



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU DVOUKOLÉHO MOBILNÍHO ROBOTU

DESIGN OF CONTROL SYSTEM OF TWO-WHEEL MOBILE ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÍT ROBENEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL HOUŠKA, PH.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vít Robenek

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

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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

Návrh řídicího systému dvoukolého mobilního robotu

v anglickém jazyce:

Design of control system of two wheels mobile robot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na návrh řízení dvoukolového mobilního robotu. Převážně se jedná o řešení problematiky stabilizace inverzního kyvadla. Výchozími znalostmi jsou realizované analýzy chování dvoukolového robotu, s jejichž použitím bude navrženo řízení laboratorního modelu robotu Pierot.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s modelem dvoukolového robotu v laboratoři UAI
2. Seznamte se možnostmi řízení pohybu tohoto typu robotů
3. Navrhněte senzorickou soustavu nutnou pro řízení pohybu robotu
4. Navrhněte řízení robotu
5. Navržené řízení realizujte v prostředí NI LabVIEW a ověřte

Seznam odborné literatury:

- [1] Fridrichovský J.: MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ MECHATRONICKÝCH SOUSTAV V SOLIDWORKS A NI LABVIEW, diplomová práce, Brno 2009, dostupné z URL:<www.vutbr.cz>
- [2] Siciliano B.: Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer-Verlag, London 2009, e-ISBN 978-1-84628-642-1
- [3] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
- [4] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [5] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], June 2009, 371057G-01, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

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

V Brně, dne 28.2.2012

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je návrh řídicího systému dvoukolého mobilního robotu a následná realizace tohoto systému pomocí dostupných senzorických prostředků a platformy Single-Board RIO firmy National Instruments.

V úvodu je obecně nastíněna problematika dvoukolých mobilních robotů coby inverzních kyvadel, následuje přehled několika existujících řešení tohoto problému. Dále je popsán konkrétní robot včetně popisu jeho jednotlivých částí a matematického modelu. Následuje hlavní část práce, a to návrh senzorického a řídicího systému. V závěru práce je popsána realizace navrženého systému na uvedeném robotu a jsou zhodnoceny výsledky funkce navrženého systému.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to design control system of a two-wheel mobile robot and to subsequently implement this system using available sensor devices and National Instruments' Single-Board RIO platform.

The introduction briefly describes the general issue of two-wheel mobile robots as inverted pendulums, followed by an overview of several existing solutions to this problem. The following describes used robot including description of its parts and its mathematical model. Then the main part of the work follows, which is design of the sensory and control system. At the end of the thesis, the implementation is described along with evaluation of the stabilization system results.

KLÍČOVÁ SLOVA

Inverzní kyvadlo, dvoukolý robot, stabilizace, řídicí systém.

KEYWORDS

Inverse pendulum, two-wheel robot, stabilization, control system.

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Tímto prohlašuji, že předkládaná bakalářská práce je mojí původní autorskou prací, kterou jsem vypracoval pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím uvedené odborné literatury.

Vít Robenek, Brno, 2012

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROBENEK, V. *Návrh řídicího systému dvoukolého mobilního robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, a také za veškerou pomoc, kterou mi v průběhu tvorby práce ochotně poskytoval.

OBSAH

Abstrakt	5
Klíčová slova	5
Prohlášení o originalitě.....	7
Bibliografická citace	7
Poděkování	9
1 Úvod.....	13
2 Přehled existujících řešení.....	15
2.1 Gyrobot.....	15
2.2 nBot.....	15
2.3 Equibot.....	16
2.4 Segway PT.....	17
2.5 Vyhodnocení.....	17
3 Mobilní robot Pierot.....	19
3.1 Konstrukce	19
3.2 Pohonná soustava.....	19
3.3 Senzorická výbava.....	20
3.4 Řídicí systém	23
3.5 Dynamický model.....	23
4 Návrh řídicího systému	29
4.1 Struktura řídicího systému	29
4.2 Řízení stability	30
4.3 Řízení pohybu	32
4.4 Řízení motorů.....	32
5 Realizace	35
5.1 Program kontroléru.....	35
5.2 Kalibrace snímačů	35
5.3 Dosažený postup realizace.....	37
6 Závěr.....	39
7 Literatura.....	41

1 ÚVOD

Dvoukolý mobilní robot s osou kol umístěnou pod těžištěm těla robotu se po mechanické stránce chová jako inverzní kyvadlo. Tato vlastnost z něj dělá obecně nestabilní soustavu, kterou lze stabilizovat udržením ve stavu mechanické rovnováhy.

Uvažujeme-li, že je každé z kol poháněno nezávisle, má robot v prostoru 3 stupně volnosti. Nezávislý pohon kol umožňuje robotu kromě přímočarého pohybu podél vodorovné osy kolmé na osu kol také rotaci okolo osy svislé – tedy zatáčení. Protože se v této práci jedná zejména o řízení stability robotu, je možno celou úlohu považovat za rovinnou a tím pádem uvažovat pouze 2 stupně volnosti těla robotu, a to horizontální posun a rotaci okolo osy kol.

V rámci řídicího systému je nutno aplikovat řadu častých problematik z oblasti automatického řízení, od zpracování signálu ze snímačů přes samotný řídicí algoritmus založený na matematickém modelu robotu až po řízení motorů. To je jedním z důvodů, proč je tato úloha velmi oblíbeným prostředkem výuky automatického řízení a mechatroniky. Takto je pojata také tato práce, jejímž cílem není objevení nového způsobu řízení robotu, ale naopak aplikace známých principů na konkrétním robotu, řídicí platformě a za pomoci dostupné senzorické soustavy.

Tato problematika je různými způsoby velmi často zpracovávána jak na akademické úrovni, tak na úrovni komerční, ale také mezi robotiky – amatéry, a to často ve formě open-source projektů. Dostupné je tedy (zejména na internetových zdrojích) velké množství dokumentace ke stávajícím řešením, jejichž stručný přehled bude uveden v další části této práce.

2 PŘEHLED EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ

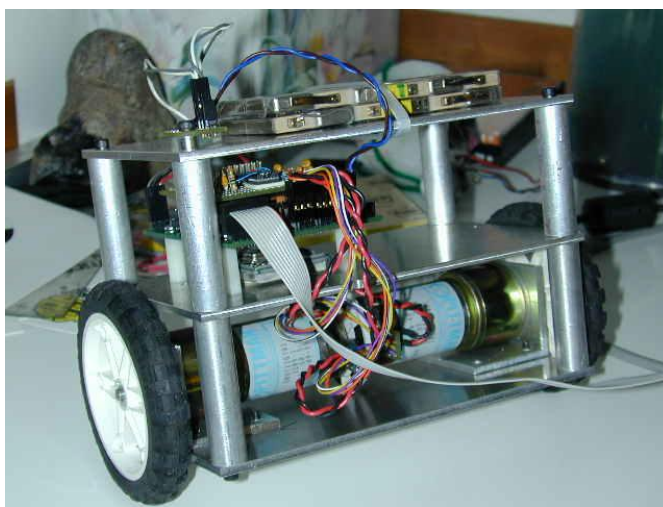
V následujícím přehledu bude uvedeno několik zajímavých řešení řídicího systému. V popisu se zaměřím zejména na senzorickou soustavu a řídicí algoritmus. Použitá řídicí elektronika, pohony a mechanický návrh robota pro mě nejsou příliš podstatné informace, jelikož jsou pro tento projekt již zvoleny, a to samozřejmě s ohledem na použitelnost v tomto projektu.

2.1 Gyrobot

Autorem tohoto jednoduchého robota je hobby-robotik Larry Barelo. Řídicí elektronika je založena na mikrořadiči Atmel ATMEGA16, pro snímání náklonu je robot osazen gyroskopem a akcelerometrem. Kola pohánějí dva nezávisle řízené stejnosměrné motory s enkodéry pro potřeby odometrie.

Současná verze algoritmu využívá pro vyhodnocení náklonu pouze údaje z gyroskopu, který ale měří úhlovou rychlost. To znamená nutnost signál integrovat, což způsobuje průběžné kupení chyby naměřeného náklonu, takže řídicí algoritmus funguje pouze několik sekund až minut.

Řízení obstarává MISO PID regulátor s konstantními koeficienty. Ten v závislosti na natočení, úhlové rychlosti, vodorovné pozici a rychlosti těla robota stanovuje krouticí moment, který je aplikován motory na kola robota. [1]



Obr. 1: Gyrobot. [1]

2.2 nBot

Tento robot autora Davida Andersona, také hobby-robotika, prošel několika evolučními kroky. Nejprve to byl voziček s kyvadlem, do fáze mobilního dvoukolého robota se dostal až ve své třetí verzi.

Měření náklonu zajišťuje kompaktní inerciální měřicí jednotka (IMU), která je tvořena gyroskopem a akcelerometrem. Oproti předchozím verzím byla pozměněna stavba robota, přesunem baterií do vyšší polohy došlo k posunu těžiště směrem nahoru, což vedlo ke zjednodušení stabilizace.

Vyhodnocení náklonu robota je řešeno Weinerovým filtrem, který je přímo implementován v jednotce IMU.

