

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

Bakalářská práce

Plzeň 2021

Lukáš Kölbl

Místo pro zadání bakalářské práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne

Lukáš Kölbl

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavu Flídovi, Ph.D za užitečné rady a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou návrhu robotu balancujícího na míči. Jedním z hlavních cílů je návrh a zapojení HW sloužícího k pohybu Ballbota. Dále je to úprava mechanické části robotu. Dalším cílem je snímání a vyhodnocení dat z pohybových senzorů a také senzorů umístěných na motorech. Posledním krokem je návrh řídicího algoritmu pro řízení DC motorů a celkového balancování.

Klíčová slova: Návrh robotu, BallBot, stejnosměrné motory, snímání senzorů.

This thesis deals with the design of robot balancing on a ball. One of the main goals is the design and connection of Hardware components which are used for movement of the Ballbot. It is also a modification of the mechanical parts of the robot. Next goal is to read and evaluate data from motion sensors as well as sensors located on motors. The last step is to design a control algorithm for controlling DC motors and overall balancing of the robot

KeyWords: Robot design, Ballbot, DC motors, sensor reading

Obsah

1	Úvod	8
2	Konstrukce Ballbota	11
2.1	Koncepční návrh	11
2.1.1	Druhy pohonných systémů	11
2.1.2	Všesměrová kola obecně	13
2.1.3	Tělo Ballbota obecně	14
2.1.4	Míč obecně	15
2.2	Pohonný systém	15
2.3	Tělo robotu	17
2.4	Míč	17
2.5	Výběr komponent	17
2.6	Výběr hardwaru pro regulaci	17
2.7	Senzory	18
2.7.1	Kvadraturní enkodéry	18
2.8	Zdroj napájení	19
3	Návrh elektronického zapojení	20
3.1	Obecný náhled	20
3.1.1	Modul 1 - okruh motory	20
3.1.2	Modul 2 - okruh s Raspberry Pi	23
3.1.3	Modul 3 - Spojení řídicích desek	23
3.1.4	Spojení modulů	24
4	Řízení DC motorů	25
4.1	Model motoru	25
4.2	PWM	26
4.3	Charakteristiky motorů	27
4.4	Kvadraturní enkodéry	28
4.5	Magnetické enkodéry	28
4.6	Funkce enkodéru	28
4.7	Implementace enkodéru	29
4.8	Měření a výpočet rychlosti	30
4.8.1	Měření rychlosti pro nízké otáčky	30
4.8.2	Měření rychlosti pro vysoké otáčky	30
4.9	PID regulátor	31
4.9.1	Unášení integrační složky	32
4.9.2	PID ve fixed point aritmetice	33

4.10 Simulace	34
4.11 Sériová Komunikace	35
5 Model	36
5.1 Inverzní kyvadlo - 3D	36
5.2 Linearizace modelu	37
6 Senzory	40
6.1 Senzory obecně	40
6.2 Gyroskopy	40
6.2.1 MPU6050 - gyroskop	40
6.3 Akcelerometry	41
6.3.1 MPU650 - akcelerometr	41
6.4 Komplementární filtr	41
7 Návrh LQ regulátoru	42
7.1 Matice Q a R	42
7.2 Zpětnovazební zesílení a Riccatiho rovnice	43
7.3 Lineární kvadratický regulátor	43
7.4 Implementace LQ regulátoru	44
8 Závěr	45

Kapitola 1

Úvod

Robot je neživý systém, který vykazuje schopnost samostatně vykonávat určité funkce. Tyto stroje jsou často schopné se pohybovat v prostoru. K tomu využívají nespočet různých senzorů. Roboty se často dělí na dvě skupiny a to na roboty, kteří pracují s pevně daným programem a na roboty, kteří jsou pomocí vnímání okolního světa schopni reagovat na změnu. Robot má možnost se pohybovat spousty způsoby, jako jsou například pásy, kola nebo třeba vrtule [1].

Tradiční mobilní kolové roboty jsou většinou vybaveny dvěma koly, tyto roboty mají dva stupně volnosti (DOFs). Tyto roboty jsou schopny se otáčet okolo libovolného bodu, ale nejsou schopni okamžitě vyrazit libovolným směrem. K překonání tohoto pohybového omezení byli navrženi všesměrové pohyblivé roboty. Mohou se pohybovat libovolným směrem, aniž by musely měnit směr otáčení kol. Toho jsou schopni dosáhnout pomocí pohybu s třemi stupni volnosti na dvourozměrné rovině. Zvláštním druhem tohoto robotu je robot balancující na míči nebo-li Ballbot [5].

