladáme v tabuľke 1.1.

Ako už bolo spomenuté, tuhé teleso v priestore má 6 stupňov voľnosti. Preto aj manipulátor, od ktorého požadujeme, aby zabezpečil ľubovoľnú polohu telesa aspoň v obmedzenom priestore, musí nutne mať minimálne 6 stupňov voľnosti. Každý ďalší stupeň voľnosti manipulátor predražuje a zhoršuje jeho mechanické vlastnosti, predovšetkým tuhosť, a preto s ohľadom na ekonomické a technické potreby mávajú obecné manipulátory

Názov	Má (f_i) / odníma (c_i) počet DOF
Sférická	3/3
Rotačná	1/5
Posuvná	1/5
Valcová	2/4
Plochá	3/3

Tabuľka 1.1: Druhy kinematických dvojíc

práve 6 stupňov voľnosti. Keďže zostrojiť riadený kĺb s dvoma stupňami voľnosti je technologicky náročné (a teda drahé), kĺby, u ktorých požadujeme možnosť riadenia, majú práve jeden stupeň voľnosti. Najčastejšie sa v praxi využívajú rotačné (otočné) a posuvné kĺby. V prípade, že nepožadujeme možnosť daný kĺb riadiť, sú ľahko realizovateľné aj iné kĺby, valcový, sférický a ďalšie. Manipulátory, ktoré môžeme popísať acyklickým grafom, a teda tvoria otvorený kinematický reťazec, majú pochopiteľne všetky kĺby riadené a odmeriavané. Je tomu tak z dôvodu prostej funkčnosti jednotlivých kĺbov. U sériových manipulátorov so šiestimi stupňami voľnosti, ktoré zahŕňajú len rotačné a posuvné kĺby a majú za úlohu zaistiť všeobecnú orientáciu manipulovaného nástroja, je nutné, aby boli aspoň tri kĺby otočné, keďže nie je možné za pomoci ľubovoľného počtu iba posuvných kĺbov otočiť telesom. Zvyčajne prvé tri kĺby (smerom od základne, teda rámu) určujú tvar pracovnej obálky a dosah robota, pretože majú veľký rozsah pohybu. Posledné tri kĺby, najčastejšie rotačné, zase zabezpečujú orientáciu chápadla resp. pracovného nástroja (Smutný, 2008).

Kapitola 2

Cieľové uplatnenie

V mojej práci uvažujem dve koncepcie mechanického usporiadania stabilizovanej plošiny:

1. koncepcia s dvoma motormi (kĺbmi)
2. koncepcia s tromi motormi (kĺbmi)

Každá z týchto koncepcií má svoje špecifiká a drobné rozdiely, ktoré sa líšia podľa zamýšľaného cieľového uplatnenia.

2.1 Vzducholod'

U tejto koncepcie sa plánuje s použitím dvojmotorovej koncepcie. Toto mechanické usporiadanie súvisí so špecifikáciou vzducholode. Vzducholod' (môžeme vidieť na obrázku 2.1) je lietajúci dopravný prostriedok ľahší ako vzduch so špecifickým cigarovitým tvarom. Z praktického pohľadu je dôležitý fakt, že sa jedná o plavidlo, ktoré má preddefinovaný význačný bod, tzv. provu. Vzducholod' teda letí vždy provou vpred, čo zjednodušuje usporiadanie sensorovej plošiny a umožňuje použiť na jej stabilizáciu len dva motory.

2.2 Quadrotor

Quadrotor (obrázok 2.2) je takisto ako vzducholod' lietajúcim dopravným prostriedkom, na rozdiel od vzducholode však nemá definovaný význačný bod na svojej karosérii, všetky body sú z hľadiska možného smeru pohybu rovnocenné. Pri stabilizácii plošiny je teda

potrebné použiť tri motory, každý zabezpečuje rotáciu okolo jednej z troch navzájom kolmých osí.



Obrázok 2.1: Vzducholod' - Müller.



Obrázok 2.2: Quadrotor - Heinrich, Mareček.

Kapitola 3

Riešenie stabilizovanej plošiny

3.1 Mechanická koncepcia

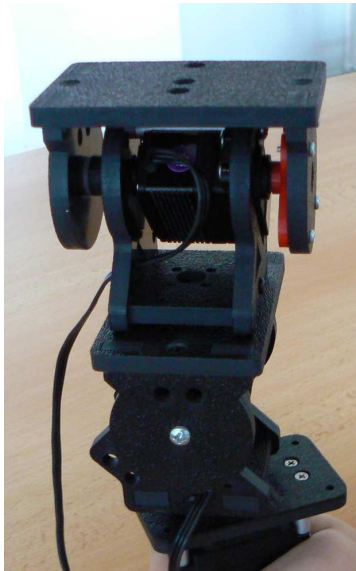
Pri riešení mechanickej koncepcie je využitý hotový produkt firmy ServoCity, konkrétne model SPT200 (obr. 3.1). Tento model, rovnako ako aj ďalšie jemu podobné výrobky, umožňuje polohovanie kamier, senzorov, prípadne iných predmetov do hmotnosti až 1 kg a pomáha eliminovať jeden z najväčších problémov servomotorov. Tým je skutočnosť, že servo je nie vždy schopné uspokojivo manipulovať s pripevnenou záťažou, hoci eventuálne poskytuje dostatok krútiaceho momentu. Priestorové usporiadanie spolu s využitím guľôčkového ložiska podporuje rotačné účinky servomotorov.



Obrázok 3.1: Model SPT200. Zdroj: <http://www.servocity.com/>

Model SPT200 sa skladá z dvoch blokov, z ktorých každý realizuje rotáciu okolo jednej

osi. Je dodávaný ako súprava dielcov, z ktorých je možné výslednú konštrukciu veľmi jednoducho a pohodlne zložiť. Keďže tento mechanický systém umožňuje pohyb len s dvoma stupňami voľnosti, skombinoval som dva takéto výrobky so zámerom dosiahnuť požadované tri stupne voľnosti (zobrazené na obrázkoch nižšie).



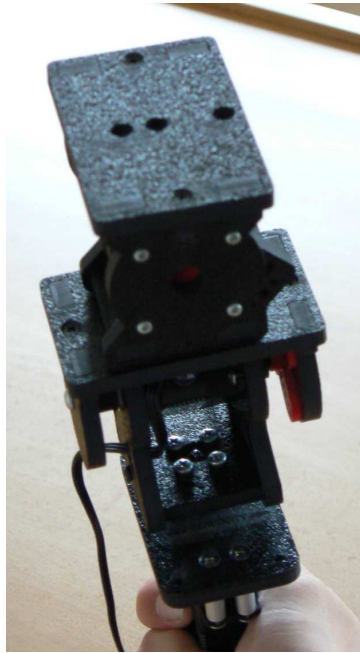
Obrázok 3.2: Moje riešenie mechanickej konštrukcie, pohľad z boku

3.1.1 Kinematika

Všeobecnú problematiku kinematiky u robotov som rozobral v úvode mojej bakalárskej práce. V tejto časti sa pozriem na konkrétne črty môjho problému.

3.1.1.1 Určenie počtu stupňov voľnosti

Pre priamu aj inverznú kinematickú úlohu je určenie počtu stupňov voľnosti kritické a nevyhnutné, a preto sa mu budem venovať hneď v úvode k týmto ďalším dvom častiam. Ako uvádzam v kapitole 1, manipulátor, od ktorého požadujeme zabezpečenie ľubovoľnej polohy (aj v obmedzenom pracovnom priestore) musí mať minimálne 6 stupňov voľnosti. Moja stabilizovaná plošina však nemusí poskytovať ľubovoľnú polohu, jej úlohou je nastaviť iba ľubovoľnú orientáciu chápadla. Na to sú postačujúce tri motory odpovedajúce trom stupňom voľnosti. Táto úvaha je aj v súlade s Grüblerovým-Kurtzbachovým



Obrázok 3.3: Moje riešenie mechanickej konštrukcie, pohľad zhora

kritériom, ktoré som uviedol v teoretickom úvode:

$$F = \lambda(n - 1) - \sum_{i=1}^j c_i \quad (3.1)$$

Po uvážení okolitého priestoru a použitých kĺbov je možné za premenné dosadiť konkrétne hodnoty:

$$\lambda = 6;$$

$$n = 4;$$

$$c_i = 5 \text{ pre každé } i.$$

$$F = 6(4 - 1) - (5 + 5 + 5) = 3.$$

Môj manipulátor teda neumožňuje nastaviť ľubovoľnú polohu v šesťrozmernom priestore. S ohľadom na účel, využitie a špecifikáciu stabilizovanej plošiny však táto skutočnosť nijako neprekvapuje ani stabilizovanú plošinu nedegraduje z hľadiska využiteľnosti.