Řízení motorů pro udržení stability je řešeno MISO PD regulátorem s konstantními koeficienty, jehož vstupy jsou náklon robotu, natočení kol a derivace (tedy rychlosti) obou těchto veličin. Pojezdu se docílí změnou žádané hodnoty náklonu robotu, a ten pak musí zůstat v pohybu, aby byl vyvážen. Pro zatáčení je nutno k napětí jednoho motoru přidat a od napětí druhého motoru ubrat stejnou hodnotu, stabilita je pak zachována. [2]

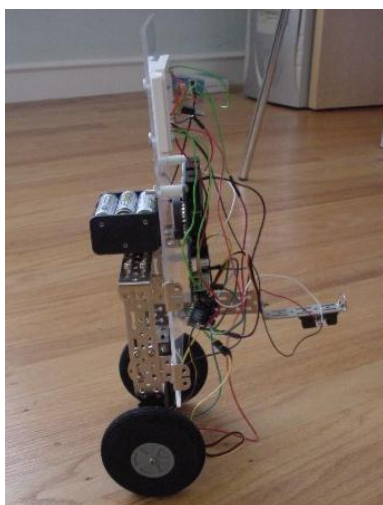


Obr. 2: nBot v3. [2]

2.3 Equibot

Autorem tohoto robotu je Dan Piponi. Robot se značně liší od většiny ostatních v přístupu k senzorické soustavě.

Místo jakékoliv inerciální senzoriky používá infračervený dálkoměr, kterým měří vzdálenost od země. Takto lze při znalosti geometrie robotu vyhodnotit náklon jeho těla. Pro pohon jsou použity dva modelářské servomotory s rozsahem natočení 360°, robot tedy není schopen plnohodnotného pojezdu, pouze balancování. Pro řízení je použit PI regulátor. [3]



Obr. 3: Equibot. [3]



Obr. 4: Segway PT. [4]

2.4 Segway PT

Známým příkladem mobilního inverzního kyvadla je tento komerčně prodáváný dopravní prostředek autora Deana Kamena, který byl uveden na trh v roce 2001. Pro účely této práce není přímo příliš přínosný, protože je o něm z pochopitelných důvodů známo jen velmi málo technických informací. Pro udržení rovnováhy používá pět gyroskopů (kvůli redundanci) a dva kapalinové inklinometry. O řízení se stará elektronika Texas Instruments. Pojezd je ovládán přenášením váhy pasažéra vpřed a vzad, zatáčení je ovládáno řídítky. [4]

2.5 Vyhodnocení

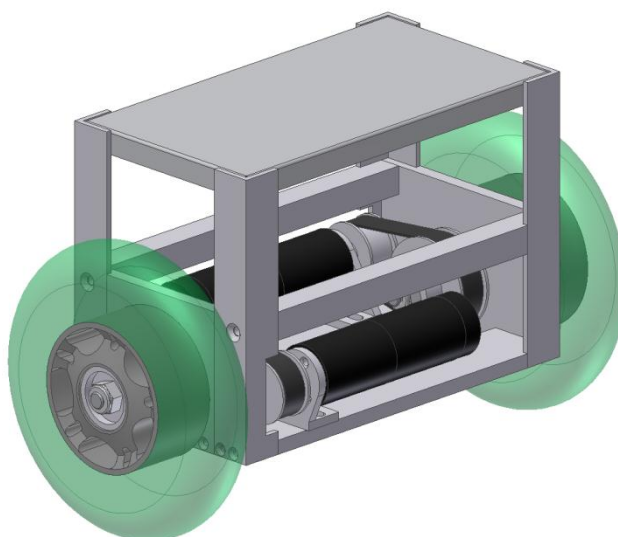
Zde uvedené projekty tvoří jen zlomek toho, co lze na dostupných zdrojích nalézt. Ostatní projekty jsou ale velmi podobné uvedeným, proto jsem vybral pouze takové, které jsou dobře zdokumentované nebo něčím zajímavé, ať z pohledu technického řešení, přínosností pro tuto práci nebo možnostmi jejich praktického využití. Abych mohl z existujících projektů vyvodit nějaký závěr pro tuto práci, je nutné nahlížet na jednotlivé části nezávisle.

3 MOBILNÍ ROBOT PIEROT

3.1 Konstrukce

Laboratorní robot Pierot byl navržen a zrealizován vedoucím mé bakalářské práce coby pomůcka pro výuku mechatroniky a také jako základ pro studentské projekty včetně kvalifikačních prací. Tělo robotu je složeno z hliníkových profilů, kola jsou polyuretanová, původem z inline koloběžky. Kola jsou umístěna na stranách robotu na stejné ose, která je umístěna níže, než těžiště těla robotu. Pierot tedy odpovídá charakteristice mobilního dvoukolého inverzního kyvadla z úvodu této práce. Model robotu je zobrazen na obrázku 5, základní parametry robotu jsou v tabulce 1.

Po konstrukční stránce je robot z velké části hotov, jednou z mála věcí k vyřešení zbývá rozložení komponent řídicího systému v rámci těla robotu. Toto by mělo být provedeno s ohledem na umístění těžiště těla co nejvýše vzhledem k ose kol, což zvýší moment setrvačnosti těla a robot bude stabilnější, tedy snáze říditelný.



Obr. 5: Mobilní inverzní kyvadlo Pierot.

Rozměry těla (W x H x D):	146 x 100 x 80 mm
Průměr kol:	100 mm
Rozchod kol:	176 mm
Hmotnost těla (včetně pohonné soustavy):	0,6 kg
Sekundární převod:	1,6:1

Tab. 1: Základní parametry robotu.

3.2 Pohonná soustava

Pro pohon byly s ohledem na jednoduchost řízení zvoleny stejnosměrné motory Maxon A-max 22 (tab. 2). Každé z kol je poháněno vlastním motorem. K motorům jsou v rámci modulárního systému Maxon připojeny planetové

převodovky Maxon GP-22 (tab. 3) a magnetické enkodéry Maxon MR (tab. 4). Kola jsou s převodovkami spojena ozubenými řemeny, které zároveň plní funkci tlumičů přenášených rázů na převodovky. [5]

Motor	
Nominální napětí	24 V
Nominální výkon	8,4 W
Nominální proud	0,35 A
Rozběhový proud	1,14 A
Nominální moment	6,97 mNm
Záběrný moment	24,3 mNm
Nominální otáčky	7430 min ⁻¹
Maximální přípustné otáčky	9800 min ⁻¹
Moment setrvačnosti	4,11 gcm ²
Rozměry (D x L)	Ø22 x 31,9 mm
Hmotnost	54 g

Tab. 2: Základní parametry motorů. [5]

Převodovka	
Převodový poměr	19:1
Maximální moment	0,6 Nm
Maximální účinnost	0,7
Doporučená vstupní rychlost	<8000 min ⁻¹
Moment setrvačnosti	0,4 gcm ²
Rozměry (D x L)	Ø22 x 32,2 mm
Hmotnost	55 g

Tab. 3: Základní parametry převodovek. [5]

3.3 Senzorická výbava

3.3.1 Snímače natočení motorů

Základem senzorické soustavy robotu jsou enkodéry v pohonech (tab. 4), které primárně slouží k regulaci pohonů. Jejich další využití může být pro pozdější potřeby odometrie. Enkodéry by se daly považovat za standardní řešení snímání natočení a otáček motoru, o jiném druhu snímače tedy ani nebylo uvažováno. Typ enkodéru byl vybrán podle použitých motorů.

Enkodér	
Počet kanálů	3
Počet impulsů	512 ot ⁻¹
Fázový posun	90°e±45°e
Maximální přípustná rychlost	37500 min ⁻¹
Napájecí napětí	5 V

Tab. 4: Základní parametry enkodérů. [5]

3.3.2 Snímání náklonu

Jedním z hlavních cílů této práce je návrh senzorické soustavy s ohledem na regulaci stability robotu. Nutnou podmínkou pro správnou funkci regulátoru stability, popřípadě pojezdu, je totiž dostatečně kvalitní odhad náklonu těla robotu, popřípadě také jeho časové změny, tedy úhlové rychlosti. Rozhodující je zejména přesnost, citlivost a dynamika měření. Náklon lze měřit pomocí několika fyzikálních veličin, proto je nutné si nejprve zvolit přístup k získání tohoto údaje.

Jako nejjednodušší cesta se jeví použití přímo snímače náklonu, tedy inklinometru, například kapalinového nebo kyvadlového. Funkce je založená na měření náklonu pohyblivého závaží vlivem tíhového zrychlení vůči obalu snímače. Tyto snímače jsou ale vzhledem ke své dynamice určeny zejména pro měření statických jevů (např. sklon kopce). Také se ve výsledcích jejich měření projevuje případné vodorovné zrychlení robota. Další podstatné nevýhody jsou jejich rozměr a cena.

