



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ NESTABILNÍHO ROBOTY SE SFÉRICKOU ZÁKLADNOU

DESIGN OF THE CONSTRUCTION AND CONTROL ALGORITHM FOR AN UNSTABLE ROBOT WITH SPHERICAL BASE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FILIP ŠPILA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ SPÁČIL

BRNO 2017

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, výrobou a realizací řízení nestabilního robota, balancujícího na sférické základně, známého také pod názvem ballbot. Předpokládá se kompletní návrh konstrukce, výběr pohonných jednotek, návrh, implementace a testování inteligentního řídicího algoritmu, který udrží robota v metastabilní rovnovážné poloze. Při vývoji budou využity softwarové nástroje MATLAB/Simulink. Práce také počítá s využitím mikrokontroleru dsPIC jako platformy pro finální řízení celého systému. Zadáání projektu má interdisciplinární charakter a je realizováno jako týmová práce s jasně vymezenými úkoly pro jednotlivé členy.

Summary

This bachelor's thesis deals with the complete design, manufacture, and control of an unstable robot, balancing on a spherical base, also known as ballbot. The complete design of the construction, motor unit selection, design, implementation testing of an intelligent control algorithm to keep the robot in a meta-stable equilibrium is assumed. Multiple tools such as Matlab/Simulink are used for this approach. It also includes the final implementation of the code in the PIC microcontroller. The project has an interdisciplinary character and is meant to be done as teamwork whereby each team member has a strictly defined role.

Klíčová slova

Ballbot, konstrukce, inteligentní řízení, PID, MATLAB, Simulink

Keywords

Ballbot, construction, intelligent control, PID, MATLAB, Simulink

ŠPILA, F. *Návrh konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 28 s. Vedoucí Ing. Tomáš Spáčil.

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Filip Špila
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Spáčil
Akademický rok:	2016/17

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 konstrukce a řízení nestabilního robota se sférickou základnou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem a výrobou robota se sférickou základnou, známého také jako ballbot. Předpokládá se kompletní návrh konstrukce, volba pohonů, návrh řídicího algoritmu, testování robota a uvedení do provozu. Práce bude řešena jako týmová s jasným vymezením úkolů pro jednotlivé členy.

Při vývoji bude použita I/O karta MF624, finální řešení bude implementováno na mikrokontroleru PIC.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše různých konstrukčních provedení robotů typu ballbot.
- 2) Návrh a výroba vlastního konstrukčního řešení.
- 3) Výběr vhodného pohonu a otestování různých povrchových úprav sférické základny.
- 4) Realizace PID řídicího algoritmu, umožňující udržet robota v nestabilní rovnovážné poloze (pomocí karty MF624).
- 5) Implementace řídicího algoritmu do mikrokontroleru dsPIC.

Seznam doporučené literatury:

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01276-X.

NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-0-0-2.

SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení 1. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, software atd.) citované v práci a uvedené v příloženém seznamu a postup při zpracování práce je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně 1. května 2017

Filip Špila

Děkuji Ing. Tomáši Spáčilovi, Matěji Rajchlovi a celému týmu z Mechlabu za podnětné připomínky a rady, které mi během práce poskytli. Dále děkuji své rodině za podporu jak během studií, tak během psaní této práce.

Filip Špila

Obsah

1	Úvod	2
2	Přesná formulace problému a cíle	3
3	Rešerše	4
3.1	Vymezení pojmu ballbot	4
3.1.1	Typické prvky konstrukce	4
3.1.2	Sférická základna	4
3.2	Teoretický rozbor 2D úlohy	5
3.2.1	Rovnice pro matematický model soustavy	6
3.2.2	Přepoččet na reálný pohon soustavy	6
3.3	Metody inteligentního řízení	8
3.3.1	PID regulátor	9
3.4	Softwarové nástroje	9
3.4.1	Popis funkce External mode	10
3.4.2	Implementace	10
3.5	Příklady provedení ballbotů	11
4	Řešení a výsledky	13
4.1	Konstrukce robota	13
4.1.1	Omniwheels	14
4.1.2	Základna robota	14
4.1.3	Motorové klece	15
4.1.4	Pohonné jednotky	15
4.1.5	Přípravek pro kalibraci senzorů	16
4.1.6	Ochranný kryt	16
4.2	Sférická základna	17
4.2.1	Materiál a povrchová úprava	17
4.3	Řídící software a implementace	19
4.3.1	PID regulace bez zpětné vazby z pohonu	19
4.3.2	PID regulace se zpětnou vazbou z pohonu	21
4.3.3	Zpracování vstupního signálu	21
4.3.4	Finální implementace	21
4.3.5	Výsledky regulace	22
5	Závěr	24
6	Literatura	25
7	Seznam použitých zkratk a symbolů	27
8	Seznam příloh	28

1. Úvod

S postupným vývojem mikroelektroniky a řídicích inteligentních systémů se otevírá možnost implementovat složitější řídicí algoritmy do zařízení a robotů o relativně malých rozměrech. Tato práce se zabývá návrhem a realizací nestandardního robota, který vykazuje značnou míru nestability při balancování na sférické základně. Jedná se o typicky mechatronickou úlohu, jelikož v sobě zahrnuje funkční celky z více technických oborů (konstrukční návrh, elektronika, inteligentní řízení). Tyto přitom neoddělitelně tvoří výsledný mechatronický produkt. Ballboti, jak zní dnes již vžitý název pro tyto druhy robotů, mají některé prvky chování společné s inverzním kyvadlem a jejich řídicí algoritmus, zajišťující setrvání v nestabilní rovnováze, má velmi podobnou strukturu. Zde se však jedná o úlohu mající v klasické konstrukční variantě pět stupňů volnosti.

Systémy tohoto druhu nejsou zatím v praxi moc rozšířené. Jejich rozvoj může však do budoucna umožnit využití v samostatně pohybujících se robotických celcích, u kterých je kladen důraz na obratnost v přelidněných prostorách, úzkých chodbách apod. Lze také očekávat zájem zábavního průmyslu o zpřístupnění robota široké veřejnosti.

V rámci závěrečných studentských projektů bylo v mechatronické laboratoři MechLab na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně realizováno několik projektů s podobnými rysy, vycházejících z podobných fyzikálních předpokladů. Například práce Františka Zouhara [1], zabývající se návrhem nestabilního balancujícího vozidla, uvádí v rešeršní části práce mj. ballbota jakožto zařízení podobného charakteru. V laboratoři dále vzniká řada provedení čistě inverzního kyvadla.

2. Přesná formulace problému a cíle

Na začátku bylo potřeba stanovit požadavky a koncept celého zařízení. Jelikož se jedná o projekt vyžadující znalosti z více oblastí techniky, byl sestaven seznam rozdělení úkolů mezi jednotlivé členy týmu takto:

Filip Špila

- Návrh a výroba celé konstrukce, včetně sférické základny
- Výběr pohonných jednotek
- Návrh řídicího algoritmu pomocí PID regulátoru
- Implementace programu do mikrokontroleru dsPIC, testování a ladění

Matěj Rajchl

- Návrh a výroba řídicí a výkonové elektroniky
- Softwarové zprovoznění všech částí elektroniky a periferií
- Otestování různých metod získávání úhlu natočení s využitím vhodných senzorů

3. Rešerše

3.1. Vymezení pojmu ballbot

Ballbot je robotické zařízení, které udržuje nestabilní rovnovážnou polohu na sférické základně. Akční zásah provádí pouze robot, základna je pasivním prvkem a nijak se na regulaci nepodílí. Poloha robota na sférické základně je získávána vhodným přepočtem ze senzoru zrychlení (akcelerometr) a úhlové rychlosti (gyro).

3.1.1. Typické prvky konstrukce

Typické provedení konstrukce těla ballbota se skládá ze základny, tří motorů umístěných rovnoměrně po 120 stupních a speciálních kol, tzv. omniwheels.¹ Nevšední provedení těchto kol umožňuje jejich valení jedním směrem a zároveň pohyb ve směru laterálním s velmi malým odporem. To je dosaženo prostřednictvím valivého pohybu elementárních válečků rozmístěných po obvodu. Jejich konkrétních variant lze najít několik. Liší se velikostí, počtem řad a úhlem natočení pomocných válečků. Uplatňují se s výhodou v nejrůznějších robotických aplikacích, vyžadujících schopnost pohybovat se v malém prostoru.



Obrázek 3.1: Příklad provedení kol typu omniwheel [2] [3]

3.1.2. Sférická základna

Jako základna pro balancování může být použit v podstatě jakýkoliv předmět kulového tvaru, který má ideální povrch a rovnoměrné rozložení hmoty kolem geometrického středu. Velikost koule a její hmotnost přitom ovlivňují celkovou dynamiku systému. Větší hmotnost způsobí posunutí těžiště celého systému směrem ke středu Země a zvětšení osového momentu setrvačnosti. Soustava se tím stává přirozeně stabilnější, neboť narůstá moment potřebný pro uvedení koule do valivého pohybu. Zvětšením poloměru, a tedy oddálením robota od pólu pohybu, dochází ke zvýšení rozlišení rozpoznávání úhlu a prodloužení reakční doby pro zásah regulace.