3.1.1.2 Priama kinematická úloha

Priamu kinematickú úlohu je možné popísať ako úlohu, kedy sú známe kĺbové súradnice jednotlivých kĺbov a hľadáme polohu koncového bodu ako funkciu týchto známych para-

metrov.

$$X = f(\theta_1, \theta_2, \theta_3),$$

kde

X je poloha v 6-rozmernom priestore všetkých možných polôh, $X = [x; y; z; \phi]$, pričom $\phi = [\phi_x; \phi_y; \phi_z]$; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ sú hodnoty jednotlivých kĺbových súradníc.

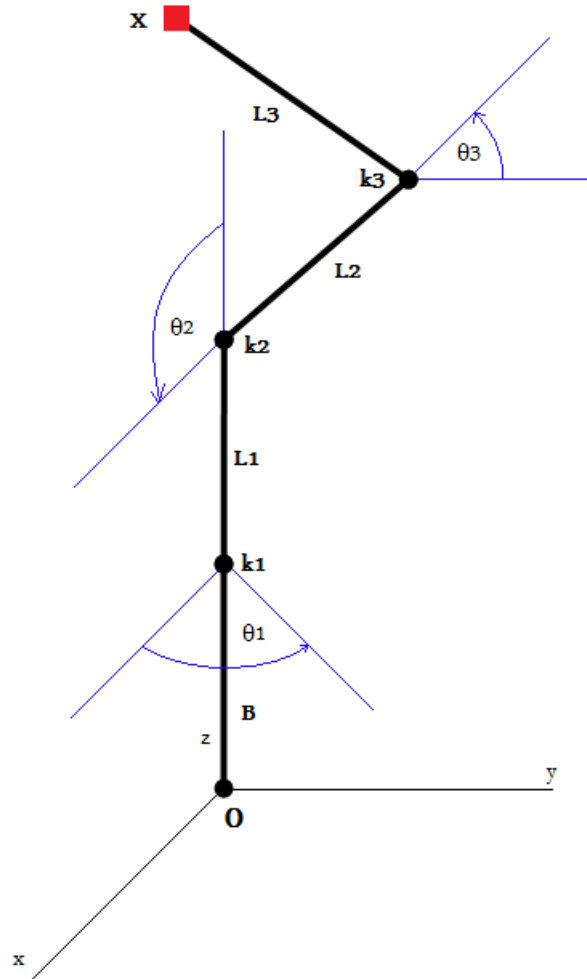
U otvoreného kinematického reťazca sa jedná vo všeobecnosti o pomerne jednoduchú a priamočiaru úlohu, ktorá má obvykle jedno riešenie. Obrázok 3.4 v zjednodušenej miere popisuje stabilizovanú plošinu. Bodom O je označený počiatok súradnej sústavy. Pre zjednodušenie je umiestnený zhodne s počiatkom základne. Rameno označené písmenom R predstavuje práve základňu. Toto rameno je prostredníctvom kĺbu k_1 spojené s ramenom L_1 . U kĺbu k_1 je zaujímavá jeho kĺbová súradnica θ_1 , ktorá určuje rotáciu okolo osi z . Ramená L_1 a L_2 sú spojené kĺbom k_2 , ktorého kĺbová súradnica θ_2 určuje otočenie okolo osi y . Ramená L_2 a L_3 spája kĺb k_3 . Kĺbová súradnica θ_3 tohto posledného kĺbu popisuje rotáciu okolo osi x . Na konci ramena L_3 sa nachádza bod X , ktorého polohu hľadáme prostredníctvom priamej kinematickej úlohy. Na obrázku 3.5 môžeme vidieť reálny model s popisom jednotlivých spomínaných častí.

Považujem za dôležité spomenúť, že uhly θ_2 a θ_3 sú merané od dotyčnice k zemskému povrchu.

Tabuľky 3.1 a 3.2 popisujú jednotlivé parametre, vystupujúce v ďalšom texte, rovnako ako aj rozmedzie ich hodnôt. Za povšimnutie stojí aj obmedzenie u dvoch kĺbov, konkrétne k_1 a k_2 , kde v zápornom smere uvádzam rozsah iba po -65° . Tento fakt je spôsobený skutočnosťou, že mechanická konštrukcia, v ktorej sú servomotory upevnené, čiastočne obmedzuje ich plný rozsah v tomto smere.

Rameno	Dĺžka ramena [mm]
B	80
L_1	45
L_2	71
L_3	29

Tabuľka 3.1: Parametre plošiny ako manipulátora

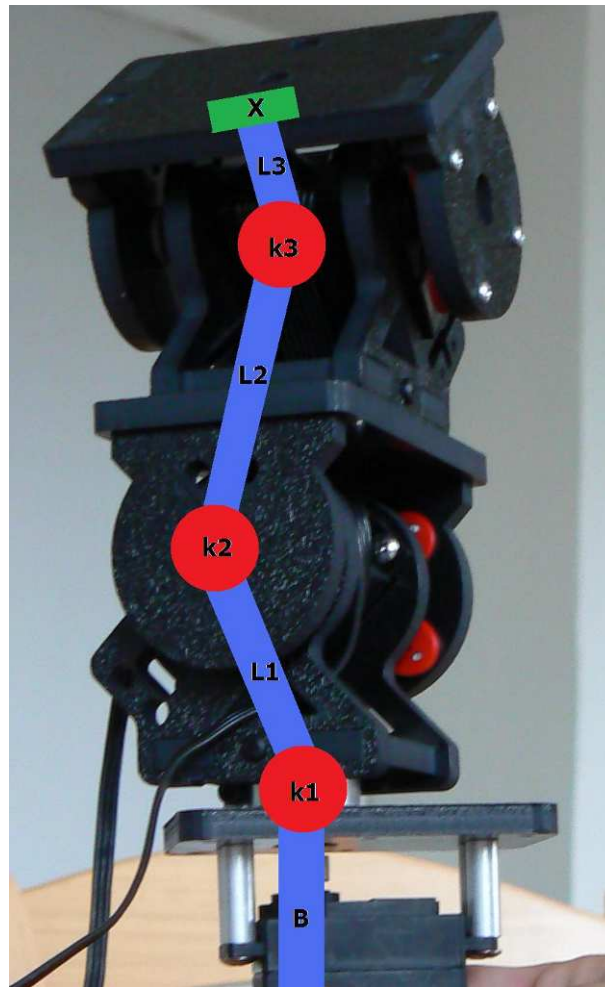


Obrázok 3.4: Schéma stabilizovanej plošiny ako manipulátora

Kĺb	Rozsah [°]
k_1	$\langle -92, +92 \rangle$
k_2	$\langle -65, +92 \rangle$
k_3	$\langle -65, +92 \rangle$

Tabuľka 3.2: Skutočné rozmedzie hodnôt

S ohľadom na fyzikálnu interpretáciu týchto hodnôt, špecifikáciu cieľového využitia a jednoduchšiu implementáciu odporúčam pre kĺb k_1 uvažovať rozsah $\langle -90^\circ, +90^\circ \rangle$ a



Obrázok 3.5: Reálny model s popisom jednotlivých častí

u kĺbov k_2 a k_3 uvažovať rozsah $\langle -50^\circ, +50^\circ \rangle$.

Pre vyriešenie priamej kinematickej úlohy je vhodné s výhodou využiť možnosť popisu jednotlivých transformácií (rotácia, posun) maticami. Podotýkam, že priama kinematická úloha nedosahuje v mojom prípade dôležitosti inverznej kinematickej úlohy, uvádzam ju tu ale z dôvodu úplnosti.

Posun z bodu O do kĺbu k_1 môže byť popísaný maticou \mathbf{A}_{01} .

$$\mathbf{A}_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Rotáciu v kĺbe k_1 o θ_1 okolo osi z popisuje matica $\mathbf{A}_{12}(\theta_1)$.

$$\mathbf{A}_{12}(\theta_1) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Z kĺbu k_1 do kĺbu k_2 sa „presunieme“ maticou \mathbf{A}_{23} .

$$\mathbf{A}_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Kĺb k_2 vykonáva rotáciu okolo osi y o uhol θ_2 , popisujeme ju maticou $\mathbf{A}_{34}(\theta_2)$.

$$\mathbf{A}_{34}(\theta_2) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Presun do posledného kĺbu, k_3 , môžeme popísať maticou \mathbf{A}_{45} .

$$\mathbf{A}_{45} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

V kĺbe k_3 dochádza k rotácii okolo osi x o uhol θ_3 , čo popisuje matica $\mathbf{A}_{56}(\theta_3)$.

$$\mathbf{A}_{56}(\theta_3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Z posledného kĺbu sa do koncového bodu X dostaneme presunom, ktorý reprezentuje matica \mathbf{A}_{67} .

$$\mathbf{A}_{67} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Výsledná transformačná matica je násobkom všetkých vyššie uvedených.

$$\mathbf{A}_T(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \mathbf{A}_{01} * \mathbf{A}_{12}(\theta_1) * \mathbf{A}_{23} * \mathbf{A}_{34}(\theta_2) * \mathbf{A}_{45} * \mathbf{A}_{56}(\theta_3) * \mathbf{A}_{67}.$$

Polohu koncového bodu X v karteziánskych súradniciach môžeme určiť priamo z matice $\mathbf{A}_T(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$. Jedná sa o prvky matice \mathbf{A}_T , konkrétne prvky $a_{1,4}$, $a_{2,4}$, $a_{3,4}$. Uhly výslednej orientácie (tzn. rotácia okolo osi x , y a z) odpovedajú priamo uhlom θ_1 , θ_2 , θ_3 .