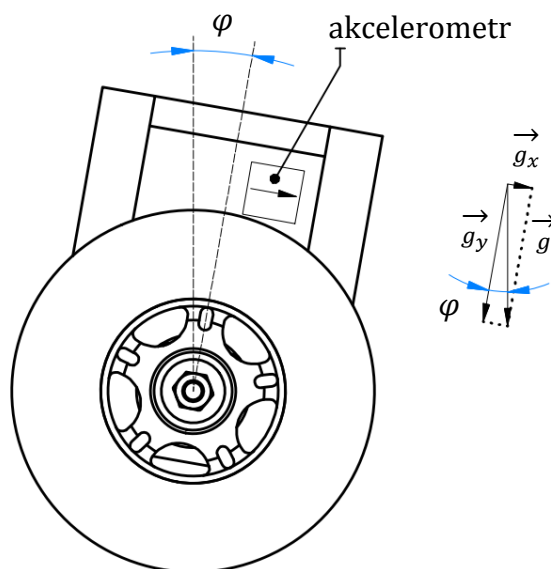
Další možná cesta je mechanické měření vzdálenosti nějakého bodu kyvadla od země ramenem umístěným na čepu, které se bude dotýkat podložky. Podmínkou je dostatečně malý pasivní odpor čepu, který nebude znatelně ovlivňovat dynamiku kyvadla. Tento způsob bude funkční pouze za předpokladu pohybu po hladké vodorovné podložce. Hlavní nevýhodou je ale složité konstrukční řešení, navíc je pro dosažení dostatečné dynamiky snímače nutný určitý nucený přítlak ramena k podložce, což se projeví v dynamice samotného robotu.

Alternativou je měření vzdálenosti pomocí optického dálkoměru, k nevýhodám oproti mechanickému řešení přibývá náchylnost na odrazivost povrchu a zejména pořizovací cena.

Jedním z nejrozšířenějších řešení pro snímání náklonu je použití snímače zrychlení, tedy akcelerometru. Pokud na tělo robotu působí pouze tíhové zrychlení, měřicí osa akcelerometru je kolmá na svislou osu těla a zároveň kolmá na osu rotace tělesa, měří akcelerometr velikost složky tíhového zrychlení, která je rovnoběžná s vodorovnou osou tělesa. Celková velikost tíhového zrychlení je známá a pro danou lokalitu konstantní, lze tedy podle velikosti jedné z jeho kolmých složek vypočítat úhel mezi osou tíhového zrychlení a osami těla robotu. Výpočet je popsán rovnicí (1) a obrázkem 6. Toto řešení je velmi podobné principu funkce inklinometru, ale absence makroskopického závaží u akcelerometru přináší dostatečnou dynamiku snímače. Stejně jako v případě inklinometru je měření ovlivněno případným vodorovným zrychlením působícím na tělo robotu, jehož velikost je obecně neznámá. Dalším problémem akcelerometru (za předpokladu finančně dostupného MEMS řešení) je značný šum, kterým je zatížen výstupní

signál. Samotný akcelerometr lze tedy použít jen coby dlouhodobou informaci, což není dostatečné pro řízení dynamického systému. Kvůli těmto vlastnostem není akcelerometr vhodný ani pro výpočet úhlové rychlosti těla.

$$\varphi = \arcsin \frac{g_x}{g} \quad (1)$$



Obr. 6: Výpočet náklonu pomocí akcelerometru.

Naopak pro měření úhlové rychlosti je ideální gyroskop, který vyniká krátkodobou přesností. Nabízí se možnost jeho signál integrovat a získat tak informaci o natočení. Toto ale přináší několik problémů. Jednak je toto měření z principu integrace pouze relativní, pokud nejsou známy počáteční podmínky měření. Závažnějším problémem je jev zvaný *drift*. Společně se skutečnou rychlostí je totiž integrována (a tedy postupně kupena) i okamžitá chyba měření. Ta je sice z krátkodobého hlediska nevýrazná, při postupném kupení ale dosahuje hodnot, které způsobí posun naměřené hodnoty natočení obecně neurčitým směrem a velikostí. Po určité době tedy vypočítávané natočení ztrácí přesnost a je pro řízení stability robotu nedostatečné.

Jako vhodné řešení se ale jeví kombinace akcelerometru a gyroskopu pomocí vhodného matematického aparátu, tedy filtru. Problematika dostatečně kvalitního (zejména po dynamické stránce) měření náklonu se netýká jen inverzních kyvadel, ale mnoha dalších aplikací, kde je nutné měřit náklon, např. umělý horizont v letectví. Mezi nejčastěji používané filtry pro tento problém patří poměrně jednoduchý komplementární filtr a výrazně sofistikovanější Kalmanův filtr. Použitím vhodného filtru je pak možné dosáhnout dostatečně kvalitního měření náklonu i za pomoci levných a dostupných snímačů. [6] [7]

Konkrétní typy zvolených snímačů jsou popsány v následující části.

3.3.3 Inerciální senzorika

Měření náklonu robotu zajišťuje jednočipová šestiosá inerciální měřicí jednotka InvenSense MPU-6050. Ta obsahuje tříosý akcelerometr a tříosý gyroskop, oboje fungující na MEMS technologii. Kromě snímačů samotných jednotka zahrnuje také potřebné AD převodníky, digitální zpracování signálu pomocí filtrů a komunikační sběrnici I²C, po které jednotka komunikuje s řídicí elektronikou. [8]

Další uvažovanou možností bylo použití nezávislých snímačů, a to tříosého gyroskopu InvenSense ITG-3200 a tříosého akcelerometru STMicroelectronics LIS3LV02DQ, oboje založené také na MEMS technologii. Nakonec bylo vybráno jednočipové řešení vzhledem k jednoduššímu zapojení a komunikaci. Alternativou k vybranému řešení je šestiosá měřicí jednotka firmy Analog Devices, která ale je při podobných parametrech výrazně dražší než řešení firmy InvenSense. Ostatní technologie snímačů inerciálních veličin nebyly zejména vzhledem k ceně vůbec uvažovány.

3.4 Řídicí systém

Pro vývoj řídicího systému byla zvolena platforma CompactRIO (cRIO) společnosti National Instruments. CompactRIO patří do třídy průmyslových řídicích kontrolérů (PAC), což jsou zařízení určené hlavně pro účely DAQ a řízení, které rozšiřují možnosti PLC o otevřenou softwarovou architekturu. Programování pomocí grafického vývojového prostředí NI LabVIEW umožňuje rychlý vývoj aplikací. Zařízení nabízí embedded systém běžící na 32bitovém real-time procesoru a programovatelné hradlové pole (FPGA). Dále je součástí zařízení šasi, které slouží pro připojení rozšiřujících I/O modulů k hradlovému poli.

Toto zařízení bude použito pouze pro vývoj a naladění řídicího systému, vzhledem ke svým rozměrům není určeno pro instalaci na mobilní stroje velikosti robotu Pierot. Během ladění bude umístěno mimo tělo robotu a k ostatním částem řídicího systému bude připojeno pomocí dostatečně dlouhého vedení, aby neovlivňovalo dynamiku soustavy.

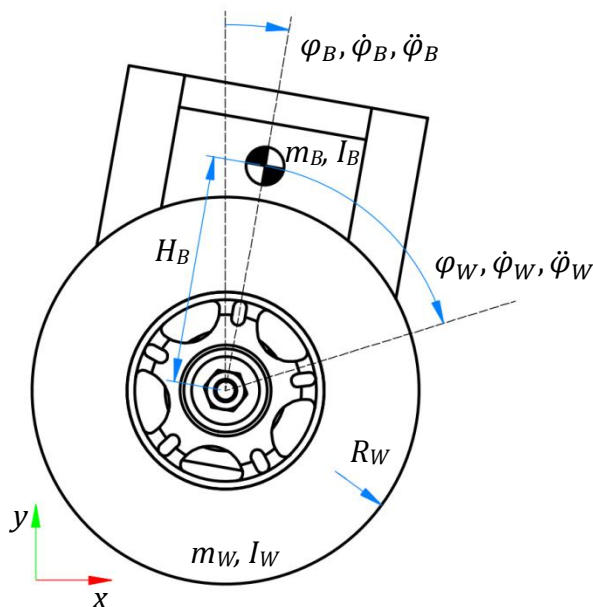
Finální verze řídicího programu bude poté přesunuta na platformu Single-Board RIO (sbRIO), která podobně jako cRIO nabízí real-time procesorový systém a programovatelné hradlové pole, přičemž je vše umístěno na jediné PCB. Typ sbRIO-9606, na kterém bude finální verze řízení realizována, neumožňuje připojení rozšiřujících I/O modulů, k dispozici jsou tedy pouze vstupy a výstupy umístěné přímo na kartě, které jsou výhradně digitální. Vzhledem ke své konstrukci není sbRIO určeno pro použití v náročných a nepříznivých podmínkách, ale díky svým rozměrům je ideální pro aplikaci na mobilní zařízení. [9]

3.5 Dynamický model

Pro porozumění chování robotu a následný návrh řídicího algoritmu je důležité znát matematický model řešeného problému, v tomto případě model dynamiky robotu. Pro sestavení rovnic byl pohyb robotu zjednodušen do dvou stupňů volnosti, skládá se pouze z rotace těla okolo osy kol a translace. Toto zjednodušení umožňuje uvažovat pouze jedno kolo. Funkce pohonného ústrojí je bez prokluzu a jiných rušivých vlivů. Hmotnosti jednotlivých částí těla robotu jsou soustředěny do jeho těžiště. Odvození rovnic je provedeno podle schématu

na obr. 7. Pro sestavení matematického modelu je využito Lagrangeovy rovnice II. druhu (2). Model robotu je převzat z [10].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_p}{\partial q} + \frac{\partial Re}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial W}{\partial q} \quad (2)$$



Obr. 7 Schéma robotu pro odvození pohybových rovnic.