Robot balancující na míči patří do speciální skupiny podaktuovaný mechanických systémů. To jsou systémy, které mají menší počet nezávislých řídicích vstupů než stupňů volnosti (DOFs). Typicky je možné jedním vstupem ovlivňovat najednou více stavů systému. Tato skupina obsahuje roboty jako jsou Segway, Ballboti a roboty využívající nohou jako jsou BigDog [2] a MABEL [3].

Příklady těchto systémů se dají najít v různých odvětvích, jako jsou robotika, letectví nebo kosmonautika. Podaktuovaný systém se vyskytuje například kvůli výskytu dynamiky vyšších řádů, poruchy aktuátorů a nebo právě v případě dynamicky pohyblivých platforem. Příkladem těchto důvodů jsou např. helikoptéry, flexibilní roboty, selhání operačního kloubu, selhání motoru, Segway nebo Ballboti.

Tyto roboty budou hrát velkou roli v začlenění „robotických pracovníků“ do prostředí a kontaktu s lidmi. Výhodou těchto robotů je, že mohou být vysokí a hubení s vysoce postaveným těžištěm. Jsou také schopni relativně velkého zrychlení a zpomalení. Jedním z cílů vývoje těchto robotů a jejich související technologie je vytvoření robotů, kteří mají lidskou velikost a slouží například jako asistenční roboty.

Mohou být využity také jako velice efektivní pohyblivé manipulátory, které jsou schopné vzprámeného držení platformy a reakce na změnu zevních a vnitřních sil. Tyto vlastnosti jsou zejména vhodné pro navigaci a výkonu činnosti v přeplněném lidském prostředí.

Roboty jako je Segway, mají kinematické zábrany, které brání pohybu v některých směrech, zatímco roboty operující na jednom kulovém pohonu, jako jsou Ballboti. Mají všesměrový pohyb, který je činí mnohem vhodnější pro pohyb ve stísněných prostorech.

Zajímavým a znepokojujícím faktorem při řízení a plánování trajektorií těchto podaktuovaných systémů, je omezení na jejich dynamiku. Dochází k omezení skupiny trajektorií, které jsou schopni následovat. U systémů, kde dochází ke destabilizaci pomocí gravitačními silami, je důležité udržovat rovnováhu. Udržování rovnováhy ztěžuje sledování přesné požadované trajektorie [4].

Koncept robotu Ballbot je jednoduchý. Je to robot, který balancuje na kouli (míči). Míč funguje jako jedno sférické kolo a umožňuje pohyb všemi směry. Na rozdíl od klasických robotů, které spoléhají na nízké těžiště a velkou podstavu použitých kol, aby zůstaly ve vzpřímené poloze. Ballbot s jedním bodem doteku se zemí je systém nestabilní. Jelikož je robot v základní poloze nestabilní je nutné, aby docházelo ke konstantnímu vyvažování robota [6].

Ballbot využívá koule jako jádra pro svůj pohonný systém. Zásluhou spontánního naklánění v jakémkoliv směru a rotace okolo své osy. Provádí Ballbot svůj pohyb velice jedinečným způsobem [7].

Ballbot je robot, který jezdí na míči pomocí tří aktuátorů. Tři aktuátory jsou tři všesměrová kola, která jsou poháněna pomocí stejnosměrných motorů. Ballbot balancuje na míči pomocí měření jeho naklonění a vypočtením odpovídajících otáček motoru, které umožní robotu být ve vzpřímené poloze. Tělo robota je v základu tvořeno akumulátorem, inerciální měřicí jednotkou (IMU), mikropočítačem, mikrokontrolerem a enkodéry motorů[5].

Několik Ballbotů již bylo v minulosti vytvořeno. První Ballbot byl vytvořen v roce 2006 v Carnegie Mellon University ve Spojených státech amerických. Robot se vyznačuje svojí velikostí o rozměrech lidské postavy se zaměřením na práci s lidmi. Na tomto projektu bylo v průběhu let provedeno spousta změn, úprav a také výzkumů. Tento robot má tři „nohy“, které slouží k lepší stabilitě. Původně měl robot čtyři válečky, kde dva byly poháněny stejnosměrnými motory a zbylé dva pasivní sloužily k udržení kontaktu mezi míčem a válečky. To se však nakonec ukázalo jako nevhodné a tak pasivní válečky byly nahrazeny. S přidáním pohonu pro otáčení ve vertikální ose má robot celkově pět motorů. Jedním z dalších projektů na tomto robotu bylo přidání rukou v roce 2012 [8].