3.1.1.3 Inverzná kinematická úloha

V tejto časti sa pozrieme na možnosti riešenia inverznej kinematiky.

Inverzná kinematická úloha (ako napovedá už jej pomenovanie) je úlohou opačnou k priamej kinematickej úlohe. Poznáme teda polohu koncového bodu X a hľadáme hodnoty jednotlivých kĺbových súradníc, ktoré nám umožnia sa do tejto polohy dostať.

$$\theta = f(X),$$

kde

θ je vektor kĺbových súradníc θ_1 , θ_2 , θ_3 ;

X je poloha koncového bodu v 6-rozmernom priestore všetkých polôh.

Riešenie inverznej kinematiky v karteziánskych súradniciach vo všeobecnosti nie je jednoduchá úloha, keďže u otvorených kinematických reťazcov pomerne často môže dôjsť k situácii, že má konkrétna úloha nekonečne mnoho riešení. Navyše kĺbové súradnice sú na polohe koncového bodu závislé väčšinou nelineárne cez goniometrické funkcie.

Ako som už vyššie spomínal, môj manipulátor s tromi rotačnými kĺbmi (odpovedajúcimi tromi stupňom voľnosti) nie je schopný zabezpečiť ľubovoľnú polohu a zároveň ľubovoľnú orientáciu v šesťrozmernom priestore všetkých možných polôh; zo šiestich nezávislých parametrov je možné ním ľubovoľne nastaviť len tri (či už polohu v karteziánskych súradniciach alebo náklon v troch osiach). Táto skutočnosť sa značne podpíše aj pod riešenie inverznej kinematickej úlohy. Pre jej zmysluplnú riešiteľnosť je dôležitý charakter údajov o koncovom bode. Zároveň je veľmi dôležité brať do úvahy skutočnosť, že vzhľadom na účel stabilizovanej plošiny je oveľa dôležitejší náklon koncového bodu ako jeho karteziánske súradnice.

Očakávané situácie sú nasledovné:

- sú známe karteziánske súradnice koncového bodu,

- je známa orientácia koncového bodu.

V prvom prípade nie je možné zo znalostí iba karteziánskych súradníc uspokojivo vyriešiť inverznú kinematickú úlohu, tzn. nastaviť požadovanú orientáciu koncového bodu, pretože chýbajú údaje práve o tejto požadovanej orientácii. V druhom prípade je možné inverznú kinematickú úlohu riešiť, dokonca je v tomto prípade pomerne triviálna. K zjednodušeniu dochádza vďaka charakteru výstupných dát použitých senzorov. Prvý senzor, ktorý v mojej práci používam, má výstup, ktorý po matematických úpravách s využitím trigonometrických funkcií odpovedá náklonu v jednotlivých osiach, a teda je možné jednoducho určovať požadované kĺbové súradnice kĺbov k_1 , k_2 , k_3 práve z týchto hodnôt. Rovnako je tomu aj u druhého použitého senzoru. Prevodné vzťahy medzi výstupmi senzorov a náklonmi, rovnako ako aj rozsah a charakter výstupných dát senzorov, uvádzam v nasledujúcom texte, konkrétne v kapitole 3.2.

3.1.2 Pohony

Ponuka výrobkov na trhu modelárskych servomotorov je veľmi bohatá, medzi modely dosahujúce vysokú kvalitu a disponujúce vynikajúcimi parametrami patria výrobky firiem ako napríklad Futaba, Hitec, Graupner a iné. Po starostlivom uvážení a pozornom prieskume trhu som sa na pohon u stabilizovanej sensorovej plošiny rozhodol využiť servomotory od firmy Hitec, model HSR-5990TG (obrázok 3.6), ktoré svojimi vlastnosťami, najmä rýchlosťou, spoľahlivosťou a momentom sily, ktorý sú schopné vyvinúť, najlepšie odpovedajú potrebným požiadavkám. Ide o náhradu serva HSR-5995TG, ktoré som pôvodne plánoval použiť najmä kvôli výborným výsledkom a spoľahlivosti, ktorá sa prejavila napríklad aj v projekte robota Spejbla. Keďže sa však už model HSR-5995TG nevyrába, bol som nútený nájsť náhradu. Rovnako ako u jeho predchodcu, aj u modelu HSR-5990TG sa jedná o vodotesný a prachu odolný digitálny servomotor s dvojitými titánovými guľôčkovými ložiskami a programovateľným digitálnym zesilňovačom. Tento navyše disponuje hliníkovým puzdrom, ktoré pomáha efektívnejšie chladiť použitú technológiu a predchádza tak prehrievaniu, zvyšuje spoľahlivosť a predlžuje životnosť. Podobne ako všetky digitálne servomotory, aj model HSR-5990TG je riadený PWM pulzmi. Neutrálnej polohe odpovedá šírka pulzu $1500\mu\text{s}$, plný rozsah rotácie pokrýva šírka pulzu $600 - 2400\mu\text{s}$.

Dôležité parametre servomotora HSR-5990TG:

- rozmery: $40 \times 20 \times 37$ mm ($1,57'' \times 0,78'' \times 1,45''$)



Obrázok 3.6: Použitý servomotor, HSR-5990TG.

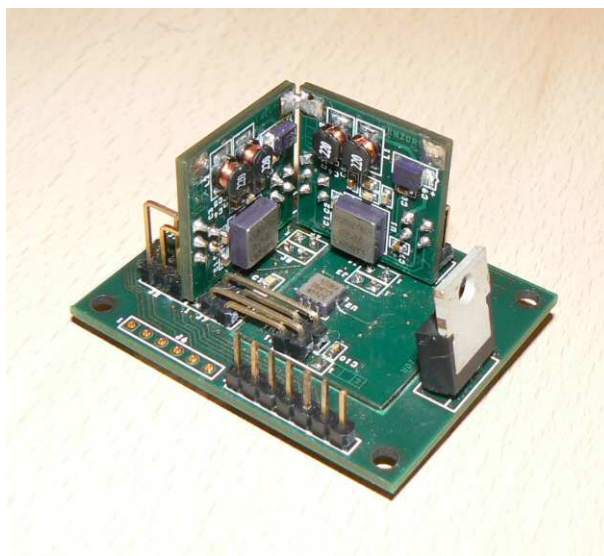
- hmotnosť: 68,00 g
- napájanie: 6,0 – 7,4 V
- krútiaci moment: 24 / 30 kg.cm (6 V/7,4 V)
- maximálna rýchlosť: 0,17 s / 60° (6,0 V) / 0,14 s / 60° (7,4 V)
- statický moment: 24,0 kg.cm (6,0 V) / 30,0 kg.cm (7,4 V)
- rozsah: max. 180°

3.2 Senzorový systém

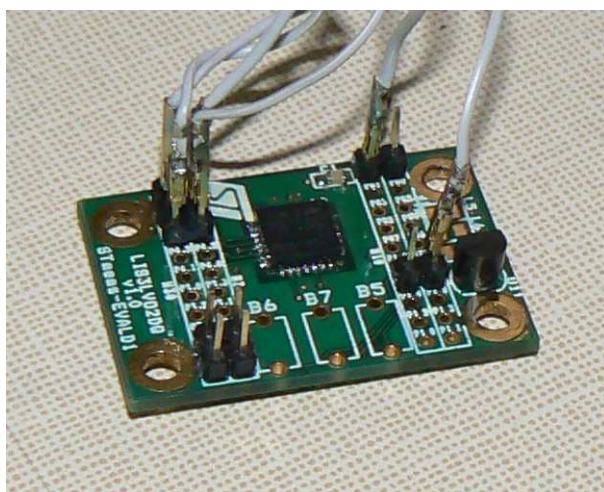
Úlohou oboch senzorových subsystémov je dodávať vstupné informácie, ktoré sa ďalej spracúvajú v regulačnej slučke za účelom riadenia polohy jednotlivých servomotorov. V mojej bakalárskej práci som použil dva rôzne senzorové systémy:

1. senzorový subsystém quadrotoru (obrázok 3.7)
2. inerciálny senzor LIS3LV02DQ (obrázok 3.8)

Prvá koncepcia bola vyvinutá Ing. Janom Marečkom pre potreby diplomovej práce *Experimentální létající stroj – orientace v prostoru*. Vďaka jej otvorenosti bola táto



Obrázok 3.7: Senzorový subsystém quadrotoru



Obrázok 3.8: Inerciálny senzor LIS3LV02DQ

konceptia úspešne použitá aj v inej diplomovej práci (Müller, M. *Vzducholod' – orientace v prostoru*). U druhého použitého senzoru sa jedná o sériovo vyrábaný akcelerometer s výrobným označením LIS3LV02DQ. Na nasledujúcich stranách popíšem črty oboch použitých senzorov.