Symbol	Popis
φ_B	náklon těla robotu od svislé osy
m_B	hmotnost těla robotu
H_B	vzdálenost mezi osou kol a těžištěm
I_B	moment setrvačnosti těla k jeho těžišti
φ_W	relativní natočení kol vůči tělu robotu
m_W	hmotnost kola robotu
R_W	poloměr kola robotu
I_W	moment setrvačnosti kola k jeho ose
M_M	moment motoru
b_g	tlumení působící na kola robotu
q	zobecněná souřadnice
g	tíhové zrychlení

Tab. 5: Tabulka použitých symbolů.

Tato metoda vychází z principu virtuálních prací, pro jeho výpočet je tedy třeba určit kinetickou a potenciální energii soustavy, dále zatlumené energie a práce vnějších sil. Také je třeba definovat zobecněné souřadnice, které jsou společně s dalšími použitými symboly uvedeny v tabulce 5. Výsledkem bude stavový model robotu.

3.5.1 Vypočet energií soustavy

Pro každou energii je nejprve sestavena rovnice podle schématu soustavy na obr. 6, poté jsou provedeny derivace podle zobecněných souřadnic, popřípadě také podle času.

Kinetická energie:

$$E_k = \frac{1}{2} m_W \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I_W \cdot \frac{\dot{x}^2}{R_W^2} + \frac{1}{2} m_B \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} (I_B + m_B \cdot H_B^2) \dot{\phi}_B^2 \quad (3)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2} \right) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} (I_B + m_B \cdot H_B^2) \dot{\phi}_B^2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} = \left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2} \right) \dot{x} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} \right) = \left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2} \right) \ddot{x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}_B} = (I_B + m_B \cdot H_B^2) \dot{\phi}_B \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}_B} \right) = (I_B + m_B \cdot H_B^2) \ddot{\phi}_B \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \phi_B} = 0 \quad (10)$$

Potenciální energie v závislosti na natočení těla robotu:

$$E_p = g \cdot m_B \cdot H_B \cdot \cos \varphi_B \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial \varphi_B} = -g \cdot m_B \cdot H_B \cdot \sin \varphi_B \quad (13)$$

Zatlumená energie:

$$Re = \frac{1}{2} b_g \left(\frac{\dot{x}}{R_W} - \dot{\phi}_B \right)^2 \quad (14)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \dot{x}} = b_g \left(\frac{\dot{x}}{R_W^2} - \frac{\dot{\varphi}_B}{R_W} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \dot{\varphi}_B} = b_g \left(\dot{\varphi}_B - \frac{\dot{x}}{R_W} \right) \quad (16)$$

Práce vnějších sil:

$$W = M_M \left(\frac{x}{R_W} + \varphi_B \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = M_M \cdot \frac{1}{R_W} \quad (18)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi_B} = M_M \quad (19)$$

3.5.2 Dosazení

Po vyjádření rovnic energií a jejich derivací je třeba tyto rovnice dosadit do obecných Lagrangeových rovnic II. druhu pro jednotlivé zobecněné souřadnice. Z dosazených rovnic je posléze možné vyjádřit vodorovné a úhlové zrychlení těla robotu.

Dosazení pro $q = x, \dot{q} = \dot{x}$:

$$\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2} \right) \ddot{x} + \left(\frac{b_g}{R_W^2} \right) \dot{x} - \frac{b_g}{R_W} \dot{\varphi}_B = M_M \frac{1}{R_W} \quad (20)$$

Dosazení pro $q = \varphi, \dot{q} = \dot{\varphi}$:

$$(I_B + m_B \cdot H_B^2) \ddot{\varphi}_B + b_g \cdot \dot{\varphi}_B - \frac{b_g}{R_W} \dot{x} - g \cdot m_B \cdot H_B \cdot \sin \varphi_B = -M_M \quad (21)$$

Výsledné Lagrangeovy rovnice II. druhu robotu Pierot:

$$\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2} \right) \ddot{x} + \left(\frac{b_g}{R_W^2} \right) \dot{x} = M_M \frac{1}{R_W} + \frac{b_g}{R_W} \dot{\varphi}_B \quad (22)$$

$$(I_B + m_B \cdot H_B^2) \ddot{\varphi}_B + b_g \cdot \dot{\varphi}_B - g \cdot m_B \cdot H_B \cdot \sin \varphi_B = -M_M + \frac{b_g}{R_W} \dot{x} \quad (23)$$

Výsledné rovnice vodorovného a úhlového zrychlení těla robotu:

$$\ddot{x} = \frac{1}{\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2}\right) R_W} M_M + \frac{b_g}{\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2}\right) R_W} \dot{\varphi}_B - \frac{\left(\frac{b_g}{R_W^2}\right)}{\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2}\right)} \dot{x} \quad (24)$$

$$\ddot{\varphi}_B = -\frac{1}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} M_M + \frac{b_g}{(I_B + m_B \cdot H_B^2) R_W} \dot{x} - \frac{b_g}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} \dot{\varphi}_B + \frac{g \cdot m_B \cdot H_B}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} \sin \varphi_B \quad (25)$$

Vzhledem k tomu, že hlavním cílem řídicího systému je stabilizace robotu, tedy snaha o nulovou hodnotu náklonu těla robotu φ_B , lze přepokládat, že hodnota tohoto úhlu v průběhu stabilizace bude $|\varphi_B| \leq 20^\circ$. Mimo tento rozsah navíc logicky klesají nároky na přesnost regulace a tím pádem také na přesnost hodnot naměřených pomocí snímačů. Tohoto faktu je možno využít pro další zjednodušení. V rovnici (25) lze provést náhradu funkce *sinus* přímo jejím argumentem, vzhledem k tomu, že $\sin \alpha \cong \alpha$ pro $\alpha \approx 0 \text{ rad}$. Touto úpravou dojde ke zjednodušení jak matematického modelu, tak regulátoru, protože se tímto odstraní veškerá nelinearita této úlohy. Rovnice (24) po úpravě bude tedy mít tuto podobu:

$$\ddot{\varphi}_B = -\frac{1}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} M_M + \frac{b_g}{(I_B + m_B \cdot H_B^2) R_W} \dot{x} - \frac{b_g}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} \dot{\varphi}_B + \frac{g \cdot m_B \cdot H_B}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} \varphi_B \quad (26)$$

3.5.3 Stavový model robotu

Výše uvedené rovnice lze zapsat do maticového tvaru, čímž vznikne tzv. stavový model, který je značně přehlednější. Obecné rovnice stavové reprezentace systému jsou

$$\mathbf{x}'(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (27)$$

a

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t), \quad (28)$$

kde $\mathbf{x}$ je stavový vektor, $\mathbf{u}$ je vektor vstupů a $\mathbf{y}$ vektor výstupů. Koeficienty těchto vektorů tvoří matice, a to matice dynamiky systému $\mathbf{A}$, matice vstupů $\mathbf{B}$, matice výstupů $\mathbf{C}$ a matice převodu $\mathbf{D}$. [11]

Pro stavový vektor $\mathbf{x}^T = [x \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\varphi}]$ mají rovnice stavového modelu robota následující podobu:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\varphi}_B \\ \ddot{\varphi}_B \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi_B \\ \dot{\varphi}_B \end{bmatrix} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \quad (29)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi_B \\ \dot{\varphi}_B \end{bmatrix} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u} \quad (30)$$

Jednotlivé matice stavového modelu jsou složeny z koeficientů z rovnic (24) a (26):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\left(\frac{b_g}{R_W^2}\right)}{\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2}\right)} & 0 & \frac{b_g}{\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2}\right) R_W} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{b_g}{(I_B + m_B \cdot H_B^2) R_W} & \frac{g \cdot m_B \cdot H_B}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} & -\frac{b_g}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\left(m_W + m_B + \frac{I_W}{R_W^2}\right) R_W} \\ 0 \\ -\frac{1}{(I_B + m_B \cdot H_B^2)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