V roce 2008 byl vytvořen Ballbot v Japonské univerzitě TGU. Tento robot se vyznačuje svým menším vzrůstem oproti předchozímu americkému modelu. Velkou změnou je také menší počet využitých motorů a to tří stejnosměrných motorů bez omezení na schopnost pohybu, která zůstává zachována. Na robotu byla také demonstrována nosnost až 10 kg [9].

Na univerzitě v Austrálii se rozhodli využít LEGO Mindstorms pro stavbu robotu v roce 2009. Zvláštností je tedy to, že je postaven z lega a má pouze dva motory. Na výšku pak tento robot měří pouze 20 centimetrů [10].

Na Taiwanu byl v roce 2012 vytvořen model, který se podobá tomu v Japonsku. Oba využívají tři motory a jsou podobně veliké [11].

Ve Švýcarsku byl v roce 2012 vytvořen Ballbot s názvem Rezero. Stejně jako robot z Japonska má Švýcarský robot tři všesměrová kola. U tohoto robotu bylo dosaženo rychlostí okolo dvou metrů za sekundu. O tomto modelu bude více zmíněno v další části [7].

Rezero je projekt Ballbotu pocházející ze Švýcarské univerzity ETH Zürich. Na tomto projektu pracovalo osm vysokoškolských strojních inženýrů. Hlavním

cílem bylo vytvoření plně operačního prototypu Ballbotu, který se hlavně soustředí na hbitost oproti ostatním Ballbotům. Toho je možné docílit pouze větším soustředěním na řízení a modelování.

Tento projekt cílí na analyzování systému Ballbota a vytvoření vhodného regulátoru. Regulátor musí být optimalizován, aby bylo možné docílit požadavků na vysoce dynamický pohyb robotu. Byla vytvořena simulace pro analýzu podobných systémů [7].

Tato sekce začíná popisem návrhu celkového robotu a výběrem jednotlivých komponentů, které jsou potřebné k dosažení požadovaných dílčích úkonů. Dále jsou uvedené a popsány vlastnosti, užití a jednotlivé parametry hardwaru a mechanických částí Ballbota. Nakonec je uvedeno elektronické zapojení spolu s jeho rozdělením pro lepší orientaci a logickou návaznost.

Kapitola 2

Konstrukce Ballbota

Cílem této kapitoly je zejména popis samotné konstrukce Ballbota, který by mohl být dynamicky stabilizován pomocí regulátoru.

Konstrukce byla řešena a přebrána z jiné Bakalářské práce. Kde tato část Ballbota byla navržena v programu „SolidWorks 2014“, kde se jedná hlavně o součásti rámu nebo-li těla Ballbota. Plastové nástavce a montážní náboje byly poté vyrobeny pomocí 3D tiskárny [12].

2.1 Koncepční návrh

Koncepční návrh robotu balancujícího na míči vycházel hlavně z již zmíněných uskutečněných projektů v ostatních zemích [7][8][9][10][11].

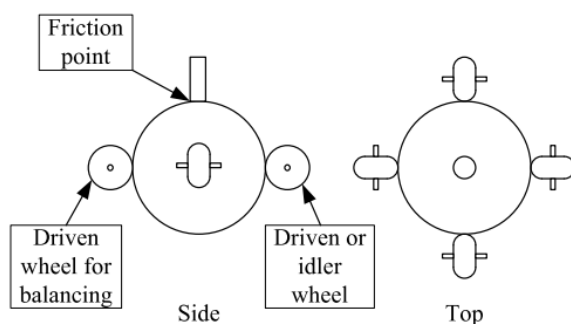
Ballbot je sestaven ze tří hlavních částí: míč, pohonný systém a tělo Ballbota, které v sobě nese veškerou elektroniku. Pohonný systém se skládá ze tří všesměrových kol, která jsou poháněna pomocí stejnosměrných motorů s přístupem k enkodérům. Míč je využit jako prvek k pohybu. Tělo robotu je pak prostředím pro upevnění elektronických komponentů. Mezi tyto komponenty patří hardware sloužící k regulaci ať už pohybu či vyvažování Ballbota a inerciální měřicí jednotka (IMU), která je jednou z důležitých součástí a slouží k měření úhlů a úhlových rychlostí [7].