3.2.1 Senzorový subsystém quadrotoru

Nasleduje popis vlastností, ktoré sú dôležité pre môj problém. Podrobnejšie je problematika vývoja a stavby tohto senzorového systému popísaná v diplomovej práci J. Marečka *Experimentální létající stroj – orientace v prostoru*.

3.2.1.1 Základný popis

Technológie MEMS (mikro elektro-mechanické systémy)

Ako najvhodnejšie na danú úlohu sa javia integrované inerciálne senzory s technológiou MEMS. Je využitá technológia mechanických prvkov leptaných v kremíkovom substráte, čím je možné realizovať veľmi malé inerciálne senzory priamo v čipe. Medzi ich nesporné výhody patria veľkosť, minimálna hmotnosť a spotreba, dali by sa však nájsť aj nedostatky, najmä teplotný a časový drift výstupnej hodnoty i parametrov súčiastky typický pre túto technológiu.

Akcelometre

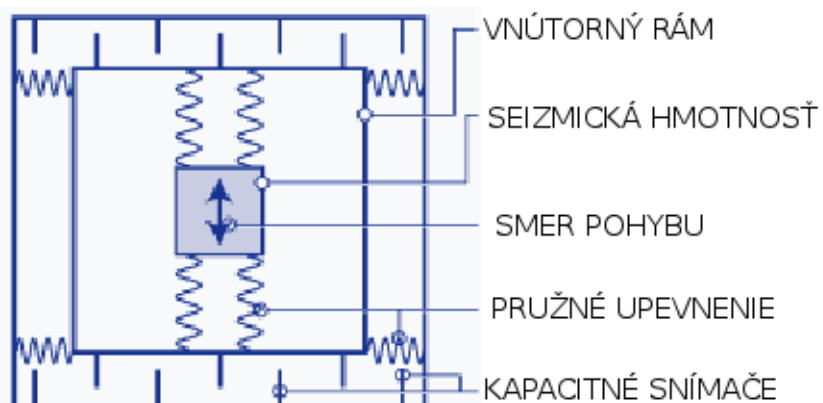
Použité MEMS akcelometre pracujú na princípe merania výchylky pružne uloženého telieska (tzv. seizmickej hmotnosti) voči telu súčiastky. Táto výchylka sa mení pôsobením zrýchlenia, čo sa meria kapacitným spôsobom.

Gyroskopy

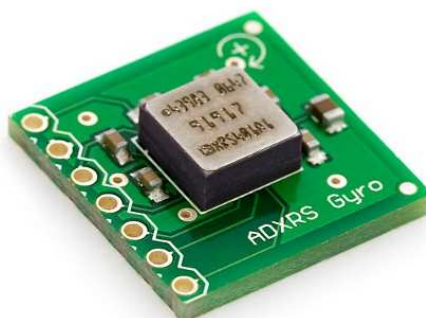
MEMS gyroskopy využívajú princíp merania Coriolisovho zrýchlenia. Hmotné teliesko je pružne upevnené a dochádza k jeho rozkmitávaniu tak, aby konalo priamočiary pohyb. Ak nastane rotácia sústavy v rovine tohto pohybu, Coriolisovo zrýchlenie začne pôsobiť na hmotu a vychyľovať ju z neutrálnej polohy v smere kolmom na kmitavý pohyb telieska. Táto výchylka, podobne ako je tomu u akcelometrov, je následne meraná kapacitne. Schématicky je tento princíp popísaný na obrázku 3.9. Tento spôsob merania poskytuje veľmi dobré výsledky, avšak použitie technológie MEMS má za následok o niečo vyšší časový a teplotný drift.

Realizácia inerciálnej jednotky

Ako gyroskop je použitý typ ADXRS150, znázornený na obrázku 3.10 (zdroj obrázku: <http://www.watterott.com>). Ide o jednoosový senzor uhlovej rýchlosti s rozsahom $\pm 150^\circ/\text{s}$ s analogovým výstupom 0 – 5 V a integrovaným teplotným sensorom tiež s analogovým výstupom 0 – 5 V, ktorý je možné využiť pre teplotnú kompenzáciu.



Obrázok 3.9: Princíp merania Coriolisovho zrýchlenia



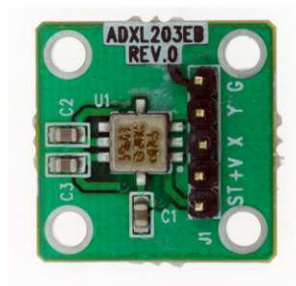
Obrázok 3.10: Gyroskop ADXR5150.

ADXR5150 základné údaje:

- počet ôs merania 1
- rozsah merania $\pm 150^\circ/\text{s}$
- citlivosť $12,5 \pm 10\% \text{mV}/^\circ/\text{s}$
- max. šírka pásma 2 kHz
- šumová hustota $0,05^\circ/\text{s}/\text{rtHz}$
- nelinearita 0,1% z rozsahu

- napájanie 4,75 – 5,25 V, odber 6 mA

Akcelometry, ktoré merajú translačné zrýchlenie, sú typu ADXL203 (obrázok 3.11, zdroj: <http://media.digikey.com>). Ide o dvojosý typ, takže sa získava 6 hodnôt, čo je redundantná informácia, ktorú je možné využiť pre spresnenie merania. Meranosnou veličinou je napätie v rozsahu 0 – 5 V, ktoré je spracované v module prevodníka.



Obrázok 3.11: Akcelerometer ADXL203.

ADXL203 základné údaje:

- počet ôs merania 2
- rozsah merania $\pm 1,7g$
- citlivosť 1000 %mV/g
- max. šírka pásma 2,5 kHz
- šumová hustota 110ug/rtHz
- nelinearita 4 %
- napájanie 3 – 6 V, odber 0,7 mA

Podrobné údaje sú uvedené v katalógových listoch na stránkach výrobcu Analog Devices.

3.2.2 Akcelerometer LIS3LV02DQ

Akcelerometer LIS3LV02DQ je druhým senzorm, ktorý získava informácie o zrýchlení v danej ose (x , y , z) a následne poskytuje informácie využité pri riadení jednotlivých

servomotorov. Vybral som ho kvôli jeho dostupnosti, pretože bolo možné sa k nemu jednoducho dostať na katedre K335, keďže v projekte, kde bolo pôvodne zamýšľané jeho použitie, sa nakoniec nepoužil, pretože jeho výstupné data nenašli uplatnenie. Veľkou výhodou a dôležitým faktorom, hovoriacim v jeho prospech, je jeho veľkosť, ktorá je zanedbateľná oproti konštrukcii stabilizovanej sensorovej plošiny. Nakoľko stabilizovaná sensorová plošina bude napájaná z batérií, vítanou je aj možnosť používať senzor v úspornom režime s nižšou spotrebou.

3.2.2.1 Popis senzora

LIS3LV02DQ je trojosý lineárny akcelerometer s digitálnym výstupom vyrobený MEMS technológiou. Obsahuje sensorovú časť a takisto aj rozhranie, určené pre komunikáciu sensorovej časti s riadiacim mikroprocesorom. Komunikáciu je možné realizovať buď po zbernici I²C alebo SPI. Užívateľ môže u senzoru LIS3LV02DQ ľubovoľne meniť rozsah $\pm 2g$ alebo $\pm 6g$ a môže týmto senzorom merať zrýchlenie v šírke pásma 640 Hz pre všetky tri osy. Model LIS3LV02DQ umožňuje upraviť šírku pásma podľa využitia v konkrétnej aplikácii, zároveň disponuje funkciou „self-test“, podľa ktorej môže užívateľ jednoducho zistiť funkčnosť systému. Medzi ďalšie užitočné funkcie patrí generovanie inerciálneho „wake-up“ alebo „free-fall“ signálu, ku ktorému dôjde, keď je prekročená nastavená hranica zrýchlenia v jednej alebo viacerých z troch ôs akcelerometra. Vďaka kvalitnému SMD puzdru sa teplotný rozsah jeho využitia pohybuje v rozmedzí od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Vďaka svojim vlastnostiam je možné využiť senzor LIS3LV02DQ v rozličných aplikáciách, ako napríklad detekcia voľného pádu, zabezpečovacie systémy, inerciálna navigácia a mnohé iné.