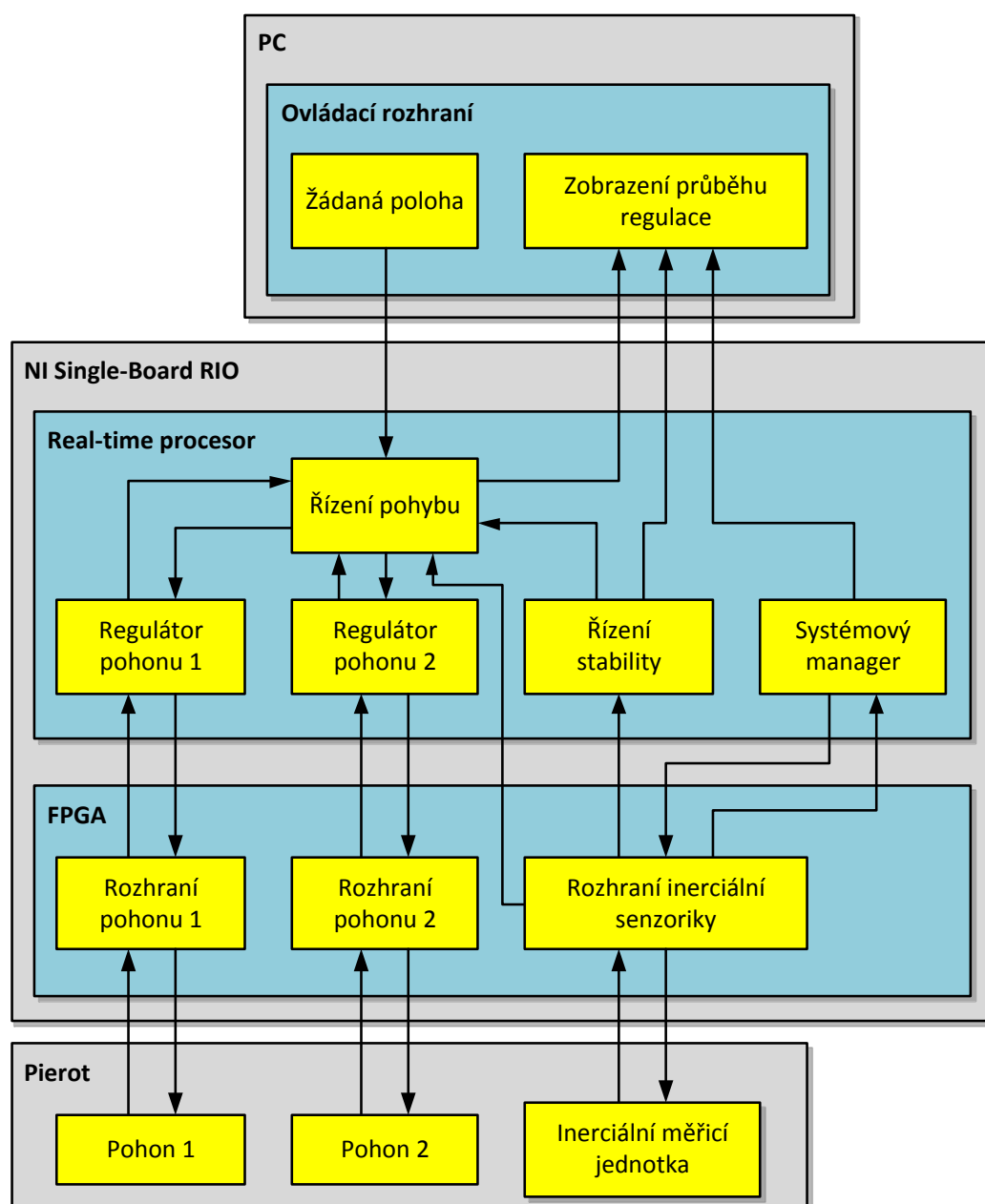
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

4 NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

4.1 Struktura řídicího systému

Středem řídicího systému je kontrolér NI sbRIO-6909. Zatímco hradlové pole (FPGA) obstarává zpracování vstupů a výstupů, na real-time procesoru běží algoritmus řízení pohybu robotu společně s jednotlivými regulátory. Připojené PC slouží jako rozhraní pro ovládání pohybu robotu a také zobrazuje stav celého systému včetně průběhu regulace. Struktura systému je znázorněna na obr. 8 a jednotlivé části jsou popsány v dalších kapitolách.



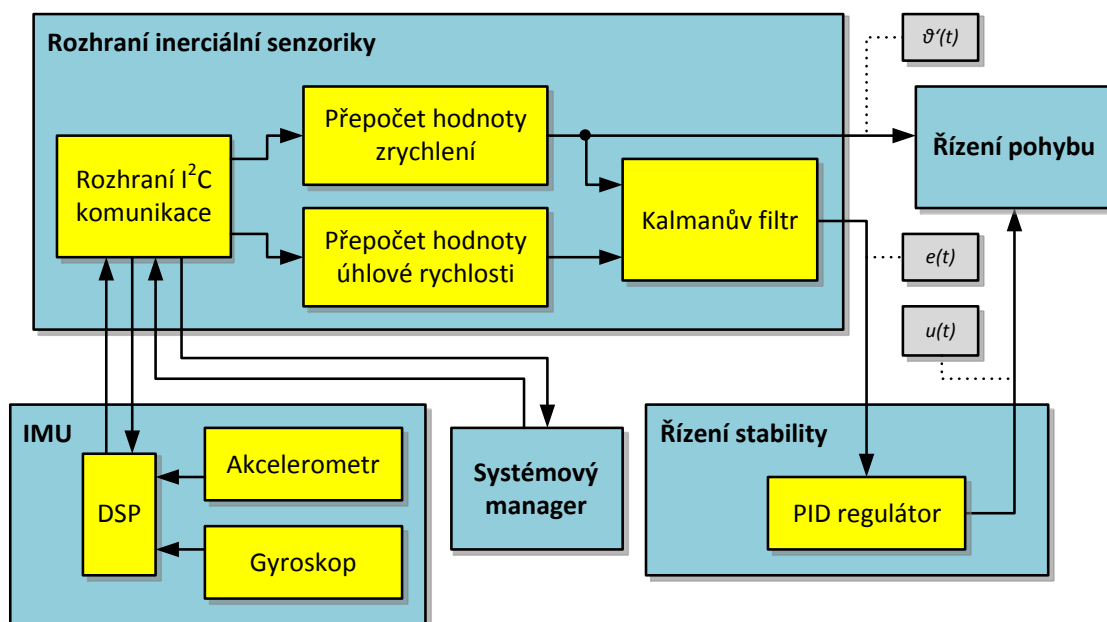
Obr. 8: Struktura řídicího systému.

4.2 Řízení stability

Úkolem této části řídicího systému je vyhodnocení akčního zásahu motorů nutného pro udržení stability robotu. Pro řízení stability robotu, tedy odklonu od svislé polohy, je nutné nejprve znát tento odklon. K jeho určení slouží akcelerometry a gyroskopy umístěné v inerciální měřicí jednotce. Jejich signál je nejprve digitalizován a poté zpracován pomocí DSP, kde je prováděna základní filtrace za účelem odstranění šumu. Zpracované signály jsou poté dostupné skrz komunikační rozhraní I²C. Komunikaci obstarává modul běžící na hradlovém poli kontroléru. Iniciaci a následnou kontrolu běhu tohoto modulu zajišťuje systémový manager, který funguje na real-time části systému.

Rozhraní inerciální sensoriky přijímá kromě hodnot všech šesti měřicích os také teploty jednotlivých snímačů, pomocí kterých kompenzuje přepočtené hodnoty zrychlení a úhlové rychlosti. Pro řízení stability je z obou snímačů podstatná pouze jedna osa, a to úhlová rychlost podél osy kol a zrychlení podél vodorovné osy těla. Tyto dvě hodnoty jsou vstupem do Kalmanova filtru, který efektivně minimalizuje měřicí chybu. Jeho funkce je rozebrána dále. Výstupem filtru je hodnota odklonu od svislé osy, která je vstupní chybou regulátoru stability. Byl vybrán PID regulátor, který lze považovat za standard v technické praxi a zároveň je vzhledem k řádu regulovaného systému dostatečný. Regulátor je podřízen systému řízení pohybu, jeho výstupem tedy musí být stejná veličina, jaká je vstupní chybou regulátoru pohybu. Touto veličinou je dráha, o kterou se musí odvalit kola robotu, aby se nacházela osa kol pod těžištěm těla robotu. [12]

Výstupem této části řídicího systému je také hodnota úhlové rychlosti $\dot{\theta}$ podél svislé osy robotu, která slouží modulu řízení pohybu pro synchronizaci pohybu kol robotu.



Obr. 9: Schéma řízení stability.

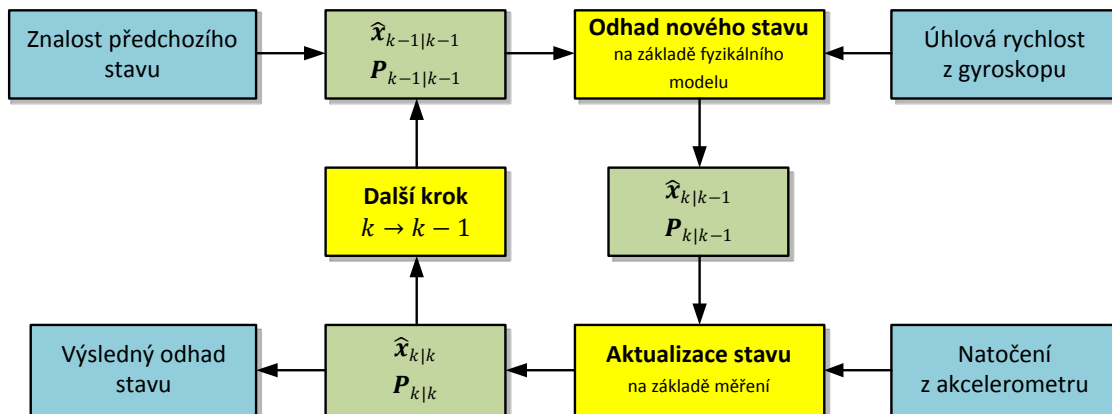
4.2.1 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je matematický algoritmus pro filtraci signálů v časové oblasti. Jeho hlavní výhodou je schopnost ze vstupního signálu z velké části odstranit šum a získat tak výrazně přesnější odhad skutečnosti, než jaký nabízí měřicí prostředky. Nachází aplikace v mnoha odvětvích, například v navigaci a řízení vozidel, zejména letadel a vesmírných lodí. Každý krok algoritmu má dvě základní fáze. V první fázi (fáze odhadu) se vytvoří odhad nového stavu systému. Jakmile je k dispozici další měření, začne druhá fáze (fáze aktualizace), ve které algoritmus provede aktualizaci odhadu sloučením těchto dvou hodnot (odhadu a měření) pomocí váženého průměru. Jednotlivé váhy vycházejí z průběžně upravovaných kovariancí, které jsou mírou neurčitosti jednotlivých stavových veličin. Díky svému charakteru může algoritmus snadno běžet v reálném čase, protože ke své činnosti potřebuje pouze poslední odhad, nikoliv celou historii měření. Pro vlastní výpočty filtru jsou často stavové veličiny a jejich kovariance zapsány ve formě matic, což urychluje výpočet a zároveň umožňuje zavedení lineárních vztahů mezi jednotlivými stavovými proměnnými.