Dynamika pohybu robota velmi závisí na součiniteli suchého tření mezi sférickou základnou a koly. Ten lze ovlivnit vhodnou povrchovou úpravou základny, případně materiálem kol. Zvýšením tuhosti koule dochází ke snížení valivého odporu a je tedy výhodné použít tuhý kulový podklad (kov, ABS) a nanést na něj vhodný povrchový materiál. Toto řešení bývá v praxi však technologicky těžko realizovatelné.

¹Prozatím neexistuje ekvivalentní pojmenování v češtině

3.2. Teoretický rozbor 2D úlohy

Pro účely regulace úhlového natočení robota lze použít určitých zjednodušení, která převádějí prostorový pohyb sférické základny na tři 2D úlohy.² Ty vzniknou průmětem pohybu do třech ortogonálních rovin, přičemž pohyb ve dvou vertikálních rovinách má stejný charakter jako úloha s inverzním kyvadlem a pohyb v horizontální rovině popisuje rotaci robota kolem svislé osy [4]. V každé z rovin je zavedeno virtuální kolo, provádějící regulační zásah změnou své úhlové rychlosti. Zásahy virtuálních kol jsou poté přepočítány na ekvivalentní zásah reálně umístěných omniwheels. V této konfiguraci má soustava v každé z rovin dva stupně volnosti – jedním je valení základny a druhým je valení virtuálního kola. Rozvahy jsou dále založeny na těchto předpokladech [4]:

- Pohyby ve dvou vzájemně kolmých rovinách jsou na sobě nezávislé
- Dochází pouze k horizontálnímu pohybu celé sestavy po rovné ploše
- Žádné deformace – předpokládají se dokonale tuhá tělesa, tedy sférická základna i robot se třemi dosedajícími omniwheels. Deformace země je v kontaktu se základnou rovněž zanedbána
- Omniwheels – konstrukce dvouřadých kol je zjednodušena na kolo jednořadé s jedním bodem dotyku
- Pasivní účinky – kromě suchého tření jsou všechny ostatní druhy tření zanedbány
- Žádný prokluz – mezi koulí a omniwheels ani mezi koulí a zemí nedochází k vzájemnému prokluzu
- Stálý kontakt – předchozí podmínka zaručuje neustálý kontakt mezi všemi prvky soustavy
- Je zajištěna holonomnost vazby mezi kolem a povrchem koule³

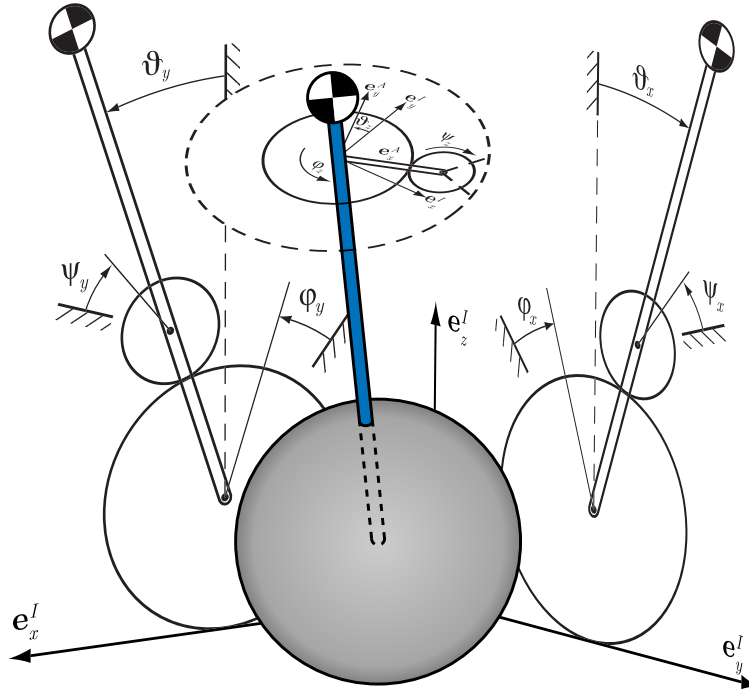
²Úplný matematický popis 2D i 3D úlohy lze nalézt například v [4] [5]

³Holonomnost je zajištěna virtuálním spojovacím ramenem. V reálné soustavě se oproti 2D zjednodušení vyskytuje neholonomní vazba mezi kolem a sférickou základnou a mezi základnou a zemí.

3.2. TEORETICKÝ ROZBOR 2D ÚLOHY

3.2.1. Rovnice pro matematický model soustavy

Za výše uvedených předpokladů je možné pomocí Lagrangeovy metody sestavit pohybové rovnice pro pohyb ve virtuální rovině, přičemž rovnice jsou v tomto případě pro dvě vertikální roviny xz, yz shodné, viz obr. 3.2. Podrobný postup při odvozování rovinného matematického modelu soustavy je popsán v [4].



Obrázek 3.2: Schéma tří rovinných modelů (převzato z [4])

Při znalosti všech potřebných parametrů soustavy dostaneme diferenciální rovnice popisující pohyb virtuálního kola a virtuální kulové základny robota.

Jelikož v této práci není řízení robota založeno na znalosti matematického modelu soustavy, byly výsledné rovnice použity pouze pro odhad potřebných parametrů virtuálních pohonných jednotek. Údaje pak byly porovnány s možnostmi reálných motorů, které jsou popsány v praktické části této práce.

3.2.2. Přepočítání na reálný pohon soustavy

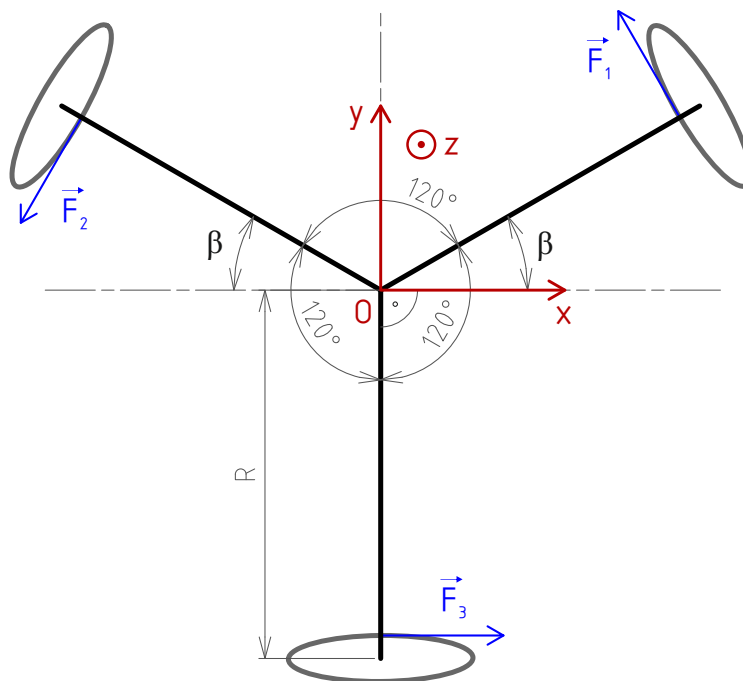
Cílem této části je pomocí inverzního postupu získat převod mezi regulačním zásahem virtuálních kol v rovinách xz, yz, xy na zásah reálně rozmístěných pohonů. Označme úhly natočení virtuálních kol postupně jako Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z - ty budou vstupními parametry výpočtu. Pokud úhly natočení omniwheels robota označíme $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, pak hledané funkce budou mít obecný tvar

$$\varphi_1 = f(\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z) \quad (3.1)$$

$$\varphi_2 = f(\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z) \quad (3.2)$$

$$\varphi_3 = f(\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z) \quad (3.3)$$

Předpokládejme nyní obvykle používanou konfiguraci sestavy zkoumaných těles, tedy sférická základna bez pohonných jednotek, na kterou přímo dosedají tři kola s elektromotory a tyto spolu svírají úhel 120 stupňů. Výchozí rozložení sil pro sestavení pohybových rovnic je znázorněno na obr. 3.3. Jedná se o zjednodušené zobrazení, ve kterém je reálná geometrie zachována jen částečně – osy motorů a svislá osa z svírají přesně 90° a úloha je tedy promítnuta do roviny, ve které se odehrává pouze horizontální pohyb. Dále hmotnost spojovacích součástí mezi koly je zanedbána a veškerá hmotnost robota M je tak rovnoměrně rozdělena do kol.