3.2.3 Výpočet uhlov náklonu a spracovanie dát

Podľa diplomovej práce J. Marečka (Mareček, 2008) môžeme použiť na zistenie uhlu náklonu z výstupných dát senzoru jednu z dvoch nasledujúcich metód:

- rozklad tiažového zrýchlenia na zložky
- integrácia zmeranej uhlovej rýchlosti

U oboch metód pozorujeme výhody, ale aj nevýhody. Nesporne kladnou a veľmi výhodnou vlastnosťou rozkladu gravitačného zrýchlenia na jednotlivé zložky je možnosť získavať okamžité absolútne hodnoty uhlov. U integrácie nameranej uhlovej rýchlosti je

tomu trochu inak, táto metóda dáva výsledok relatívny vzhľadom k časovému počiatku integrácie. U integrácie uhlovej rýchlosti však na rozdiel od prvej metódy dosť úspešne dochádza k potlačeniu rušivých vplyvov ako rôzny šum z okolia a podobne, keďže integrácia pôsobí ako filter typu dolná priepusť. Rozklad tiažového zrýchlenia tento problém nerieši, a tak je potrebné zarušený signál z akcelerometra následne upravovať a filtrovať. Na to je vhodné použiť napríklad priemerovanie nameraných hodnôt, dobré výsledky sa dajú dosiahnuť pri využití Kalmanovho filtra (Mareček, 2008).

Metóda rozkladu tiažového zrýchlenia na zložky

Vychádza z merania zložiek tiažového zrýchlenia v troch osiach, ktoré sú na seba navzájom kolmé. Dôležitým je predpoklad, že na teleso nepôsobia okrem gravitačnej žiadne iné sily, resp. že ich časové pôsobenie na jednotku inercie je zanedbateľné oproti stavu pokoja.

Je možné určiť uhly, ktoré zvierajú jednotlivé na seba navzájom kolmé zložky s tiažovým zrýchlením (pôsobí zvislo nadol), a to nasledujúcim spôsobom.

$$\alpha = \arctan \frac{a_Z}{a_Y}$$

$$\beta = \arctan \frac{a_Z}{-a_X}$$

$$\gamma = \arctan \frac{a_Y}{a_Z}$$

Vypočítané uhly majú rozmery v radiánoch [rad].

Metóda integrácie uhlovej rýchlosti

Za predpokladu, že meranie uhlovej rýchlosti realizujeme s počiatkom v čase nula, uhol v čase t jednoducho vypočítame integráciou uhlovej rýchlosti:

$$\phi = \int_0^t \omega d\tau$$

Výsledky sú rovnako rozmerovo v radiánoch.

3.3 Riadiaci systém

3.3.1 HW riešenie

Po zhodnotení vlastností dostupných riadiacich dosiek som sa rozhodol využiť dosku LPC-Eurobot.

3.3.1.1 Doska LPC2119

Doska LPC2119 (na obrázku 3.12 spolu s rozširujúcou doskou ebBoard) je založená na 32-bitovej architektúre ARM7TDMI-S CPU s real-time emuláciou a spolu s vysokorýchlostnou pamäťou flash. Obsahuje procesor s jadrom ARM7 od firmy Philips (dnes NXP), budiče zbernice CAN, prevodník z USB na RS-232 pre programovanie pri použití USB, informačné LED a vývod všetkých pozícií rozhrania GPIO na rozširujúce konektory. Táto doska je koncipovaná tak, aby mohla byť použitá samostatne, bez ďalšej podpornej elektroniky. Riadenie motorov a komunikáciu s externými senzormi zabezpečuje rozširujúca doska ebBoard (schéma zapojenia - príloha B). Z môjho pohľadu najdôležitejšia je prítomnosť budiča pre tri modelárske servomotory a rozširujúce rozhranie, realizujúce komunikáciu po zbernici SPI (posielanie dát zo senzoru). Z tohto dôvodu som sa rozhodol uprednostniť túto dosku pred doskou mikropočítača SPEJBL-ARM. Pôvodne bola doska LPC2119 vyvinutá pre potreby súťaže Eurobot, kde sa plne overila jej funkčnosť.

3.3.1.2 Komunikácia so sensorovým systémom

Pri komunikácii so sensorovým systémom bola využitá sériová linka. Táto disponuje v porovnaní s paralelnou zbernicou mnohými výhodami, napríklad:

- nižšia cena použitých komponentov
- jednoduchší dizajn
- kompaktnéjšie prevedenie
- typicky nižšia spotreba energie.

Cenou za tieto výhody je nižšia prenosová rýchlosť než u paralelnej zbernice. U sériovej zbernice nachádzame totiž len jeden vodič, ktorý prenáša dáta do a/alebo zo zariadenia. V niektorých prípadoch plní jeden signál funkciu prenosu dát do zariadenia a iný signál zasa slúži na prenos dát zo zariadenia. Oproti tomu u paralelnej zbernice sa mnohé signály súčasne starajú o prenosy dát oboma smermi.



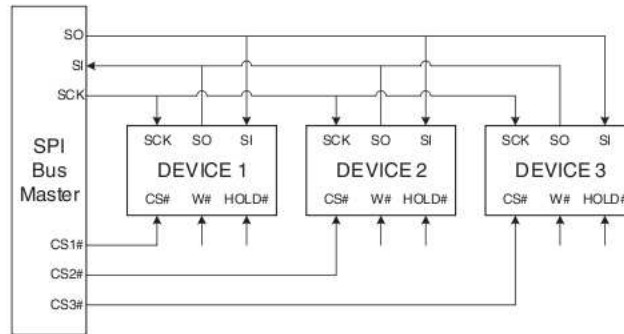
Obrázok 3.12: Doska LPC2119 s rozširujúcou doskou ebBoard.

Pri zavádzaní sériovej zbernice máme na výber dve možnosti:

1. zbernica SPI
2. zbernica I²C

Pri realizácii stabilizovanej sensorovej plošiny som sa priklonil k SPI zbernici (Serial Peripheral Interface). Táto zbernica dovoľuje full-duplexný prenos dát, čo bolo jednou z hlavných výhod, pre ktoré som sa rozhodol využiť práve SPI. Obvykle jedno zariadenie je typu master, všetky ostatné SPI zariadenia sú slave. Názorne schému SPI zbernice vysvetľuje obrázok 3.13.

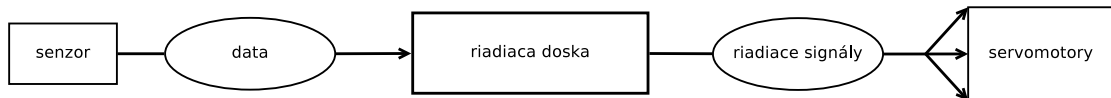
U stabilizovanej sensorovej plošiny využívam komunikáciu len s jedným zariadením typu slave, keďže v jednom okamihu predpokladám pripojený iba jeden senzor.



Obrázok 3.13: Zbernica SPI

3.3.2 SW riešenie

Pochopiť SW stránku problému pomôže nasledovná zjednodušená bloková schéma systému (obrázok 3.14).



Obrázok 3.14: Bloková schéma spracovania dát.

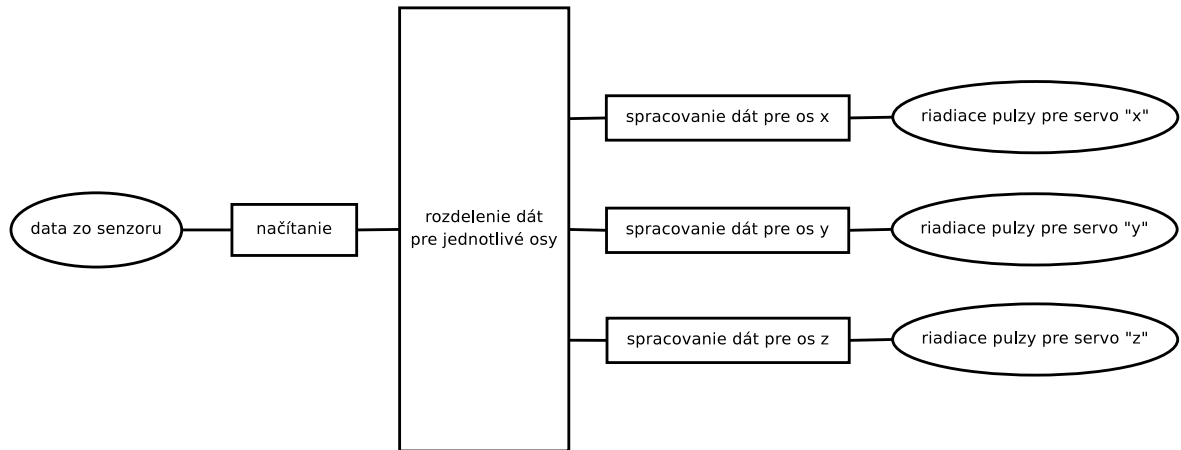
V nekonečnej smyčke bežiaci program najprv načíta data zo senzoru a následne ich podľa algoritmu spracovania dát prevedie na riadiace signály, ktorými sa riadia jednotlivé servomotory. Riadiaci algoritmus zobrazuje schéma na obr. 3.15.