Funkce filtru je možnost popsat konkrétně na problematice odhadu náklonu robotu Pierot. Robot je pro tento účel vybaven dvěma snímači. Výstup akcelerometru, který poskytuje odhad náklonu robotu na základě rozkladu tíhového zrychlení mezi osy robotu, je značně ovlivněn šumem a vodorovným zrychlením robotu. Gyroskop umožňuje odhad úhlové rychlosti těla robotu, jehož integrací je možnost získat údaj o natočení. Průběh tohoto odhadu je velice hladký, ale jeho hodnota je zatížena postupnou akumulací chyby (*drift*, viz kapitola 3.3.2 této práce). Kromě těchto dvou nezávislých zdrojů signálu je k dispozici také jejich vzájemný vztah. Vzhledem k základním zákonům mechaniky těles je změna natočení v čase přímo úměrná úhlové rychlosti.

V první fázi je vypočítán odhad nové hodnoty natočení. Předchozí natočení je upraveno matematickým modelem podle úhlové rychlosti změřené gyroskopem, kterou se tělo robotu pohybovalo mezi minulým a současným krokem algoritmu. Kromě výpočtu nového odhadu je také provedena úprava hodnoty kovariance, která může být závislá například na úhlové rychlosti (s rostoucí rychlostí roste neurčitost měření). V následující fázi aktualizace odhadu je použito měření natočení z akcelerometru. Poměr kovariance neurčitosti tohoto měření a kovariance neurčitosti z fáze odhadu určuje zesílení filtru. Zesílení udává, jak moc ovlivní naměřená hodnota odhad z předchozí fáze. Tímto je ukončen celý krok algoritmu. Jeho výsledná hodnota je výstupem z filtru a zároveň výchozí hodnotou pro další krok. V ideálním případě by mělo natočení změřené akcelerometrem posunout odhad natočení z gyroskopu směrem ke skutečné hodnotě a zároveň jej neovlivnit svým šumem. [13] [14]

V následujícím schématu má označení $\hat{x}_{n|m}$ význam odhadu hodnoty x v čase n za použití pozorování získaných do času m , proměnná x je stavový vektor a P je kovarianční matice.

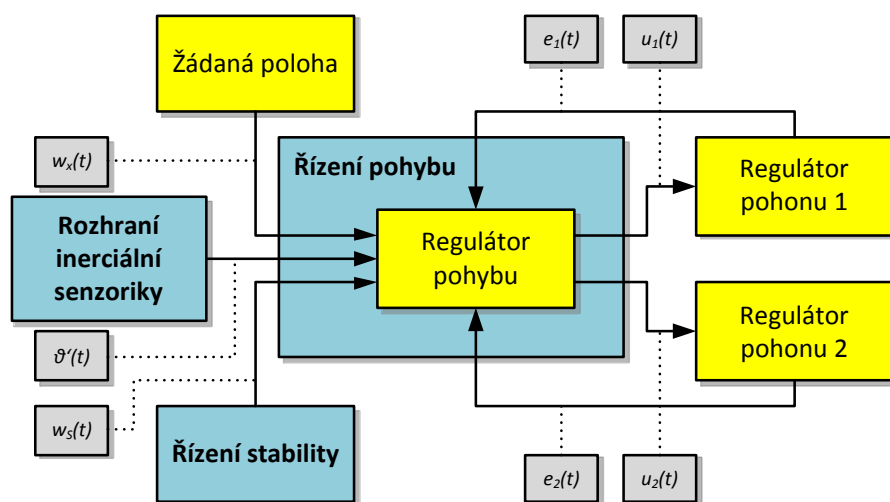


Obr. 10: Schéma funkce Kalmanova filtru.

Konkrétní implementace Kalmanova filtru včetně počátečních hodnot kovariančních matic, jejichž správné nastavení je klíčové pro správnou funkci filtru, je převzata z open-source projektu autonomního řízení modelu vrtulníku [15], kde Kalmanův filtr zajišťoval odhad hodnoty odklonu vrtulníku od svislé osy (tedy *umělý horizont*) za použití podobných snímačů, jaké jsou použity na robotu Pierot.

4.3 Řízení pohybu

Řízení pohybu zajišťuje výpočet žádaných hodnot polohy pro regulátory motorů. Toto provádí na základě žádané polohy z ovládacího rozhraní a změně polohy nutné k udržení stability robotu. Dále vyhodnocuje natočení podél svislé osy robotu, které je získáno integrací úhlové rychlosti okolo této osy. Toto natočení pak regulátor kompenzuje rozdílným požadavkem na natočení jednotlivých kol.



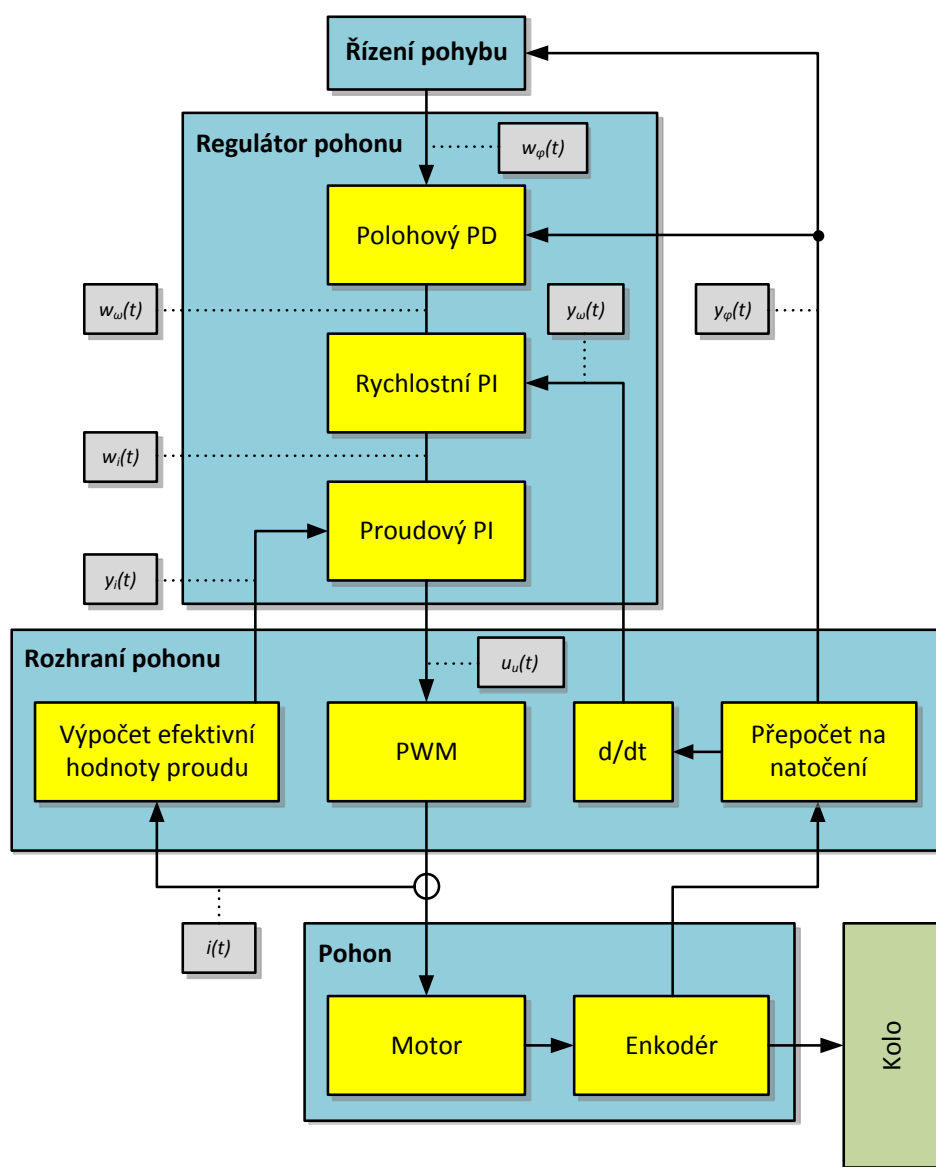
Obr. 11: Schéma řízení pohybu.

4.4 Řízení motorů

Poslední částí řídicího systému je samotné řízení motorů. Pro tento účel funguje na hradlovém poli rozhraní, které zajišťuje vyhodnocení natočení z enkodéru, výpočet jeho časové derivace a výpočet efektivní hodnoty naměřeného

proudu. Na tomto rozhraní také funguje generátor PWM napětí, kterým je napájen motorový zesilovač. Pro polohové řízení motorů je na real-time systému vytvořena kaskáda regulátorů, tedy několik za sebou řazených regulátorů. Kaskádu tvoří PD regulátor polohy, PI regulátor rychlosti a PI regulátor proudu. Regulátory byly vybrány na základě zavedených standardů pro řízení DC motoru [16]. Pro zpětnou vazbu využívají regulátory informací z rozhraní daného pohonu. Výstupem kaskády je napájecí napětí motorů, respektive střída PWM signálu generovaného v rozhraní pohonů.