Obrázek 3.3: Schéma rozestavení skutečných pohonů [7]

Nyní lze sestavit pohybové rovnice ve tvaru

$$Ma_x = -F_1 \sin(\beta) - F_2 \sin(\beta) + F_3 \sin(\beta) \quad (3.4)$$

$$Ma_y = F_1 \cos(\beta) - F_2 \cos(\beta) + F_3 \cos(\beta) \quad (3.5)$$

kde M je celková hmotnost robota. Sestavením momentových rovnic v ose z vztažených k souřadnému středu O získáme postupnou úpravou

$$I\alpha_z = R(F_1 + F_2 + F_3) \quad (3.6)$$

$$MR^2\alpha_z = R(F_1 + F_2 + F_3) \quad (3.7)$$

$$MR\alpha_z = F_1 + F_2 + F_3 \quad (3.8)$$

3.3. METODY INTELIGENTNÍHO ŘÍZENÍ

Po dosazení číselných hodnot funkcí $\sin(\beta)$ a $\cos(\beta)$ do rovnic (2.4, 2.5 a 2.8) dostaneme v maticové podobě

$$\begin{bmatrix} Ma_x \\ Ma_y \\ MR\alpha_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Nechť je zrychlení těžiště kola vyjádřeno jako $a = r \frac{d\omega(t)}{dt}$. Pak řešením této soustavy rovnic [7] pro neznámé F_1, F_2, F_3 a jejich následnou integrací podle času dostaneme pro úhlová natočení kol tyto funkce

$$\varphi_1 = \frac{-0.33x + 0.58y + 0.33R\Psi_z}{r} \quad (3.10)$$

$$\varphi_2 = \frac{-0.33x - 0.58y + 0.33R\Psi_z}{r} \quad (3.11)$$

$$\varphi_3 = \frac{-0.67x + 0.33R\Psi_z}{r} \quad (3.12)$$

kde r je poloměr kola. Po zavedení substituce a úpravě dostaneme finální tvar

$$x = \Psi_x r$$

$$y = \Psi_y r$$

$$\varphi_1 = -0.33\Psi_x + 0.58\Psi_y + \frac{0.33R}{r}\Psi_z \quad (3.13)$$

$$\varphi_2 = -0.33\Psi_x - 0.58\Psi_y + \frac{0.33R}{r}\Psi_z \quad (3.14)$$

$$\varphi_3 = -0.67\Psi_x + \frac{0.33R}{r}\Psi_z \quad (3.15)$$

3.3. Metody inteligentního řízení

Pro udržení robota s metastabilní rovnováže je obecně potřeba regulovat jeho úhlové natočení a polohu v prostoru. Logika návrhu regulátoru přitom může vycházet z různých předpokladů, od čehož se odvíjí výsledná rychlost, přesnost a celkové možnosti regulace. Jedním přístupem je řízení založené na kompletní znalosti vnitřní fyzikální podstaty systému a jeho následné linearizaci. Příkladem je metoda stavového zpětnovazebního řízení.

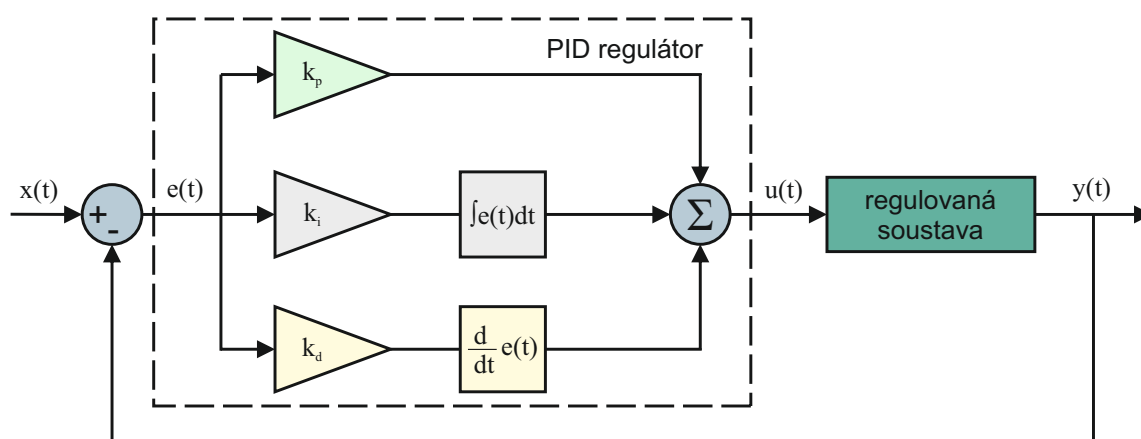
Druhý přístup nepracuje s přesným matematickým popisem systému, ale využívá znalost pouze vstupních a výstupních veličin. Jejich porovnáním vzniká tzv. chyba regulace, která po zesílení tvoří výsledný akční zásah. Předpokládá se přitom, že regulovaná soustava v daném pracovním bodě vykazuje lineární chování. Optimalizace řízení soustavy se v praxi často provádí experimentálním naladěním parametrů PID regulátoru.

Zatímco PID regulátor řídí soustavu pouze se zpětnou vazbou od výstupní veličiny, stavový regulátor využívá zpětné vazby od všech proměnných reprezentujících jednotlivé

stavy [6]. Má tedy většinou více informací o průběhu přechodných dějů a umožňuje tak kvalitnější řízení soustav vyšších řádů.

3.3.1. PID regulátor

PID regulátor se využívá ve zpětnovazební regulaci výstupních veličin nejrůznějších systémů. Jeho přenosová funkce je složena z proporcionální, integrační a derivační složky. Složka proporcionální se chová jako ideální zesilovač a její amplitudová a fázová charakteristika jsou frekvenčně nezávislé. Přenos integrační složky odpovídá čisté integraci vstupního signálu. Amplituda je zde však závislá na frekvenci, stejně jako u derivační složky. Obě tyto složky také posouvají fázi vstupního signálu o 90 stupňů. Celkový přenos regulátoru závisí na poměru zesílení těchto tří složek. Obr. 3.4 ukazuje obecné schéma PID regulační smyčky.



Obrázek 3.4: Obecné schéma zpětnovazební PID regulace

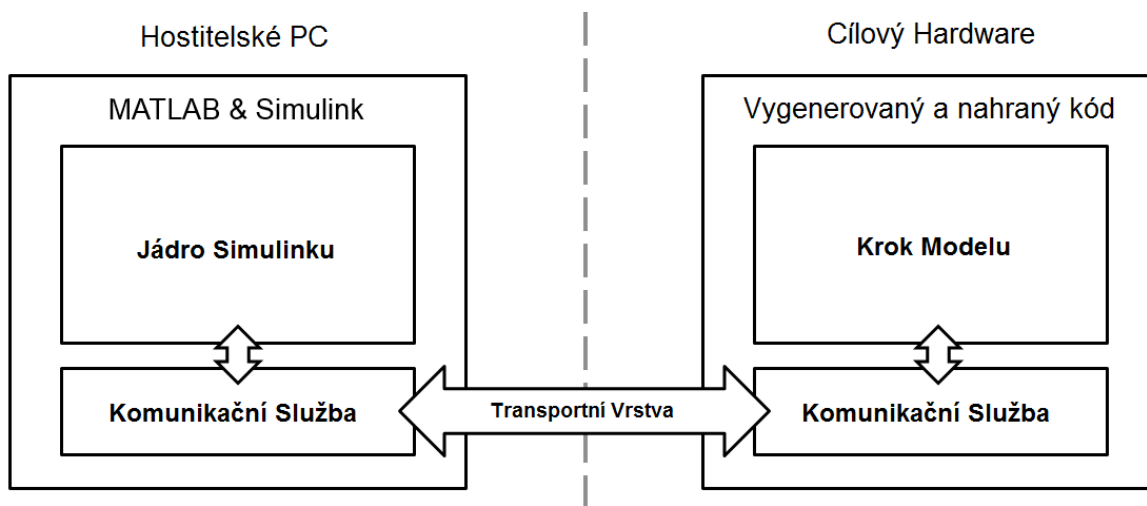
Řídící smyčku lze strukturovat několika způsoby, zejména v případě, kdy je potřeba regulovat více veličin najednou. Při řízení balancujícího robota, inverzního kyvadla a podobných systému jsou těmito veličinami úhlové natočení a absolutní poloha v prostoru. K tomu je možné využít kaskádní řazení regulátorů nebo jejich paralelní zapojení. Naladit však takovou smyčku experimentálně je již poměrně náročné.