2.1.1 Druhy pohonných systémů

Přístupů k vybraní pohonného systému existuje hned několik. V minulosti bylo navrženo nebo uskutečněno množství návrhů, které se liší v místech upevnění, tak v množství kol[6].

Čtyři ortogonální upevněná kola ve středu os míče

Tento způsob pohonného systému se dá rozdělit na dvě části. První je rozdělení čtyř kol do párů, kdy dochází k řízení pouze jednoho kola z daného páru. Výhodou této metody je jednodušší řízení avšak dochází k vysokému tření z důvodu tvaru a umístění konstrukce. Druhý způsob je řízení každého kola zvlášť to však s sebou přináší dodatečné problémy spojené se synchronizací kol. Výhody a nevýhody jsou stejné jako u první varianty. U této metody není potřeba využívat všesměrových kol.

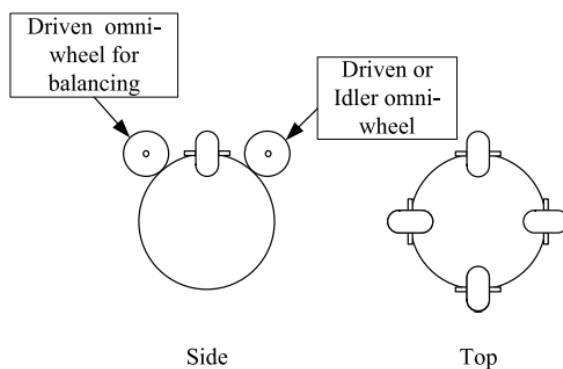


(1) Orthogonal fixed wheels at ball centre axis, adapted from Lauwers et al. (2006)

Obrázek 2.1: Čtyři ortogonální kola ve středu míče - (pořízeno z [6])

Čtyři ortogonální kola nad středem os míče

Tento způsob se dá také rozdělit na dvě části jako v předchozím případě a to na řízení kol v páru a řízení kol samostatně. Výhodou oproti minulé variantě je snížení tření a to hlavně z důvodu použití všesměrových kol. Ostatní vlastnosti jsou velmi podobné předchozímu případu.

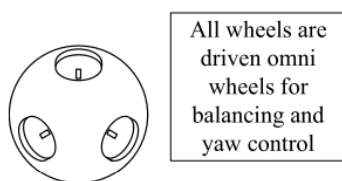


(3) Orthogonal omniwheels above ball centre axis, adapted from Wu and Hwang (2008)

Obrázek 2.2: Čtyři ortogonální kola nad středem os míče - (pořízeno z [6])

Tři všesměrová kola nad středem os míče

Tato varianta využívá k řízení tři všesměrová kola, tato varianta má z těchto tří největší potenciál. Vzhledem k využití všesměrových kol je tření menší než u prvního způsobu. Výhodou této varianty je možnost řízení otáčení robota, toto otáčení lze pak využít pro pohyb robota v prostoru. Nevýhodou této metody je relativně vyšší složitost řízení oproti metodě, který využívá kola čtyři. Tento způsob provedení pohonného systému je u Ballbota popisovaného v této práci použit [6].



Top

(4) Tri omniwheels above ball centre axis, adapted from Kumagai and Ochiai (2008)

Obrázek 2.3: Tři směrová kola nad středem os míče - (pořízeno z [6])

2.1.2 Všesměrová kola obecně

V kinematických modelech se často používají jednoduchá kola, ty se mohou pohybovat (otáčet) pouze ve směru své orientace. Taková jednoduchá kola mají pouze jediný směr otáčení. Chceme-li umožnit všesměrový pohyb (do více směrů) je vyžadována složitější konstrukce kola. Příkladem takového kola je kolo Mecanum. Mecanum kolo má umístěné válečky podél obvodu kola. Každá osa válce je ve 45 stupních od roviny hlavního kola a ve 45 stupních k přímce rovnoběžné s osou kola. Dalším příkladem složitějšího kola je všesměrové kolo nebo vícesměrové kolo, které umožňuje všesměrový pohyb podobně jako kolo Mecanum. Všesměrové kolo má pasivní válečky bo obvodu kola tak, aby jejich osy byly v 90 stupních oproti ose hlavního kola [16].