Řízení motorů probíhá pro oba motory nezávisle a jeho schéma je zobrazeno na obrázku 12.



Obr. 12: Schéma řízení motoru.

5 REALIZACE

5.1 Program kontroléru

Navržený řídicí systém je naprogramován pomocí vývojového prostředí NI LabVIEW, které nabízí široké uplatnění hierarchické struktury programu. Veškeré dílčí úkony jsou realizovány podfunkcemi, ze kterých se skládají jednotlivé moduly řídicího systému. Pro tyto moduly je tedy zcela transparentní, zda jsou vstupní hodnoty, se kterými pracují, vyčítány ze sériové sběrnice, uživatelského rozhraní nebo nesériových digitálních vstupů. Zmíněné moduly jsou poté použity v hlavním podprogramu běžícím na real-time části kontroléru. Hlavní podprogram se tak svou strukturou velmi blíží schématu uvedenému na obrázku 8. Použité moduly byly vytvořeny mým vedoucím a byly mi poskytnuty pro vytvoření řídicího systému.

Jedním z modulů je polymorfní modul regulátoru s možností nastavení typu regulace od P až po PID (respektive PSD, vzhledem k diskrétní povaze systému). Regulátory jsou sice v prostředí LabVIEW dostupné ve formě funkcí, ale využívají ke své činnosti proměnné datového typu *double*, který je pro tuto aplikaci nepřínosný a jeho zpracování zbytečně zatěžuje real-time procesor.

5.2 Kalibrace snímačů

Co nejpřesnější odhad náklonu robotu je základem řízení stability, jehož funkce je nepostradatelná pro zbytek řídicího systému. Je proto velmi důležité správně určit konstanty pro přepočet naměřené hodnoty akcelerometrem na hodnotu zrychlení, respektive násobku tíhového zrychlení, působící na danou osu akcelerometru. Za tímto účelem byla navržena metoda kalibrace, která zahrnuje kalibrační zařízení, měřicí kartu NI PCIe-6251 a aplikaci vyvinutou v prostředí LabVIEW.

Kalibrační zařízení se skládá z optického enkodéru Avago HEDS-6505 a zvolené inerciální měřicí jednotky umístěné na jedné hřídeli. Nevyužitá osa tříosého akcelerometru náleží podélné ose hřídele, zbývající osy, které jsou použity pro řízení robotu, jsou tedy umístěny kolmo na osu hřídele. Hřídel je umístěna vodorovně a během její rotace se tedy IMU otáčí okolo nevyužité osy. Samotná kalibrace je založena na stálém působení tíhového zrychlení. Pokud je daná měřicí osa akcelerometru umístěna svisle, je rovnoběžná se směrem působení tíhového zrychlení a musí tedy co nejpřesněji detekovat jeho hodnotu. Jelikož výstupem akcelerometru není absolutní hodnota zrychlení, ale násobek tíhového zrychlení, je cílem kalibrace navrhnout takovou korekci naměřené hodnoty, aby daná svisle orientovaná měřicí osa detekovala hodnotu násobku tíhového zrychlení rovnu 1. Za předpokladu, že je závislost působícího zrychlení na naměřené hodnoty lineární, bude korekce odpovídat rovnici $y = k \cdot x + q$.

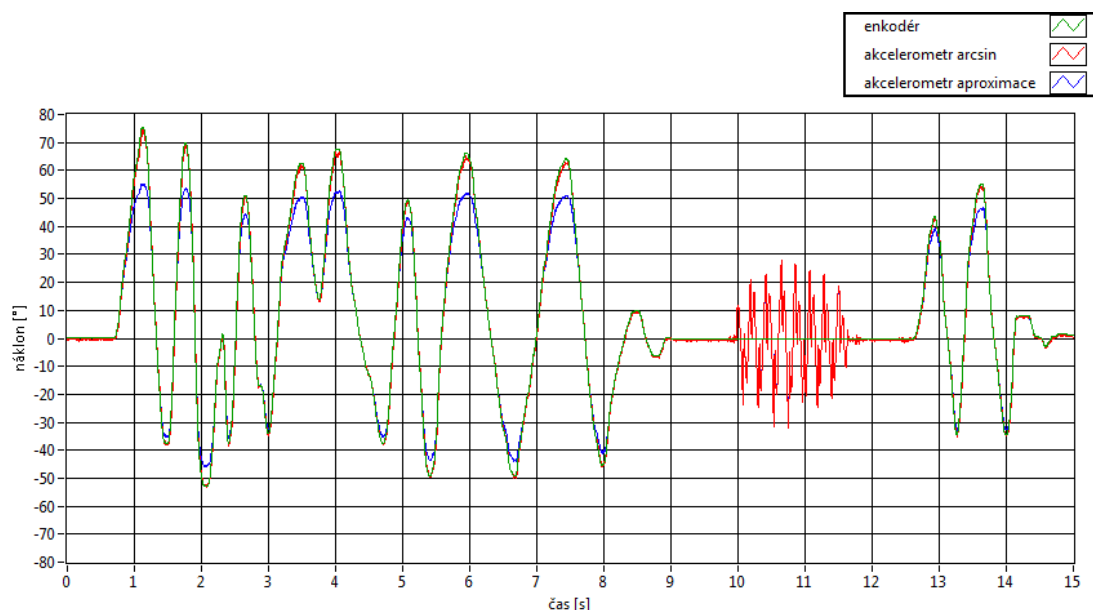
Nejprve se pomocí aplikace zaznamenala nejvyšší a nejmenší naměřená hodnota během několika otáček hřídele, aby bylo zaručeno, že bude zaznamenán stav, kdy bude měřicí osa orientována souhlasně se směrem tíhového zrychlení, a stav, kdy bude osa orientována protilehle se směrem tíhového zrychlení. Absolutní hodnoty naměřené veličiny se v těchto dvou stavech musí rovnat. Na základě tohoto faktu byl nastaven odpovídající posun korekční rovnice q . Poté byl nastaven koeficient k , aby byla naměřená hodnota rovna 1, popř. -1 pro opačnou

orientaci osy akcelerometru a směru zrychlení. Tento postup byl proveden nezávisle pro obě využívané osy akcelerometru.

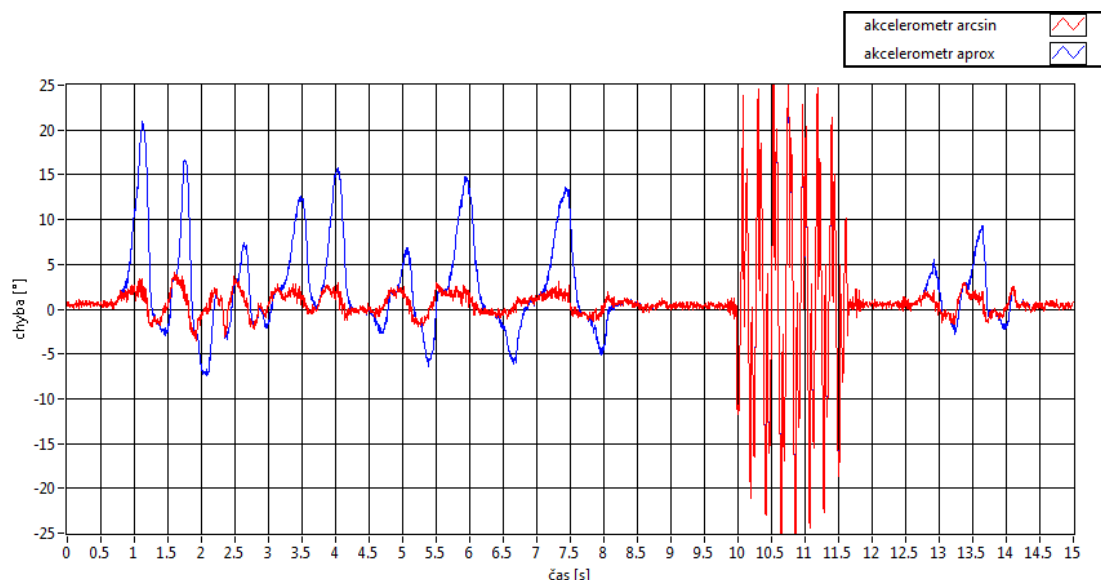
Poté byla úpravou aplikace ověřena použitelnost akcelerometru pro detekci odklonu připojeného tělesa (v tom tomto případě hřídele) od svislé osy. Princip tohoto měření je vysvětlen v kapitole 3.3.2. Kontrolou bylo natočení změřené enkodérem. Měření enkodéru je pouze inkrementální (tedy relativní), hodnota natočení musela být vynulována při dosažení svislé polohy IMU připojené k hřídeli.

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky srovnání natočení naměřeného enkodérem, natočení vyhodnoceného za použití inverzní goniometrické funkce arkus sinus z hodnot akcelerometrů a natočení vyhodnoceného podle aproximace goniometrické funkce sinus jejím parametrem. Tato aproximace je popsána v kapitole 3.5.2. Graf 1 zobrazuje přímo naměřená natočení, zatímco v grafu 2 jsou vykresleny chyby obou způsobů měření akcelerometry vůči hodnotám získaných enkodérem.