Algoritmus sa skladá z blokov:

- načítanie,
- rozdelenie dát pre jednotlivé osy
- osobitné spracovanie dát pre každú z ôs

V bloku *načítania* dochádza k zálohe predchádzajúcej hodnoty, prijatiu dát zo senzora a (v prípade, že došlo k chybnému načítaniu dát mimo možný rozsah) k nahradeniu načítanej hodnoty (využíva sa zálohovaná predchádzajúca hodnota).

Blok *rozdelenie dát* rozdeľuje data zo senzoru tak, aby bolo možné spracovať následne data pre každú os osobitne. Tento krok je ľahko pochopiteľný, keďže každé servo je



Obrázok 3.15: Schéma riadiaceho algoritmu.

potreba riadiť osobitne a servomotory nemajú ani rovnaký rozsah rotácie.

Tretí a posledný blok *osobitného spracovania dát* zahŕňa samotný proces vytvorenia PWM pulzov z výstupných údajov senzoru. Vychádza z inverznej kinematiky, ktorá už bola v tejto kapitole načrtnutá. V prvom rade je potrebné previesť uhly získané z akcelerometrov z radiánov na stupne. To je realizované nasledujúcou jednoduchou matematickou inštrukciou:

$$g = r * 360/2\pi$$

Týmto sa údaj r , ktoré je v radiánoch, transformuje na hodnotu g v stupňoch. Následne sa využíva naimplementovaná funkcia *servo*, ktorá prevádza informácie o náklone na požadované riadiace pulzy posielené do jednotlivých servomotorov. Keďže táto funkcia (detailnejšie popísané v nasledujúcom texte) má ako vstupný parameter hodnotu v rozsahu $0 - 461$ (hodnota 0 odpovedá náklonu -90° , hodnota 461 reprezentuje náklon $+90^\circ$), je potrebné ďalšie medzispracovanie. To prebieha podľa nasledujúceho vzťahu:

$$n = (g + 90)/0.39.$$

Takto získaná hodnota n presne odpovedá vstupnému parametru funkcie *servo* a predstavuje jednotlivé polohy servomotorov.

Okrem týchto blokov obsahuje navrhnutý software aj funkcie na inicializáciu servomotorov a SPI zbernice, funkcie umožňujúce posielenie dát po SPI zbernici a iné. Kompletný

zdrojový kód všetkých programových súčastí je možné nájsť v prílohe.

3.3.2.1 Inverzná kinematika

Ako už bolo vyššie spomenuté, inverzná kinematická úloha je vďaka charakteru dát zo senzora a špecifikácii celej stabilizovanej plošiny pomerne jednoduchá a dalo by sa povedať, že náklony plošiny ako celku okolo jednotlivých osí priamo odpovedajú požadovaným korekčným náklonom servomotorov.

3.3.2.2 Regulácia pohonov

Regulácia pohonov je primeraná zložitosti inverznej kinematickej úlohy, ktorej riešenie už bolo popísané. Ako regulátor je použitý jednoduchý regulátor typu P. Rozhodol som sa využiť typ regulátora z nasledujúcich dôvodov: pomocou neho je možné túto sústavu uspokojivo regulovať a zároveň vďaka svojej jednoduchosti kladie minimálne nároky na zložitosť použitého riadiaceho software.

Servopohony sú riadené PWM pulzmi. Funkcia, ktorá má za úlohu nastavovať polohu jednotlivých serv, má dva vstupné parametre, a to:

- poradové číslo servomotoru,
- n - vstupné číslo odpovedajúce šírke pulzu (s).

Poradové číslo servomotoru identifikuje jednoznačne každý z použitých servomotorov. Jedná sa o číslo z trojice 0, 1, 2.

Druhým parametrom je n , vstupné číslo odpovedajúce šírke pulzu (s). Ide o celé číslo v rozmedzí 0 – 461. Prevod medzi týmto číslom n a šírkou pulzu s (rozsah 600 – 2400 μs) je lineárny a je ľahko realizovateľný podľa nasledujúcej rovnice:

$$s = 3,906 n.$$

Rozmedzie n pokrýva celú šírku pulzu s , a teda sa veľmi vhodne a presne zhoduje s celým rotačným rozsahom jednotlivých servomotorov.

Zdrojové kódy funkcie nastavujúcej polohy servomotorov prikladám v prílohe.

3.3.3 Dynamika stabilizovanej sensorovej plošiny

Po početných praktických skúškach som dospel k záveru, že dynamika vyššieho celku (či už sa jedná o quadrotor alebo vzducholod') nebud mať žiaden negatívny vplyv na

dynamiku stabilizovanej sensorovej plošiny. V tomto ma utvrdilo zistenie, že servomotory na stabilizovanej sensorovej plošiny majú časové konštanty rozmerovo oveľa menšie ako sú konštanty vyššieho celku a sú teda schopné reagovať rýchlejšie. Zároveň som spozoroval zaujímavú skutočnosť: hmotnosť záťaže, ktorou je plošina zaťažovaná, má vplyv na prúdový odber servomotorov a s narastajúcou záťažou sa zvyšujú aj nároky na zdroj zásobujúci servomotory. Tento fakt je spomenutý aj v nasledujúcej podkapitole.

3.4 Spolupráca s nadriadeným systémom mobilného robota

Stabilizovaná sensorová plošina je koncipovaná tak, aby bolo možné ju začleniť do vyššieho celku ako jeho súčasť.

3.4.1 Variantné riešenie stabilizovanej plošiny

Štruktúra samotnej plošiny sa spolu s riadiacim algoritmom prispôsobuje cieľovému uplatneniu, teda buď koncepcii quadrotora alebo koncepcii vzducholode.

3.4.1.1 Quadrotor

U quadrotoru ostáva celá štruktúra nezmenená oproti vyššie popísanej a je teda úplne totožná s riešením, ktoré som načrtol na predchádzajúcich stranách.

3.4.1.2 Vzducholod'

U vzducholode dochádza k pár zmenám:

Nakoľko vzducholod' má vzhľadom ku svojej konštrukcii má preferovaný smer letu (prevou vpred), odpadá potreba korekcie náklonu okolo osi z . Z tohto dôvodu nie je nutné používať tri motory, preto varianta pre vzducholod' zahŕňa len dva servomotory. Toto usporiadanie považujem za úplne postačujúce (pozri prvú kapitolu). Keďže odpadá servomotor, ktorý koriguje náklon okolo osi z , je samozrejme potrebné upraviť aj riadiaci algoritmus, a to vylúčiť časť, v ktorej dochádza k riadeniu tohto motora.

3.4.2 Spolupráca v distribuovanom systéme

Keďže stabilizovaná senzorová plošina je plánovaná ako súčasť väčšieho celku (či už sa jedná o vzducholod' alebo quadrotor), je potreba zabezpečiť u tohto vyššieho celku nevyhnutnú technickú podporu. Medzi základné požiadavky, ktoré sa týkajú funkčnosti stabilizovanej senzorovej plošiny ako takej, môžeme považovať:

- napájanie riadiacej dosky,
- napájanie servomotorov,
- komunikácia so senzorickým subsystémom, resp. sprostredkovanie dát z neho.

3.4.2.1 Napájanie riadiacej dosky

Napájanie riadiacej dosky môže byť realizované dvoma spôsobmi:

1. napájanie cez USB port (veľmi výhodné využitie najmä v prípade prepojenia so stolným PC prípadne notebookom; využívané počas celého vývoja tejto práce),
2. externé napájanie (príloha B - schéma zapojenia rozširujúcej dosky ebBoard).

V prípade použitia prvého spôsobu napájania je veľmi vítaná možnosť posielat' zároveň cez USB port data zo senzorického subsystému na ďalšie spracovanie v riadiacom algoritme. U druhého spôsobu napájania je (vychádzajúc z dokumentácie riadiacej dosky LPC2119) požadovaný jednosmerný zdroj napätia 5 V, dodávaný prúd 100 mA.