3.4. Softwarové nástroje

Při vývoji lze s výhodou použít funkce nástrojů MATLAB a Simulink. Pomocí nich lze například provádět modelování celé soustavy a regulátoru. Matematický model může sloužit například pro výběr vhodných pohonů, případně k určení dalších parametrů soustavy potřebných k návrhu zařízení. Stejný software lze v kombinaci s vhodným hardwarem použít pro změnu parametrů řídicího kódu v reálném čase. K těmto účelům lze po nahrání kódu do mikrokontroleru spustit komunikaci s prostředím Simulink pomocí režimu External mode, který tak umožňuje výrazně urychlit vývoj a konečné ladění.

3.4.1. Popis funkce External mode

Funkce External mode (dále jen EM) vytváří komunikační službu mezi hostitelským PC a cílovým hardwarem [10]. Komunikace probíhá mezi jádrem Simulinku a vygenerovaným kódem na zařízení. Služba izoluje proces modelu na desce hardwaru od kódu a od transportní vrstvy, která zajišťuje formát, vysílání a přijímání datových paketů. Na hostitelském PC dochází k příjmu dat přes tuto vrstvu a k aktualizaci modelového prostoru v Simulinku. Obr. 3.5 ukazuje schéma spojení, které komunikační služba EM vytváří mezi oběma zařízeními.



Obrázek 3.5: Blokové schéma režimu External mode (převzato z [10])

Komunikaci lze zajistit pomocí sběrnice UART. EM sice umožňuje oboustrannou komunikaci, avšak posílání dat do PC vyžaduje velkou šířku pásma a pro vysoké frekvence může být problematické. Pro změnu parametrů PID regulátoru postačí v praxi komunikace jednosměrná. Podrobné informace o fungování EM lze nalézt na webu Mathworks [10].

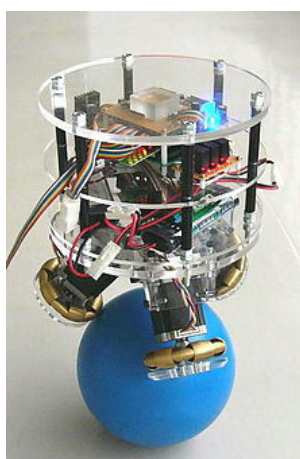
3.4.2. Implementace

Jako platforma pro finální implementaci programu slouží mikrokontroler dsPIC. Obsahuje v sobě řadu periférií pro obsluhu speciálních vnějších zařízení, například rozhraní pro enkódování signálu z inkrementálního čítače (QEI) a mnoho dalších.

Díky podpoře od firmy Microchip je umožněno poměrně snadno mikrokontroleru nastavit nejrůznější vstupy a výstupy, komunikaci přes sběrnici UART v režimu EM apod. a to přímo z prostředí Simulinku. K tomu slouží speciální sada bloků zvaná Device Blocks for Simulink (dále jen DBS), která tato nastavení automaticky vloží do generovaného C kódu. Za využití dcPIC programátoru lze kód následně nahrát přímo do cílového hardwaru. Tato sada rapidně zrychluje vývoj celého softwaru. Má však i svá omezení, a proto je dobré vhodně kombinovat automaticky vygenerovaný kód s funkcemi přímo napsanými v jazyce C. Jako podpora slouží web jednoho z vývojářů [15], kde lze nalézt detailní popis funkcí jednotlivých bloků.

3.5. Příklady provedení ballbotů

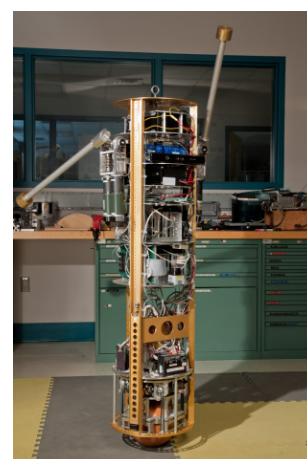
1. **CMU Ballbot** – První z ballbotů, CMU [8], byl vyvinut v roce 2006 na Carnegie Mellon University v USA. Jeho velikost dosahovala vzrůstu průměrně vysokého člověka. Sférickou základnou byla hliníková koule o průměru 20 cm. Mechanismus pro pohyb s koulí byl velmi podobný mechanismu v klasické kuličkové počítačové myši. Ve finální verzi byl implementován PID regulátor jak pro regulaci balancování, tak pro regulaci pozice robota v prostoru.
2. **TGU Ballbot** – Tento robot vyvinutý v roce 2008 na Tohoku Gakuin University [9] se vyznačuje menšími rozměry než robot CMU. Konstrukce využívá omniwheels pro kontakt se sférickou základnou, jejíž velikost jako v případě CMU přibližně odpovídá hracímu míči. Tento robot se vyznačoval velkou zatížitelností (až 10 kg). Řízení se skládá ze dvou simultánních PD regulátorů pro balancování a udržování pozice v prostoru. Parametry regulátorů byly naladěny experimentálně.
3. **BB-8 replika od xrobots.co.uk** – Tento ballbot [13] se oproti předchozím provedením liší svou konstrukcí, celkovou jednoduchostí provedení a počtem pohonných jednotek – čtyři omniwheels rozmístěné do kříže. Jako sférická základna je použita lehká polystyrenová koule o průměru 50 cm. Takto velký průměr má vliv na říditelnost robota, jelikož úhel mezi svislou osou a normálou k povrchu koule v bodě dotyku s kolem omezuje schopnost robota řídit směr pohybu celé sestavy. S použitým PD regulátorem úhlového natočení se pouhou změnou žádaného vstupu podařilo implementovat jednoduché ovládání pozice, které má však velmi omezené možnosti.
4. **Ballbot ze Swinburne University of Technology Sarawak Campus [7]** – Robot konstrukčně podobný modelu TGU. Pro řízení využívá PID regulátor úhlového natočení s experimentálně naladěnými parametry.



(a) TGU ballbot [9]



(b) Xrobots BB-8 [13]



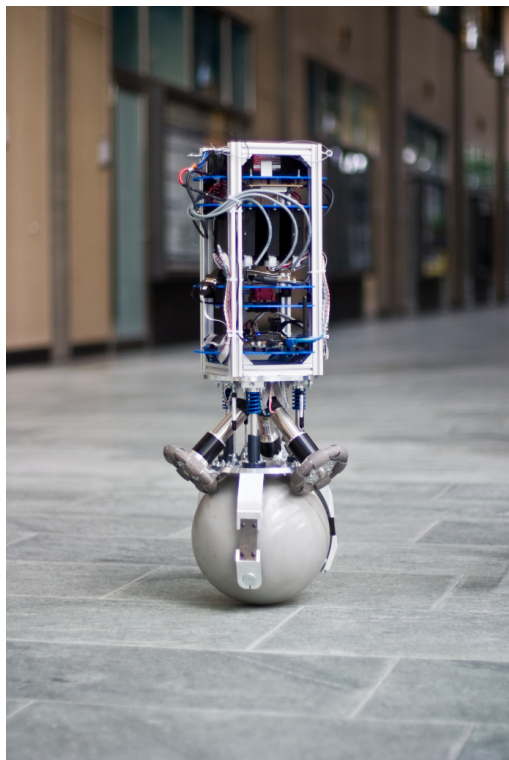
(c) CMU ballbot [11]

Obrázek 3.6: Příklad provedení robotů typu ballbot

Všechny výše uvedené varianty (1-4) mají implementované řízení založené na 2D modelu soustavy (kap. 3.2), kdy je akční zásah motorů přepočten na reálné pohony.

3.5. PŘÍKLADY PROVEDENÍ BALLBOTŮ

5. **Rezero** – Spolková vysoká technická škola v Curychu vyvinula tohoto robota [4] v roce 2010. Finální řízení je provedeno použitím nelineárního regulátoru a je založeno na 3D modelu soustavy. Jedná se o velmi komplexní a precizně provedenou verzi, která má rozsáhlé možnosti nejen udržování stále polohy, ale také aktivního pohybu v prostoru s možností přímého kontaktu s uživateli. V práci je mj. také popsán 2D matematický model, pro který byl sestaven a simulačně ověřen polohový PID regulátor.



Obrázek 3.7: Robot Rezero (převzato z [4])

4. Řešení a výsledky

4.1. Konstrukce robota

Navržený robot se svojí koncepcí nejvíce podobá robotu BB-8 [13]. Jeho velikost je v poměru ke sférické základně menší, než bývá pro klasické ballboty obvyklé. To má sice za následek omezenou schopnost robota aktivně určovat směr pohybu¹, avšak výhodou se stává prodloužení reakční doby na provedení regulačního zásahu. Dynamika celé soustavy je však od robotů [4] [9] [8] [7] odlišná, jelikož hmotnost konstrukce a moment setrvačnosti námi navrhovaného provedení jsou poněkud menší. Tento fakt ubírá systému na stabilitě a nutnost rychlejších akčních zásahu pro vyrovnání úhlového natočení. Geometrie rozmístění kol má stejnou podobu jako u většiny ballbotů, tedy tři motorové jednotky rozmístěné po 120 stupních. Oproti modelu BB-8 se jedná o uložení, ve kterém je zajištěn stálý kontakt všech kol s povrchem koule.