Obrázek 2.4: Všesměrová kola - (pořízeno z [32])

2.1.3 Tělo Ballbota obecně

Navržení těla robotu má zcela nepochybně velký vliv na vlastnosti Ballbota ať už se jedná o jeho váhu, rychlost reakce nebo dobu jakou robotu trvá spadnout po vypnutí regulace. Úzké a dlouhé tělo robotu má výhodu v tom, že regulace může být pomalejší z důvodu delší destabilizace těla na míči a tak klade o něco menší nároky na hardware. Další výhodou je přístupnost, jelikož je robot vysoký, interakce mezi robotem a člověkem je snazší. Pokud má robot nižší tělo je schopný dosahovat většího zrychlení a rychlosti. Nižší tělo má také výhodu, že bývá hmotnostně méně náročné a jeho tvar je vhodnější pro přenos předmětů z místa na místo. Pro v této práci popisovaného Ballbota byla aplikovaná druhá varianta.

Jedna ze zajímavých odlišností, která se objevuje například u robotu Rezero, je takzvaný lapač míče. Je to několik ramen umístěných okolo míče, které slouží ke zajištění míče pod tělem robotu a zároveň tlačí míč na všesměrová kola [7].

2.1.4 Míč obecně

V minulosti bylo na Japonské univerzitě TGU vyzkoušeno několik modelů míče. Tento projekt má větší souvislost s Ballbotem popisovaným v této práci, jelikož jejich pohonné systémy si jsou podobné. Vlastnosti míče totiž velkou měrou závisí na zvoleném pohonném systému. Jako první kandidát byl zvolen Basketbalový míč, který byl schopný dosáhnout balancování, ale byl také velice nestálý. Jako další varianta byl vybrán bowlingový míč, který byl následně potažen gumou. To zapříčinilo, že míč byl více tuhý než předchozí verze a poskytoval tak lepší funkcionalitu pro japonský projekt [9]. Vlastnosti, které dělají míč vhodný pro použití jako pohybový prvek Ballbotu jsou následující:

Skluz

Skluz je jedna z nežádoucích vlastností, kterou míč může mít. Tato vlastnost má negativní vliv na jízdní vlastnosti Ballbotu. V naprosté většině modelů se skluzem míče nepočítá a jeho vliv na model je zanedbáván. Předpokládá se, že u kontaktních bodů mezi míčem a zemí a také mezi míčem a koly nedochází k žádnému prokluzu.

Tření

Ve většině modelů dochází k zanedbání tření, ke kterému dochází v pohybu os x a y . Proto je vhodné, aby tření v těchto osách bylo u míče co nejmenší.

Deformace

Omezení deformace míče je velice žádoucí. K tomuto jevu dochází hlavně v kontaktních bodech míče. Tato vlastnost má opět nežádoucí vliv jak na pohyb Ballbotu tak na komplexnost modelových rovnic [7].

2.2 Pohonný systém

Pohonný systém je jednou ze tří hlavních částí konstrukce Ballbotu. V případě této práce se skládá ze tří všesměrových kol, která jsou poháněna pomocí stejnosměrných motorů, přičemž je možné měřit úhlovou rychlost pomocí enkodérů. Ballbot využívá principu tří všesměrových kol umístěných nad středem os míče.

Motory

K vykonání pohybu robotu se ve spoustě robotických aplikacích využívá stejnosměrných (DC) motorů, které mají výhodu v jednoduchosti jejich řízení. Při výběru motorů jsou důležité dvě hlavní kritéria a to jejich výkon a velikost. U prvního kritéria je nutné zajistit, aby vybrané motory byly schopné mít dostatečně rychlou odezvu na požadovanou hodnotu. Dále je nutné, aby byly schopné pracovat s požadovanou vahou robotu. Druhým kritériem je velikost a tvar daného motoru. Je důležité, aby bylo možné motory umístit k vytvořené konstrukci.

Z těchto důvodů byly vybrány převodové motory značky Pololu. Tyto silné motory s převodovkou jsou vybaveny kvadraturními enkodéry, které využijeme

pro měření otáček motoru a výpočtu úhlové rychlosti. V tomto projektu je využito tří identických motorů.

Jedná se konkrétně o 12V kartáčové převodové motory s kovovou převodkou 30:1. Zastavovací proud je pak 5.5A. Tyto motory jsou navrženy, aby běžely při provozu maximálně 25% zastavovacího proudu [15].