3.4.2.2 Napájanie servomotorov

Podľa výrobcu je možné servo HSR-5990TG napájať na dva úrovne napätia. Napájacie napätie sa prejaví na rýchlosti, ktorú je servomotor schopný vyvinúť. Pri napájaní na 6.0 V dosahuje servomotor rýchlosť 0.17 sec/60°, u napájania na 7.4 V je možné dosiahnuť rýchlosť 0.14 sec/60°. Keďže jednou zo základných požiadavok, ktoré sú kladené na stabilizovanú senzorovú plošinu, je čo najrýchlejšia odozva, odporúčam použiť jednosmerné napájanie s amplitúdou 7.4 V.

Čo sa týka tvrdosti zdroja, na základe opakovaných experimentov som dospel k zisteniu, že použitý zdroj by mal byť pri troch zapojených servomotoroch schopný dodávať prúd až do 1.7 – 2.5 A. V takýchto hodnotách sa totiž pohybujú maximálne odoberané špičky prúdu pri rozbehoch servomotorov. V prípade nedodržania tejto podmienky sa môže stať, že niektorý (prípadne viac) zo servomotorov nebude spoľahlivo reagovať na riadiace pulzy.

3.4.2.3 Komunikácia so senzorickým subsystémom

Je možné počítať s rôznymi spôsobmi posielania dát. U *vzducholode*, kde podľa predpokladu bude senzorický subsystém, ktorý využíva aj stabilizovaná senzorová plošina, vyhradený primárne pre ňu, odporúčam využiť komunikáciu po SPI zbernici, ktorú som načrtol vyššie. Zároveň je možné využiť zároveň aj už vyvinutý software. U *quadrotoru* je primárnou úlohou senzorického subsystému poskytovať údaje, ktoré sa po spracovaní v riadiacej doske quadrotoru použijú na riadenie samotného quadrotoru. V tomto prípade samozrejme tiež prichádza do úvahy možnosť preposielania surových dát zo senzorického subsystému do riadiacej dosky stabilizovanej sensorovej plošiny. V prípade, že už tieto data budú spracované, tzn. budú odpovedať priamo rotáciám okolo jednotlivých osí, je možno vhodnejšie použiť na posielanie USB rozhranie, prípadne inú rýchlu zbernicu a modifikovať zároveň aj software.

Kapitola 4

Záver

Výsledkom tejto bakalárskej práce je komplexne navrhnutý a realizovaný funkčný systém stabilizovanej sensorovej plošiny. Tento systém bol vyskúšaný v praxi a bola overená jeho spoľahlivosť ako celku. V záujme prehľadnosti sú jednotlivé súčasti okomentované samostatne.

4.1 Servomotory

Po rozsiahlej analýze trhu boli vybraté servomotory, ktoré najlepšie odpovedajú požiadavkám kladeným na výslednú sústavu (rýchlosť, dodávaný moment sily). Jedná sa o servomotory od firmy HITEC, model HSR-5990TG.

4.2 Mechanická konštrukcia

Zároveň so servomotormi prebehol aj výber mechanickej konštrukcie, ktorá upevňuje servomotory v požadovaných polohách a dodáva výsledný vzhľad celej sústave. Nakoľko neboli využité všetky zakúpené diely mechanickej konštrukcie, je možné zvyšné diely použiť ako náhradné.

4.3 Riadiaca doska

Potrebnú pozornosť som venoval aj výberu riadiacej dosky. Využívam dosku LPC2119-Eurobot. Exemplár použitý vo výslednom systéme je už druhým v poradí, pretože počas vývoja mojej bakalárskej práce došlo nedopatrením k zničeniu pôvodného procesora. Tento nezdar na určitú dobu pozdržal práce na riešení stabilizovanej sensorovej plošiny. Riadiacu dosku, ktorú v čase dokončenia plošiny používam (rovnako ako prvú), mi poskytol bc. Jiří Kubias, za čo mu patrí moja vďaka. K dispozícii ponúkam aj náhradnú dosku, ktorou je možno v prípade potreby plne nahradiť súčasne používanú.

4.4 Software

Podarilo sa mi vyvinúť software, ktorý zabezpečuje nezávislé riadenie každého z použitých servomotorov (zdrojový kód príkladám v prílohe). Tento riadiaci algoritmus bol úspešne vyskúšaný v praxi, kde sa plne overila jeho funkčnosť. Na základe početných skúšok som empiricky stanovil hodnoty napájania potrebné pre spoľahlivú funkčnosť jednotlivých servomotorov.

Súčasťou riadiaceho algoritmu je takisto software, ktorý zabezpečuje komunikáciu so sensorovým systémom a zároveň sa podieľa na spracovaní dát zo senzora. Predpokladám spoľahlivosť tohoto programu, vzhľadom k nefunkčnosti použitého senzora však nebolo možné overiť jeho správanie. Keďže z časových a technických dôvodov nebolo možné tento senzor nahradiť iným, ako riešenie tohto problému používam v riadiacom algoritme funkciu, ktorá má na výstupe náhodnú postupnosť čísel. Týmto simulujem data zo sensorického systému, nakoľko aj tieto data majú úplne náhodný charakter (podľa vonkajších okolností). Z tohto dôvodu považujem mnou použité riešenie za veľmi vhodné a najlepšie možné.

Kapitola 5

Zhrnutie

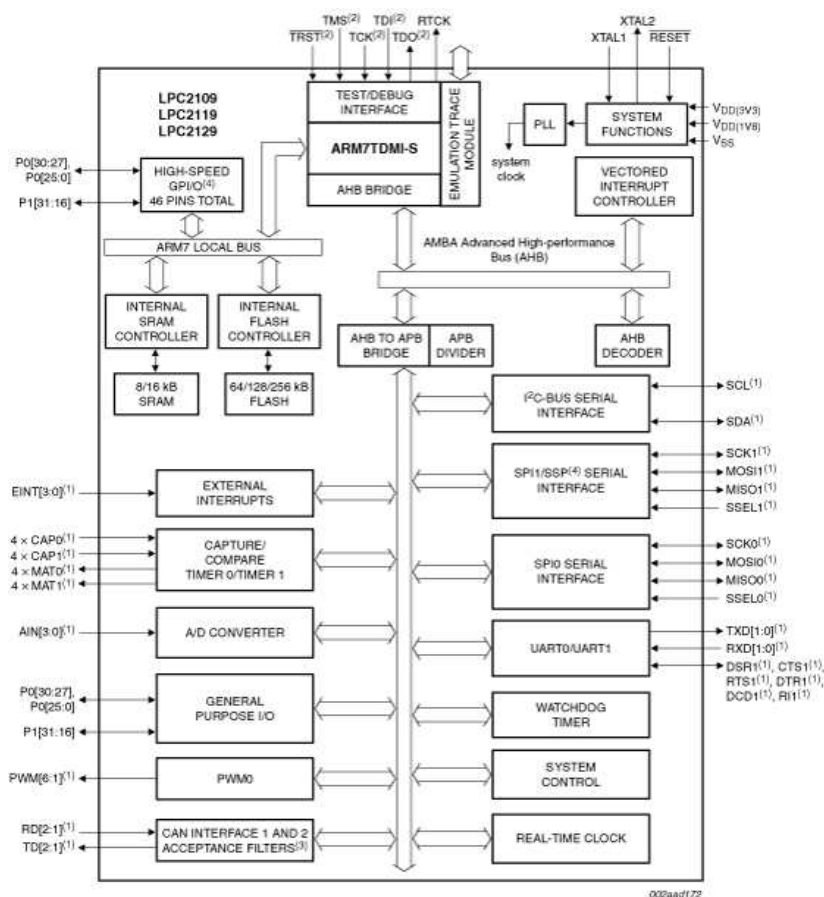
V rámci práce je pripravený potrebný hardware (riadiacu dosku a samotnú mechanickú konštrukciu) a riadiaci algoritmus (predstavuje kompletne programové riešenie od načítania údajov zo senzoru cez spracovanie týchto údajov až po samotné riadenie servomotorov). Výsledná sústava je teda schopná v závislosti na výstupných údajov sensorového subsystému korigovať náklony v jednotlivých osiach a tým zabezpečiť požadovanú polohu koncového bodu - plošiny. V záujme zlepšenia funkčnosti sensorovej plošiny navrhujeme analyzovať problém so sensorickým subsystémom a nájsť vhodné riešenie, prípadne realizovať iný subsystém. Keďže sa plánuje využitie stabilizovanej sensorovej plošiny ako súčasť vyššieho celku (či už vzducholode alebo quadrotoru), je potrebné zabezpečiť u tohto výsledného celku potrebnú technickú podporu a komunikáciu. Ďalšie možnosti rozšírenia a vylepšenia tohoto systému sa nachádzajú hlavne v oblasti hlbšej analýzy možných spôsobov riadenia, prípadne využitia iného typu regulátora (PI, PID).