Konstrukce byla před zadáním do výroby kompletně vymodelována v 3D modeláři, což umožnilo nejen dobrou vizuální kontrolu vzájemného dosedání všech částí, ale umožnilo jednoduchý export pro účely 3D tisku. Výsledná hmotnost celé konstrukce včetně motorů je 1,43 kg. Přednostmi navrhovaného konstrukčního řešení jsou především:

- Možnost adaptovat robota na různé poloměry sférické základny
- Přesnost rozměrů díky 3D tisku, pevnost a malá hmotnost hlavních částí konstrukce
- Celková robustnost
- Lákavý a moderní design



Obrázek 4.1: Vizualizace navrhovaného konstrukčního řešení

¹Možné budoucí rozšíření práce

4.1. KONSTRUKCE ROBOTA

4.1.1. Omniwheels

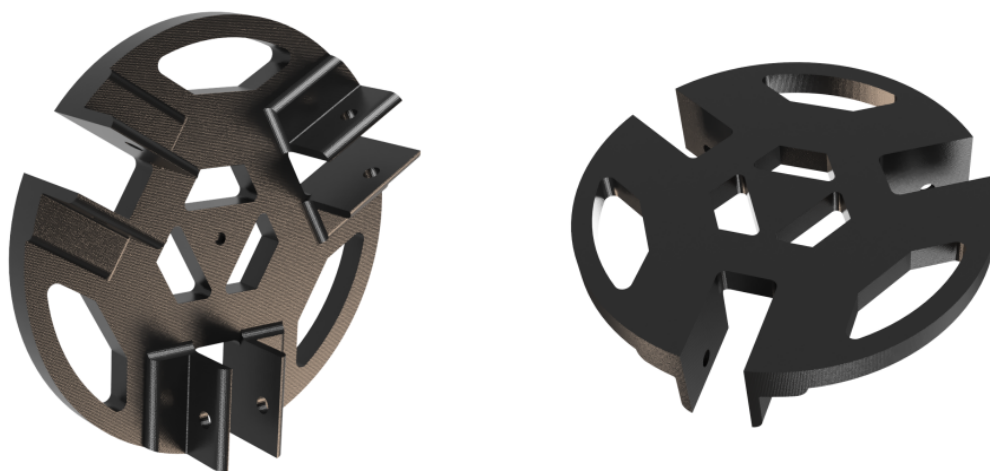
Přes vymezovací váleček je ke každé hřídeli připevněno dvouřadé kolo typu omniwheel. Výhodou těchto kol je nízká hmotnost, gumové provedení valivých elementů a přijatelná cena. Bohužel však dodávané vymezovací válečky neumožňují tvarově připevnit námi vybraný tvar hřídele DC motoru, proto jsou použitý spojovací komponent ² vyroben na zakázku.



Obrázek 4.2: Sestava jedné z pohonných jednotek včetně motorové klece

4.1.2. Základna robota

Hlavním prvkem nosné konstrukce je základna robota, vyhotovená 3D tiskem. ³ Ze spodní desky vybíhají profily na upevnění motorových klecí. Do prostřední části byly z technologických důvodů (tepelná dilatace) umístěny otvory lichoběžníkového tvaru. Ty zároveň slouží jako tvarové spojení s podstavcem pro vyrovnání horizontu.



Obrázek 4.3: Finální verze základny robota po 3D tisku

²Výrobní výkres je součástí přílohy

³Všechny 3D části jsou vytisknuty z PLA

4.1.3. Motorové klece

Pro uchycení DC motorů byly navrženy speciální tvarově odpovídající kryty. Na bočních stěnách jsou umístěny díry pro zajišťovací šrouby M8. V předním panelu se nacházejí otvory pro přichycení k čelu převodovky motoru. Sestava s pohonnými jednotkami je znázorněna na obr. 4.2. Pro vyplnění mezery v dutině mezi motorem a klecí slouží vymezovací podložky, sloužící zároveň jako matice pro zajišťovací šrouby.

4.1.4. Pohonné jednotky

Na základě 2D modelu soustavy mohly být stanoveny přibližné parametry motorových jednotek. Klíčová byla volba maximální obvodové rychlosti a točivého momentu. Při výběru byl kladen důraz na kompaktní rozměry, tvarově vhodné pro uchycení v konstrukci a možnost pořízení verze s enkodérem. Na obrázku je 12-ti voltový DC motor Transmotec PG220 s planetovou převodovkou a enkodérem, který plně vyhovoval našim požadavkům. Jeho jmenovité parametry jsou uvedeny v tabulce.



Obrázek 4.4: Motor PG220 s planetovou převodovkou (bez enkodéru) [12]

Jmenovité parametry DC motoru PG220 s planetovým převodem 19:1					
U [V]	I [mA]	M [$g \cdot cm$]	n [ot/min]	P [W]	m [g]
12	200	295	348	1,5	62

Součástí motorů jsou inkrementální čítače polohy s hallovými sondami. Rozlišení čítače jsou 3 pulzy/otáčka⁴. Později se toto rozlišení ukázalo pro regulaci otáček motorů nedostatečné a v budoucnu by bylo vhodné čítač vyměnit za optický.

⁴Rozlišení je násobeno převodem 19:1, tedy 1 otáčka kola odpovídá ve výsledku 57 pulzům

4.1. KONSTRUKCE ROBOTA

4.1.5. Přípravek pro kalibraci senzorů

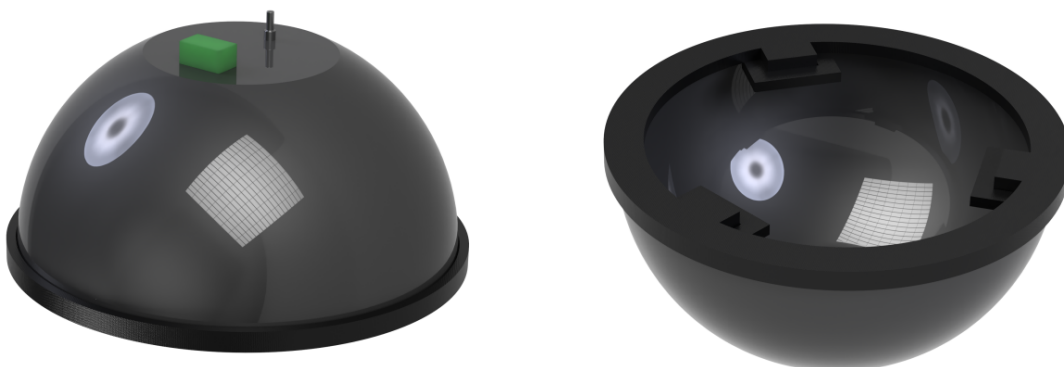
Pro kvalitní a přesnou regulaci je potřeba co nejpřesněji určit vodorovnou polohu všech používaných senzorů a vyrovnat jejich případný offset. K tomuto účelu byl navržen speciální přípravek, který svými výstupky přesně zapadá do spodní části základny robota. Případná odchylka od vodorovné polohy se upraví pomocí třech aretačních šroubů M6. Kritickým bodem této metody je přesnost měřidla použitého při vyrovnávání⁵, což dává prostor k případnému rozšíření práce.



Obrázek 4.5: Přípravek pro kalibraci senzorů

4.1.6. Ochranný kryt

Za účelem ochrany veškerých prvků elektroniky před nárazem a vnějšími vlivy byl z běžně dostupných prostředků vyhotoven ochranný kryt. Na jeho vrcholu se nachází rovná plocha, ze které vystupují konektory pro komunikaci přes rozhraní UART, programování mikrokontroleru a hlavní vypínač. Kryt je na konstrukci robota připevněn přes plastový prstenec. Ten má po obvodu umístěny tvarové výčnělky, které přesně zapadnou do prostoru pro vymezení motorových klecí. Prstenec je z technologických důvodů 3D tisku tvořen ze čtyř částí slepených v jeden celek.



Obrázek 4.6: Pohled na sestavení krytu s prstencem

⁵Při experimentech byla prozatím použita klasická vodováha

4.2. Sférická základna

Během testování robota v provozu byly použity dva druhy sférické základny, přičemž v obou případech se jedná o koule větších rozměrů, než je obvyklé pro většinu ballbotů zmíněných v kap. 3.5.

4.2.1. Materiál a povrchová úprava

První verzí byla koule vyrobená z komerčně dostupné polystyrenové sféry o vnějším průměru 50 cm, která se prodává jako dvě samostatné duté polokoule. Zde největší problém spočíval ve zpracování povrchu. Pro dosažení maximálního součinitele tření v kontaktu s koly se jako optimální varianta jeví pogumovaný povrch. Z technologického hlediska je však problém najít takový materiál v tekuté podobě a s možností nanášení v běžných podmínkách, bez použití speciálního vybavení.