Všesměrová Kola

K pohybu na míči dochází pomocí tří všesměrových kol. Mezi každým z těchto kol je 120 stupňový rozdíl tak, aby kola dohromady tvořila kruh. Tyto kola se vyznačují množstvím válečků upevněných po obvodu hlavního kola, osy těchto válečků mají 90 stupňový úhel oproti ose hlavního kola. Použití všesměrových kol je pro Ballbota nezbytné, jelikož je nutné zaručit schopnost pohybu ve všech třech osách. Každé jedno kolo je poháněno jednotlivými motory. Výhodou těchto kol je také fakt, že nedochází k příliš velkému tření v místě dotyku s míčem.



Obrázek 2.5: Všesměrová kola

2.3 Tělo robotu

Hlavní rám robotu tvoří dvě polyakrylátové desky spojené pomocí šroubovacích tyčí. Desky jsou 1 cm vysoké s průměrem 40 cm [12]. Ke spodní akrylátové desce jsou připevněny motory pomocí již vyrobených držáků. Uvnitř těchto polyakrylových desek se nachází menší soustava plošek, které slouží pro upevnění komponent. Většina součástek je umístěna buď ve středu těchto plošek a nebo rovnoměrně okolo středu, aby nedocházelo ke změně těžiště.

2.4 Míč

V případě této práce byl zvolen míč polystyrenový. Tento míč má vhodné vlastnosti, pro použití jako pohyblivý prvek. Jeho materiál zajišťuje malý skluz a nemožnost deformace míče pod vahou robotu, kde by tyto vlastnosti byly pro Ballbota nežádoucí.

2.5 Výběr komponent

Na základě zvoleného pohonného systému a předpokládané požadavky regulátorů byly zvoleny stávající komponenty. Pro správnou regulaci Ballbota bylo potřeba zvolit hardware, který tuto regulaci bude umožňovat, těmi jsou mikrokontrolér a mikropočítač. Dále je potřeba zvolit senzory, které budou schopny poskytovat požadované informace a to jak o vlastnostech motorů tak o stavu Ballbotu samotného. Vybraný pohonný systém požaduje tři motory k řízení jednotlivých všesměrových kol. Pro tyto motory bylo potřeba zvolit vhodné napájení, které má dostatečný výkon a poskytuje dostatečně dlouhou dobu provozu Ballbota. Poté bylo také nutné zvolit vhodné elektronické součásti, které budou vhodně doplňovat celou strukturu zapojení. V neposlední řadě je nutné zvolit míč a tělo Ballbota.

2.6 Výběr hardwaru pro regulaci

K řízení Ballbota je potřeba mít hardware, který tuto činnost bude zastávat. Z tohoto důvodu byl zvolen mikrokontrolér a mikropočítač. Zvoleny jsou dvě komponenty z důvodu rozdělení řídicí části. Mikrokontrolér se obecně stará o řízení motorů a komunikaci, zatímco mikropočítač vykonává řízení stability celého robotu. Tyto komponenty musí být dostatečně rychlé, aby nedocházelo k příliš velkému zpoždění mezi obdržanou a odeslanou hodnotou.

Raspberry Pi

K hlavnímu řízení Ballbota bylo využito Raspberry Pi, to je jednočipový počítač. Výhodou toho mikropočítače jsou čtyři USB porty a velké množství GPIO pinů. U Ballbota je potřeba řídit balancování robotu na míči, právě k této činnosti bude tento počítač využit. Raspberry Pi obstarává hlavní řídicí LQ regulátor a komunikaci s mikrokontrolérem. Jedná se konkrétně o model Raspberry Pi 1 Model B+ [18].

TIVA

Jako jedna z hlavních řídicích jednotek byl zvolen mikrokontrolér EK-TM4C123-GXL od značky Texas instruments. U Ballbota je potřeba zajistit konstantní řízení motorů, k čemuž je tento mikrokontrolér vhodný. Tato jednotka byla zvolena na základě několika parametrů. Jedním z těchto parametrů je vysoká rychlost a to 80MHz. Dalšími vlastnostmi je velké množství GPIO pinů a kompatibilita s deskou senzorů. Tato komponenta se převážně stará o řízení motorů a zpracování dat ze senzorů. Raspberry Pi a Tiva společně tvoří hlavní řídicí hardware, který obstarává řízení celého systému [19].