Tyto grafy jednak dokazují funkčnost navrženého měření úhlu náklonu a také dostatečnou přesnost aproximace funkce sinus pro úhel $|\varphi| \leq 20^\circ$, což je předpokládaný pracovní rozsah náklonu robotu. V čase od 10 do 12 s působilo na měřicí soustavu vodorovné zrychlení kolmé na osu hřídele. V této časové oblasti lze pozorovat značný vliv tohoto zrychlení na měření za pomoci akcelerometru, zatímco měření enkodérem logicky zůstává neznehodnoceno. Druhý problém řešení s akcelerometrem, tedy značný šum ve výstupním signálu, je patrný po celém průběhu grafů. Tyto problémy jsou odstraněny použitím přídatného měření gyroskopem a následným zpracováním signálů pomocí Kalmanova filtru.



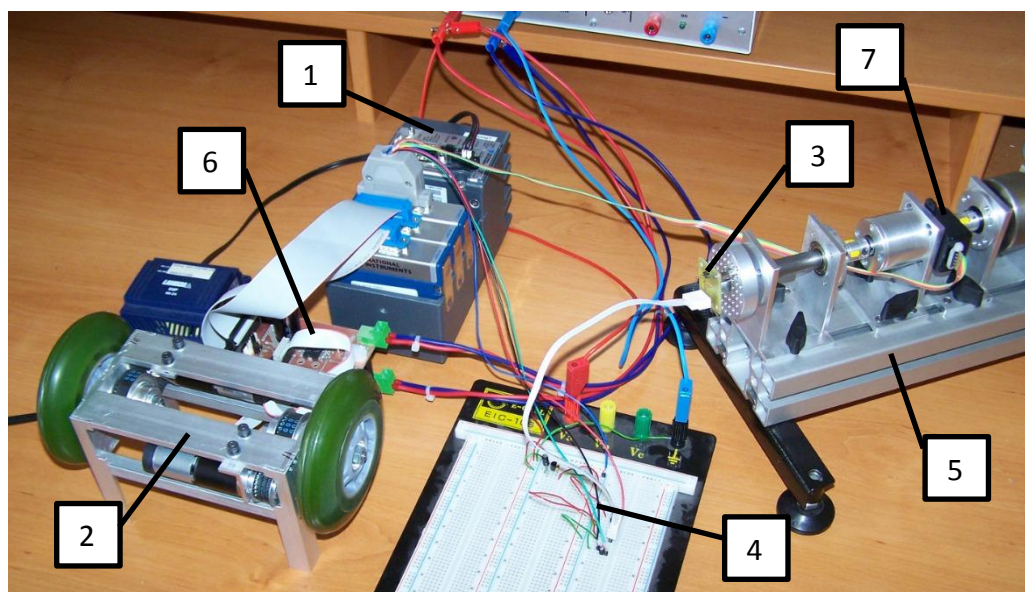
Graf 1: Naměřený náklon v čase.



Graf 2: Chyba náklonu v čase.

5.3 Dosažený postup realizace

V době odevzdání této práce je kvůli nedostupnosti některých komponent nutných k použití platformy NI Single-Board RIO naprogramovaný systém implementován na kontroléru NI CompactRIO (1), který je vzhledem ke svým rozměrům umístěn mimo tělo robotu (2). Se snímači a pohony robotu musí být samozřejmě spojen kabely, jejichž přítomnost do velké míry omezuje možnosti pohybu robotu. Dále zatím nebyly definitivně vyřešeny určité problémy s funkcí sériové sběrnice I²C, nebyla tedy zhotovena finální podoba desky plošných spojů inerciální měřicí jednotky (3). Připojení jednotky je prozatím vyřešeno prostřednictvím nepájivého kontaktního pole (4), což dále znemožňuje pojezd robotu. Funkce řídicího systému stability a pohybu tedy nemohla být ověřena.



Obr. 13: Stávající stav realizace.

Bylo ale možno provést kalibraci inerciálních snímačů, ověřit funkčnost navrženého způsobu měření náklonu a také naladit kaskády regulátorů obou pohonů. Pro ladění bylo použito manuální metody *pokus-omyl*, kterou se podařilo dosáhnout dostatečné dynamiky a zároveň stability regulace natočení kol. Do jisté míry byl naladěn také regulátor stability. Inerciální měřicí jednotka umístěná na kalibračním zařízení (5) umožnila otáčením hřídele jednoduchou simulaci náklonu robotu a mohlo tak být pozorováno natočení kol, tedy akční zásah regulátoru. Ten odpovídal předpokládanému chování řídicího systému stability. Za ověření funkce stabilizace ale bude možno považovat až měření (popř. pozorování), při kterém bude IMU umístěna na robotu a robot nebude mít omezen pojezd. Stávající stav popsany v této kapitole je zobrazen na obrázku 13. Jednotlivé komponenty jsou označeny čísly, která odpovídají číslům uvedeným v textu této kapitoly. Komponenty zmíněné v předchozích kapitolách jsou motorový zesilovač (6) a optický enkodér (7) kalibračního zařízení.

6 ZÁVĚR

V práci je popsáno několik dílčích úloh spojených s řešením řídicího systému dvoukolého mobilního robotu. Po obecném popisu problematiky v úvodu následuje řešeršní část, popis použitého robotu, výběr senzorické soustavy, návrh řídicího systému a jeho realizace.

Úvod práce definuje mobilní inverzní kyvadlo a popisuje jeho základní vlastnosti z pohledu kinematiky a dynamiky. Také zmiňuje motivaci autora pro tuto práci.

Následující řešerše popisuje několik stávajících řešení s rozdílnými přístupy k řešené problematice. Poznatky z řešerše sloužily k následnému návrhu senzorického a řídicího systému.

Další část se zabývá popisem konkrétního robotu, na kterém je řízení realizováno. Kromě popisu konstrukce a osazených komponent je uveden také matematický model, jehož znalost je důležitá pro návrh řídicího systému. V této části je také navržen princip snímání náklonu robotu pro účely stabilizace. Na základě zvoleného principu jsou vybrány konkrétní měřicí prvky.

Hlavní částí práce je návrh řídicího systému. Řídicí systém je navržen hierarchicky a jedná se o soustavu několika rozhraní zpracovávající vstupy, regulátorů a rozhraní ovládající motory. Navrženou soustavu je možno rozdělit do několika bloků. Prvním z nich je řízení stability robotu, jehož cílem je kompenzace náklonu robotu. Následuje řízení pohybu robotu na základě vstupu uživatele a požadavku stabilizace. Poté jsou nezávisle řízeny pohony jednotlivých kol.

Navržený řídicí systém je realizován rovněž hierarchicky pomocí vývojového prostředí NI LabVIEW. Tato realizace není zcela dokončena vzhledem k několika zatím nevyřešeným technickým problémům. Tím pádem nebylo možno úplně ověřit správnou funkci navrženého řešení.

V blízké době je třeba odstranit problém připojení inerciální sensoriky a také zajištěním chybějících komponent umožnit přechod na finální hardwarovou platformu, tedy NI Single-Board RIO. Toto umožní integraci veškerých komponent řídicího systému do konstrukce robotu. Neprokáže-li se manuální metoda nastavení regulátorů jako dostačující, bude zvolena vhodná metoda nastavení na základě simulace matematického modelu.

V dlouhodobějším plánu je rozšíření řízení pohybu o možnost zatáčení na základě vstupu uživatele a implementace bezdrátového rozhraní pro ovládání robotu. Platforma mobilního inverzního kyvadla dále umožňuje aplikaci celé řady problematik automatického řízení, například autonomní navigaci s využitím zpracování obrazu.

7 LITERATURA

- [1] BARELLO, Larry. Gyrobot - a balancing robotic platform. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.barello.net/Robots/gyrobot/index.htm>
- [2] ANDERSON, David. NBot Balancing Robot. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://geology.heroy.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [3] PIPONI, Dan. Equibot the Balancing Robot. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://homepage.mac.com/sigfpe/Robotics/equibot.html>
- [4] SEGWAY INC. *Segway PT* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.segway.com/>
- [5] MAXON MOTOR. *Program 2010/11* [Katalog]. 2010.
- [6] FRADEN, Jacobs. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 2004, 589 s. ISBN 03-870-0750-4.
- [7] COLTON, Shane. The Balance Filter. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>
- [8] MPU-6000/6050: Six-Axis MEMS MotionTracking™ Devices. *InvenSense* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>
- [9] NI sbRIO-9606. *National Instruments* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/210003>
- [10] VEJLUPEK, Josef. *Řízení pohybu dvoukolého robotu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT FSI. Vedoucí práce Pavel Houška.
- [11] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-722-5030-2.
- [12] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 324 s. ISBN 978-80-214-3491-2.
- [13] WELCH, Greg a Gary BISHOP. *The Kalman Filter* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/index.html>
- [14] PYCKE, Tom. Kalman filtering of IMU data. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://tom.pycke.be/mav/71/kalman-filtering-of-imu-data>
- [15] Kalman Filtering. *Autopilot: Do it yourself UAV* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://autopilot.sourceforge.net/kalman.html>
- [16] SOUČEK, Ivan. *Pohony výrobních zařízení: Servomechanizmy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997.