Obrázek 4.7: Polystyrenová dvoudílnná sféra, průměr 50 cm [17]

Dalším velkým problémem je chemická struktura polystyrenu, jehož polymerové řetězce jsou naprostou většinou organických rozpouštědel degradovány. Z tohoto důvodu musela být nejdříve nanesena silná podkladová vrstva, která agresivní rozpouštědla spolehlivě oddělí od polystyrenu. K těmto účelům byla použita fasádní silikonová barva, odolná vůči vnějším vlivům a určená speciálně pro kontakt s podobnými zateplovacími materiály.

Pro finální úpravu byla první volbou tzv. tekutá gumová fólie⁶, kterou je možné zakoupit ve spreji. Bohužel při jejím nanášení na testovací vzorek došlo i přes značnou sílu ochranné vrstvy k naleptání podkladu a tato varianta musela být zamítnuta.

Nejlepších výsledků bylo překvapivě dosaženo s běžně dostupným disperzním lepidlem Herkules, které po aplikaci v silné vrstvě vytvoří v kontaktu s gumovým kolem vysoký třecí součinitel. Tento nátěr mj. dobře řeší problém otláčením nerovností podkladu do povrchu koule a tím prodlužuje její životnost.

⁶Plastidip

4.2. SFÉRICKÁ ZÁKLADNA

Při finálním testování se i přes veškerou výše uvedenou snahu nejlépe osvědčil gymnastický míč o průměru 55 cm. Díky jeho gumovému povrchu bylo dosaženo optimálního součinitele tření a během testování téměř nedocházelo k prokluzování kol robota.



Obrázek 4.8: Gymnastický balón, průměr 55 cm [18]

Veškeré pokusy o zvýšení hmotnosti obou testovaných základen skončily neúspěchem. Na materiál pro vyplnění dutiny polystyrenové koule jsou kladeny příliš specifické požadavky, a to zejména na hmotnost, strukturu a prodejní dostupnost. Při experimentu plnění dutiny gymnastického balónu pomocí polyuretanové montážní pěny došlo po několika dnech k popraskání a sražení polyuretanu. Tato metoda je nepoužitelná i z důvodu nerovnoměrnosti rozložení hmotnosti uvnitř balónu.

4.3. Řídicí software a implementace

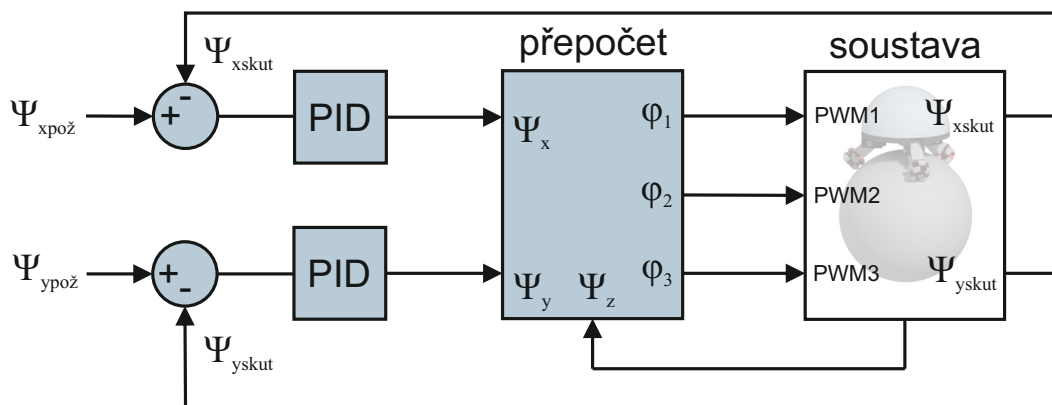
Tato část práce pojednává o vývoji a finální implementaci řídicího PID algoritmu. Během vývoje prošla řídicí smyčka několika změnami, které byly mimo jiné závislé na aktuální verzi použité elektroniky ⁷. Použitým softwarem byl MATLAB a Simulink verze 2015b s nainstalovanou sadou bloků Microchip DBS (3.4.2).

Veškeré regulační struktury popisované v této části jsou založeny na předpokladech v kap. 3.2, tedy že regulace úhlového natočení probíhá ve třech nezávislých rovinách a zásah je následně přepočítán na pohony reálné soustavy. Ve smyčce jsou vždy přítomny současně pracující PID regulátory se shodně nastavenými parametry pro pohyb ve dvou vertikálních rovinách. Třetí regulátor natočení kolem svislé osy má pouze proporcionální složku a je v kaskádě zapojen pouze v poslední podřazené smyčce. Osy IMU jednotek jsou na zařízení orientovány tak, že spolu tvoří souřadný systém totožný s osami x, y, z popsány v rozboru (obr. 3.3).

4.3.1. PID regulace bez zpětné vazby z pohonu

Ideální PID struktura

Nejjednodušší ideální podoba řídicí smyčky je znázorněna blokovým schématem na obr. 4.9. Tato varianta umožňuje regulovat pouze polohu robota na sférické základně, nikoliv jeho polohu v prostoru. ⁸ Vstupní žádanou hodnotou je nulové úhlové natočení ve virtuální rovině, které je porovnáváno se skutečným natočením v osách IMU jednotky. Zásah regulátorů a je veden do přepočtu na tři reálná omniwheels. Odtud pak žádaný zásah přímo reprezentuje střidu pulzní šířkové modulace (PWM) a je přiveden na motory.



Obrázek 4.9: Blokové schéma ideální řídicí smyčky

Tato metoda nepracuje s žádnými veličinami měřenými přímo na motorech. Při testování se ukázalo, že implementace této metody i po dlouhém experimentálním ladění PID parametrů nepřináší uspokojivé výsledky. Další nedostatek této metody je identický jako při regulaci inverzního kyvadla, kde může během regulace svislé polohy rameno vyjet z

⁷Druhá verze elektroniky poskytovala možnost získávání dat z pohonných jednotek

⁸Tento přístup je implementován například v [13]

4.3. ŘÍDÍCÍ SOFTWARE A IMPLEMENTACE

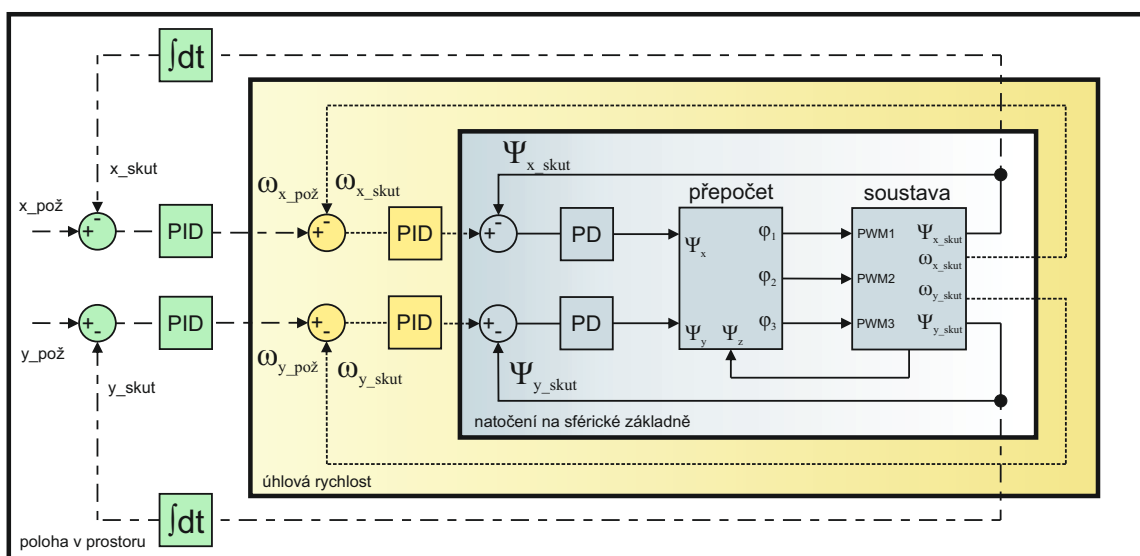
oblasti pojezdu a je proto potřeba ho zároveň udržovat v těchto mezích. Stejná logika může být aplikována na ballbota, který se ve snaze vyregulovat nulové natočení značně pohybuje v prostoru, který v praxi bývá omezený.