2.7 Senzory

Pro získávání informací o stavu celého Ballbota a potřebných hodnot z hlediska motorů je potřeba využít několika různých druhů senzorů. Jejich výběr závisí na jejich přesnosti, rychlosti a také možnosti připojení k již stávajícím komponentům. Pro získání hodnot o naklonění robotu je vhodné využít gyroskopů a akcelerometrů. Toho bylo docíleno vybráním inerciální měřicí jednotky, která je kompatibilní z hlavním řídicím hardwarem. Dalšími zvolenými senzory je trojice kvadraturních enkodérů, které slouží pro získání úhlové rychlosti otáčení kol, ty jsou součástí použitých motorů.

Pro snímání polohy Ballbota byl zvolen Sensor Hub Booster Pack, což je energeticky nenáročná rozšiřovací deska pro Tiva C Series TM4C LaunchPad s mikrokontroléry na bázi ARM Cortex-M4F. Desku je potřeba napájet 2.7V až 5.5V, přičemž je nominálně napájena 3.3V z BoosterPack rozhraní. Tato deska byla zvolena právě z důvodů použitého mikrokontroléru, kdy je velice jednoduché tuto rozšiřovací desku připojit. BoosterPack je kompaktní deska obsahující větší množství senzorů, které mají široké uplatnění v nejrůznějších aplikacích. Sensor Hub obsahuje snímač teploty, 9-osý pohybový senzor, tlakový senzor a infračervený senzor [13].

Z této desky je využito právě pohybového senzoru InvenSense MPU-9150. MPU-9150 je 9-osé zařízení pro sledování pohybu. MPU-9150 je systém v balíčku označovan také jako SIP, který je složen z dvou čipů. Prvním čipem je MPU-6050, který obsahuje 3-osý gyroskop, 3-osý akcelerometr a digitální pohybový procesor, který je schopný zpracovávat komplexní pohybové algoritmy. Druhý čip je Ak8975, což je 3-osý kompas[14].

2.7.1 Kvadraturní enkodéry

Aby, bylo možné robota řídit je potřeba vědět jak rychle se pohybuje a jakou vzdálenost robot ujel. Je tedy nutné mít senzor, který nám tuto informaci zajistí. Proto každý z motorů je vybaven kvadraturním enkodérem. Kvadraturní enkodéry slouží ke měření polohy kola na daném motoru. Na základě měření polohy kola je možné dopočítat úhlovou rychlost ω daného kola.

Dvoukanálový Hallův senzor je využít ke snímání rotace magnetického disku. Kvadraturní enkodér poskytuje rozlišení 64 impulsů na 1 otáčku hřídele motoru, pokud uvažujeme oba okraje obou kanálů. Hallův senzor potřebuje vstupní napětí mezi 3.5V a 20V. Výstupy *A* a *B* jsou čtvercové signály, které jsou fázově posunuté o 90°. Z frekvence přechodů lze zjistit rychlost motoru a z pořadí přechodů směr otáčení[20].

2.8 Zdroj napájení

Zdroj napájení je u Ballbota potřeba z důvodu napájení motorů a veškeré elektroniky. Jelikož je Ballbot pohyblivý robot, je žádoucí, aby zdroj napájení byl součástí robotu. Akumulátor je tedy logickou volbou pro tento úkol. Důležité je pro Ballbota, aby byl akumulátor umístěn v ose těžiště z důvodu větší váhy zvoleného akumulátoru. Dále je důležité, aby akumulátor byl schopen dodávat konstantně víc než 12V s požadovaným proudem, aby nedocházelo k poklesům napětí a tím pádem k ovlivnění funkčnosti Ballbotu.

Zvolen byl akumulátor LiPol baterie Gens ACG5000mAh. LiPol je lithium-polymerový akumulátor a to konkrétně čtyř-článekový. Nominální napětí 4S LiPol akumulátoru je $14.8V = 4 \cdot 3.7V$. Maximální je pak $4 \cdot 4.2V = 16.8V$ a minimální bezpečné napětí je $13.8 - 14V$, což odpovídá 3.5V na článek. Kapacita článku je dána jeho objemem a to 5000 mAh. Tento speciálně konstruovaný akumulátor je schopen dodávat 50C, to znamená, že při kapacitě 5Ah je článek nepoškozen i při proudu až 250A[17].

Kapitola 3

Návrh elektronického zapojení

Cílem této kapitoly je zejména popis elektronického zapojení a interakce hardwarových komponent Ballbotu. V této kapitole bude elektronika rozdělena do několika modulů, které mají na sebe návaznost, kdy bude rozebrána interakce mezi těmito moduly a taktéž vnitřní interakce každého modulu. Budou uvedeny diagramy a vedení potřebné pro správný provoz Ballbotu.