Literatúra

- Doskočil, E. (2006), *Zařízení pro inerciální navigaci*, Bakalárska práca.
- Herout, P. (2004), *Učebnice jazyka C*, České Budějovice: KOPP.
- Herout, P. (2007), *Učebnice jazyka C – 2. díl*, České Budějovice: KOPP.
- Karger, A.; Kargerová, M. (2000), *Základy robotiky a prostorové informatiky*, Praha: ČVUT.
- Mareček, J. (2008), *Experimentální létající stroj - orientace v prostoru*, Diplomová práca.
- Repák, T. (2005), *Trojosé manipulátory*, Diplomová práca.
- Rumíšek, P. (2003), 'Automatizace (roboty a manipulátory)', http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/mechanizace_a_automatizace__roboty__rumisek.pdf.
- Sedláček, V. (2007), *Průmyslový robot RSP01 – základní řízení*, Bakalárska práca.
- Smutný, V. (2008), *Robotika (přednášky)*.
- Váňa, V. (2009), *ARM pro začátečníky*, BEN - technická literatura.
- Wagner, F. (1994), *Technika a programování robotů*.
- Šiška, M. (2007), *Průmyslový robot RSP01 – nadřazené řízení*, Bakalárska práca.

Príloha A

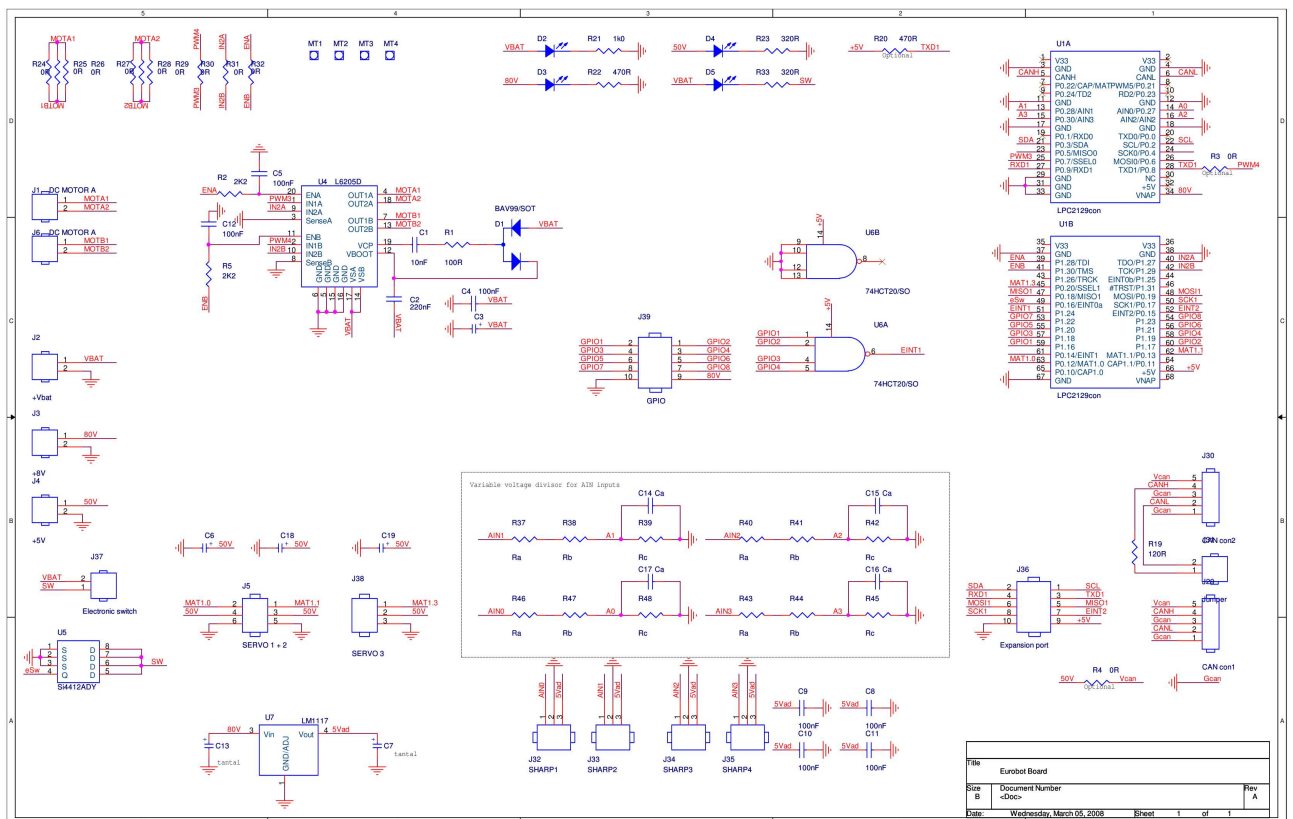
Riadiaca doska LPC2119 - bloková schéma



Obrázok A.1: Riadiaca doska LPC2119 - bloková schéma.

Príloha B

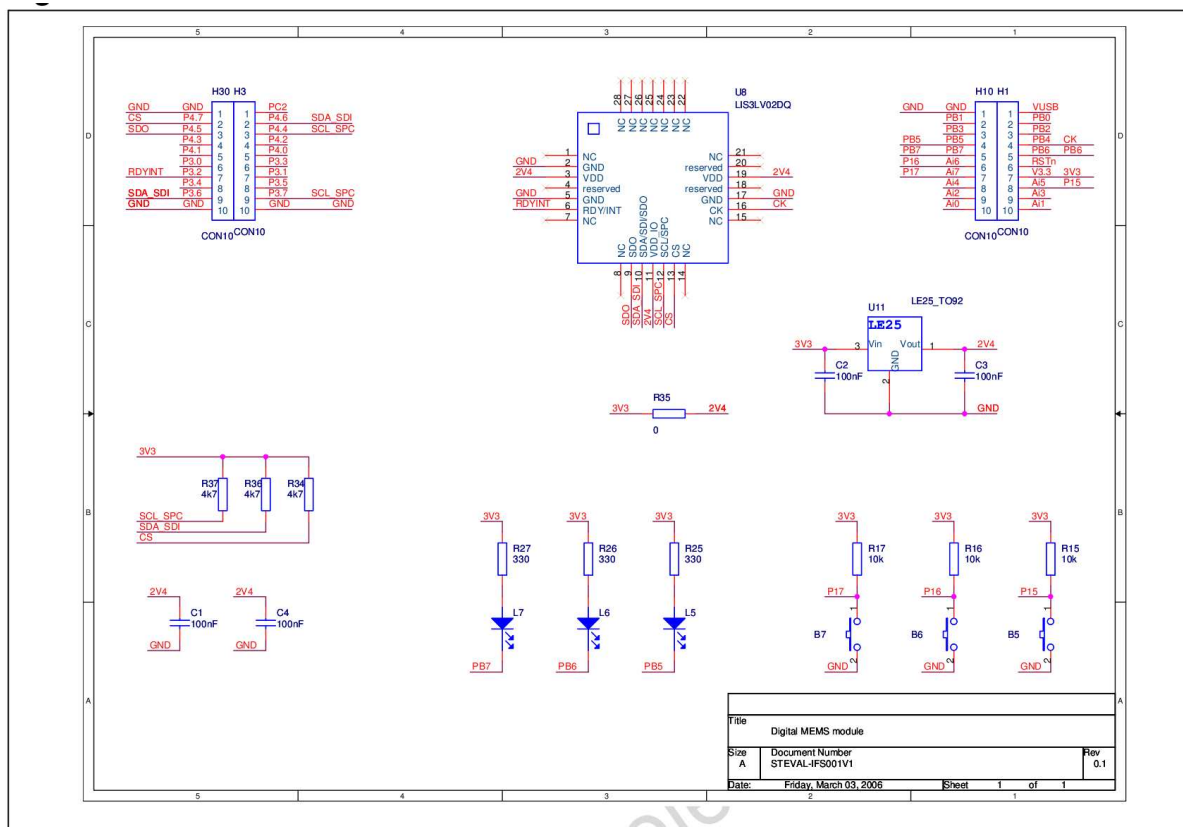
Rozširujúca doska ebBoard - schéma zapojenia



Obrázok B.1: Rozširujúca doska ebBoard - schéma zapojenia.

Príloha C

Akcelerometer LIS3LV02DQ- schéma zapojenia



Obrázok C.1: Akcelerometer LIS3LV02DQ- schéma zapojenia.

Príloha D

Obsah priloženého CD

K tejto práci je priložené CD, na ktorom sú uložené:

- zdrojové kódy (zložka Software)
- katalógové listy a dokumentácia (zložka Datasheets)
- samotný text tejto bakalárskej práce vo formáte PDF (zložka BP)