Regulátor úhlové rychlosti

Schéma řídicí smyčky, popsané např. v [16] využívá kaskádního řazení regulátoru úhlového natočení jako vnořené smyčky a regulátoru úhlové rychlosti jako smyčky nadřazené. Všechny hodnoty úhlu jsou získávány z IMU jednotek vhodným přepočtem, přičemž údaj o úhlové rychlosti lze po filtraci vést přímo z gyro senzoru. Naladěním PID parametrů bylo dosaženo lepších výsledků než v případě 1. Pohyb robota je plynulejší a reakce na změnu polohy probíhá rychleji. Regulátor natočení kolem svislé osy je v kaskádě zapojen pouze v podřazené smyčce.

Udržování polohy v prostoru

Kaskádním zařazením regulátoru polohy vznikne nové regulační schéma (obr. 4.10). Vstupním parametrem regulátoru je časový integrál úhlového natočení. Fyzikálně tato veličina není popsána, avšak nese v sobě informaci o tom, jak dochází k vychylování robota z rovnovážné polohy v prostoru. Příslušný PI regulátor se tak snaží velikostí zpětného zásahu tento integrál udržovat na nulové hodnotě. Regulace zajišťuje stále směřování os sensorů počátečním směrem a odpadá tedy potřeba kompenzovat případné zmatení regulátoru odchýlením z původního směru. V praxi se tato kaskádní struktura ukázala být nejvíce účinnou a byla tedy použita ve finální implementaci. Parametry PID jsou laděny experimentálně.



Obrázek 4.10: Blokové schéma výsledné kaskádní regulační smyčky

4.3.2. PID regulace se zpětnou vazbou z pohonu

Při regulaci může nastat problém s různými nelinearitami chování systému. Významný podíl na nich má tření v planetové převodovce motoru a tření mezi povrchem kola a sférické základny. V případě, že se tento vliv nepodaří vykompenzovat polohovým PID regulátorem, je možné do řídicí smyčky za výstup polohové regulace přepočtené na reálný pohon zařadit regulátor otáček motoru.

Během testování se ukázalo, že použité motory mají příliš malé rozlišení inkrementálního snímače a v nízkých rychlostech je signál derivace úhlového natočení pilovitý a skokový. Tento problém lze do budoucna odstranit vylepšením/výměnou stávajících hallových sond za optozávory, popřípadě implementováním jiného algoritmu pro enkódování signálu.

U řady aplikací s použitím DC motorů bývá obvyklé použít regulátor proudu. Za podmínky stálého kontaktu kola s povrchem koule by tato regulace měla podobný účinek, jako v případě otáčkové regulace.⁹ Tato metoda však v momentě ztráty kontaktu naprosto selhává, což ji pro tuto aplikaci činí nepoužitelnou.¹⁰

4.3.3. Zpracování vstupního signálu

Při regulaci nastává častý problém se špatnou kvalitou signálu z numerické derivace. Z tohoto důvodu je nutné zařadit do smyčky vhodnou filtraci za, případně i před bloček s derivací. V tomto případě bylo dosaženo uspokojivých výsledků při použití klouzavého průměru, který vyfiltruje vstupní signál ještě před derivací. Za tento filtr je dále zařazena dolní propust s experimentálně naladěnou časovou konstantou.

Důležitým krokem algoritmu je počáteční kalibrace senzorů polohy. K tomuto účelu byl navržen speciální přípravek (kap. 4.1.6), který lze pomocí trojice šroubů nastavit do vodorovné polohy a zjistit tak počáteční offset senzorů. Tento problém se však v praxi ukázal být o něco komplexnější, jelikož nastavení ideálního horizontu vyžaduje využití přesnější měřicí techniky¹¹ a jakékoliv vychýlení senzoru na desce elektroniky znamená ztrátu naměřených údajů. Tento problém je tedy vhodným předmětem k dalšímu rozšíření práce.

4.3.4. Finální implementace

Pomocí blokové sady DBS bylo možné snadno vygenerovat výsledný kód a nahrát jej do mikrokontroleru dsPIC. Nastavení režimu EM souvisí s nastavením komunikace UART, které musí být na dsPIC shodné s nastavením přímo v menu EM v rámci modelového prostoru Simulinku. Jedná se především o shodnou rychlost komunikace baud rate, velikost staticky alokované paměti a priority kanálu Tx a Rx sběrnice UART. V příloze je uvedeno několik dalších důležitých nastavení prostředí kompilátoru a Simulinku, bez kterých komunikaci nebylo možné zprovoznit. Použití EM výrazně zefektivnilo ladění PID parametrů. Potřebné nastavení EM bylo získáno z [14].

Velmi důležitá byla volba časového kroku běhu programu na dsPIC. Ten záleží především na výpočtové náročnosti celé řídicí smyčky a sběru dat ze senzorů. Jak se ukázalo,

⁹Motor je zde vždy řízen napětím

¹⁰Do řídicí elektroniky je z důvodu možného rozšíření práce implementováno i měření proudu

¹¹Dosavadní varianta využívá klasickou vodováhu a vyvažování probíhá ručně

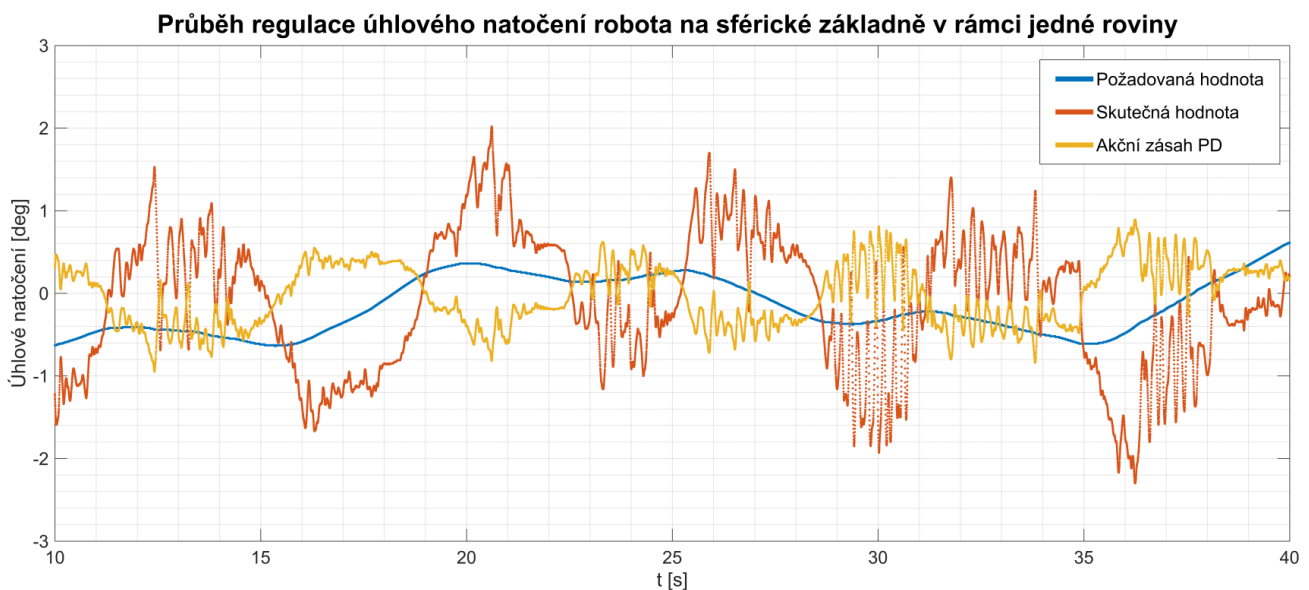
4.3. ŘÍDÍCÍ SOFTWARE A IMPLEMENTACE

má pracovní frekvence zásadní vliv na hladký průběh regulace. Při nastavení časového kroku 0,01s bylo téměř nemožné uspokojivě naladit PID parametry a dosáhnout rychlého zásahu regulátoru. Při zjemnění kroku na 0,002s byly výsledky diametrálně odlišné a naladění probíhalo o poznání rychleji. Celková vytíženost procesoru je zprostředkována před busy flag port indikační diodu, která je umístěna přímo na desce řídicí elektroniky – ta ovšem slouží jen pro přibližné vyhodnocení vytíženosti.

Jelikož všechny modely mikrokontroleru dsPIC obsahují pouze dvě periferie pro vstup enkodéru (QE1), je nutné pro jeden z použitých enkodéru vytvořit C funkci, která s využitím input capture vyhodnocuje informace o směru a počtu pulzů z inkrementálního čítače. Použitá funkce je k dispozici v příloze.

4.3.5. Výsledky regulace

Přestože výsledky regulace jsou nejlépe zřetelné na balancujícím zařízení vizuálně, jsou v této části umístěny grafy znázorňující průběh některých regulovaných veličin. Data jsou získána z jedné z virtuálních rovin a nejsou tedy přepočítána na pohony reálné soustavy – přesto však dávají přibližnou představu o průběhu řízení. Při získávání dat byla v robotovi implementována kaskádní řídicí smyčka (4.10).

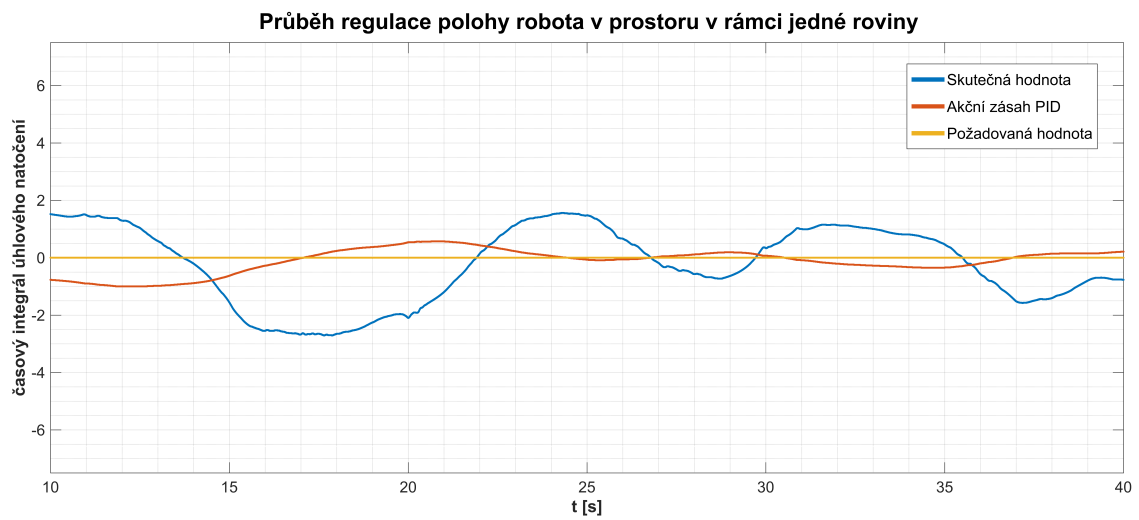


Obrázek 4.11: Regulace úhlového natočení robota

Z grafu je vidět, že odchylka robota se pohybuje v rozmezí přibližně -2 až 2 stupně a robot tak dobře setrvává v rovnovážné poloze. Šum vstupních dat je patrně způsoben rušením sensorů vibracemi konstrukce.

Druhý graf zobrazuje průběh veličin regulace polohy v prostoru, která je v kaskádě zařazena na nejvyšší úrovni. Pokud má skutečná hodnota velkou amplitudu a harmonický průběh, může během regulace dojít k postupnému rozkývání poměrně lehké sférické základny. Tomuto jevu se dá do budoucna předejít zvýšením její hmotnosti. Dalším možným vylepšením může být implementace algoritmu pro saturování přítomných integrátorů, aby

se zabránilo případnému nárůstu jejich hodnoty daleko nad možnosti regulačního zásahu a selhání regulace.



Obrázek 4.12: Regulace polohy robota

5. Závěr

V této práci byla shrnuta řada poznatků důležitých pro vývoj konstrukce a implementaci inteligentního řízení balancujícího robota. V praktické části bylo poté navrženo vlastní konstrukční řešení a metoda regulace nestabilní rovnovážné polohy pomocí PID řídicí smyčky. Na závěr se úlohu podařilo převést do praxe a uvést do provozu hlavní funkce robota. Tím byly splněny všechny body zadání této práce.

Hlavní prvky konstrukce ballbota byly navrženy s ohledem na možnosti 3D tisku a návrh tedy drží krok s aktuálními trendy co se týče použitých technologií. Během celého procesu návrhu byl kladen důraz na důvtipné využití co největšího množství snadno dostupných prostředků pro výrobu sférické základny, úpravy jejího povrchu a ostatní důležité díly tvořící konstrukci celého zařízení.

Regulace polohy robota na sférické základně byla navržena na základě rovinného virtuálního modelu soustavy s následným převodem na reálnou geometrii pohonných jednotek. Robot je schopen udržet rovnovážnou polohu a zachovává relativně malou odchylku od původní pozice v prostoru. Parametry všech použitých PID regulátorů byly laděny experimentálně.

Celkově je technická koncepce tohoto zařízení vhodným základem pro další rozšíření práce. Zde je prostor zejména pro implementaci komplexnějších řídicích metod, založených na znalosti stavů soustavy, implementace pokročilého plánování trajektorie pohybu robota v prostoru, další optimalizace řídicího softwaru a zpracování dat ze senzorů, kalibrace nulové polohy senzorů, návrh vhodného uživatelského rozhraní pro ladění parametrů za chodu a jiné.



Obrázek 5.1: Fyzická realizace ballbota

6. Literatura

- [1] ZOUHAR, František. *Návrh konstrukce, řízení a elektroniky pro nestabilní balancující vozidlo* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/21119>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Robert Grepl.
- [2] Double Aluminium Omni Wheel 60mm. In: *Active robots: Quality Robotics and Electronics* [online]. Active Robots Limited [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.active-robots.com/60mm-double-aluminium-omni-wheel>
- [3] Multidirectional double wheel 48mm. In: *Mooveko* [online]. Warszawa: Mooveko Sp. Z.o.o [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.mooveko.com/119-thickbox_default/multidirectional-double-wheel-48mm-orange.jpg
- [4] FANKHAUSER, Péter a Corsin GWERDER. *Modeling and control of a ballbot* [online]. Zurich, 2010 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:7943/eth-7943-01.pdf>. Bakalářská práce. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Vedoucí práce Stefan Leutenegger, Francis Colas.
- [5] BLONK, J.W. van der. *Modeling and Control of a Ball-Balancing Robot* [online]. Twente, 2014 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://essay.utwente.nl/65559/1/vanderBlonk_MSc_EEMCS.pdf. Diplomová práce. University of Twente
- [6] SKALICKÝ, Jiří. *Teorie řízení 1*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.
- [7] HAN, Hew Yeong; HAN, Tiong Yih; JO, Hudyjaya Siswoyo. Development of omnidirectional self-balancing robot. In: *Robotics and Manufacturing Automation (ROMA), 2014 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2014. p. 57-62.
- [8] LAUWERS, T. B.; KANTOR, George A.; HOLLIS, Ralph L. A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. In: *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006. p. 2884-2889.
- [9] KUMAGAI, Masaaki; OCHIAI, Takaya. Development of a robot balancing on a ball. In: *Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on*. IEEE, 2008. p. 433-438.
- [10] External Mode. *Mathworks* [online]. Mathworks [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/armcortexa/ug/external-mode.html>
- [11] Ballbot CMU Arms. In: *Wikimedia Commons* [online]. Creative Commons, 2011 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Ballbot_CMU_Arms_2011.jpg
- [12] DC motor série PG220 s planetovou převodovkou. In: *Stejnoseměrné Motory.cz* [online]. Brno: Ing. Jiří Gross [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/serie-pg220.html>

- [13] BB-8 DROID V1: Star Wars EP7 BB-8 Droid. *XROBOTS* [online]. XROBOTS, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.xrobots.co.uk/category/bb8/>
- [14] Simulink - connect to target with external mode. In: *Microchip: Forum* [online]. Microchip [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/forums/m665997.aspx>
- [15] DsPIC blockset by Lubin Kerhuel: *Lubin Kerhuel website* [online]. Lubin Kerhuel [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.kerhuel.eu/wiki/Simulink_-_Embedded_Target_for_PIC
- [16] SEYFARTH, Greg, et al. Initial results for a ballbot driven with a spherical induction motor. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, 2016. p. 3771-3776.
- [17] 400mm Hollow Polystyrene Ball to Decorate - 40cm Tall. In: *The little crafty bugs company* [online]. The little crafty bugs company [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.littlecraftybugs.co.uk/jumbo-400mm-hollow-polystyrene-ball-to-decorate-40cm-tall.html>
- [18] Gymnastický míč inSPORTline Top Ball 45 cm. In: *Insportline* [online]. In-sportline [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.insportline.cz/3132/gymnasticky-mic-insportline-top-ball-45-cm/cervena>

7. Seznam použitých zkratek a symbolů

CMU	Carnegie Mellon University
DBS	Device blocks for Simulink
EM	External mode
IMU	Inertial measurement unit
M	Hmotnost robota
PID	Proporcionálně integračně derivační
PWM	Pulse width modulation
QEI	Quadrature encoder input
r	Poloměr kola
TGU	Tohoku Gakuin University
VUT	Vysoké učení technické
φ	Úhel natočení reálného kola
ψ	Úhel natočení virtuálního kola

8. Seznam příloh

- Nastavení režimu External mode: *external.txt*
- Kód pro zprovoznění enkodéru přes input capture: *encoder.txt*
- Finální kód v Simulinku: *složka SIM2015b*
- Video z testování robota: *robot.avi*
- Výrobní výkresy podložek a válečků