3.1 Obecný náhled

Pro dosažení pohybu Ballbotu je potřeba veškeré komponenty správným způsobem zapojit a napájet. Tato problematika bude rozdělena do dílčích částí neboli modulů. V těchto sekcích budou blíže popsány vlastnosti jednotlivých součástí, jakým způsobem probíhá jejich interakce a co je potřeba u jednotlivých komponent dodržet a zajistit.

První modul se bude zabývat začleněním motorů do našeho celku a jejich vlastnostmi. Druhý modul se bude věnovat zapojení a napájení řídicí části robotu. Třetí modul se pak bude zabývat zapojením a interakcí mezi řídicími prvky a senzory.

3.1.1 Modul 1 - okruh motory

Pro správnou funkčnost motorů, je potřeba zajistit správné napájení a celkové začlenění do elektronické části robotu. Motory jsou řízeny pomocí řídicí jednotky Tiva, která obstarává chod všech tří motorů. K tomu dochází pomocí řadiče, který je touto jednotkou řízen. Tyto motory jsou napájeny z akumulátoru, ale nejprve je potřeba, aby došlo ke stabilizaci a usměrnění napětí na požadovanou hodnotu k čemuž slouží stabilizátor. Napájení použitých řadičů je obstaráno právě z tohoto stabilizátoru. Jako poslední v této části figuruje vypínač, který slouží k odpojení přívodu energie z akumulátoru.

Jako první bude uvedena pinout mapa. Poté bude popsáno zapojení s řídicí jednotkou Tiva C, kde z důvodu velkého množství spojů a složitějšímu zapojení bude využito tří tabulek s jednodušším popisem. Dále bude popsáno připojení

stejnoseměrných motorů ke zbytku komponentům. A nakonec bude popsán jednoduchý diagram celého tohoto modulu.

TIVA C - Název pinu	Součástka - popis pinu
PC_4	Motor1 - žlutá - enkodér A
PC_5	Motor1 - bílá - enkodér B
GND	Motor1 - zelená - GND
VBUS 5V	Motor1 - modrá - V_{cc}
PA_2	driver1 - IN_A - 1
PB_0	driver1 - PWM - 1
PA_3	driver1 - IN_B - 1

Tabulka 3.1: Tabulka zapojení pro první motor a driver

TIVA C - Název pinu	Součástka - popis pinu
PD_2	Motor2 - žlutá - enkodér A
PD_3	Motor2 - bílá - enkodér B
GND	Motor2 - zelená - GND
VBUS 5V	Motor2 - modrá - V_{cc}
PE_0	driver2 - IN_A - 2
PB_1	driver2 - PWM - 2
PE_1	driver2 - IN_B - 2

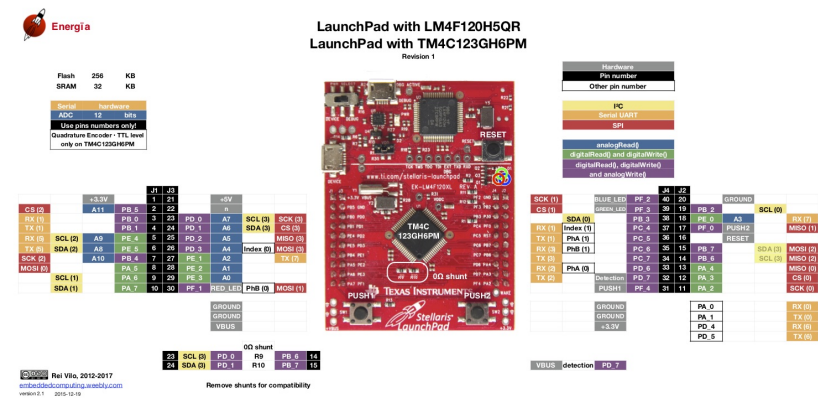
Tabulka 3.2: Tabulka zapojení pro druhý motor a driver

TIVA C - Název pinu	Součástka - popis pinu
PB_6	Motor3 - žlutá - enkodér A
PB_7	Motor3 - bílá - enkodér B
GND	Motor3 - zelená - GND
VBUS 5V	Motor3 - modrá - V_{cc}
PE_2	driver3 - IN_A - 3
PB_2	driver3 - PWM - 3
PE_3	driver3 - IN_B - 3

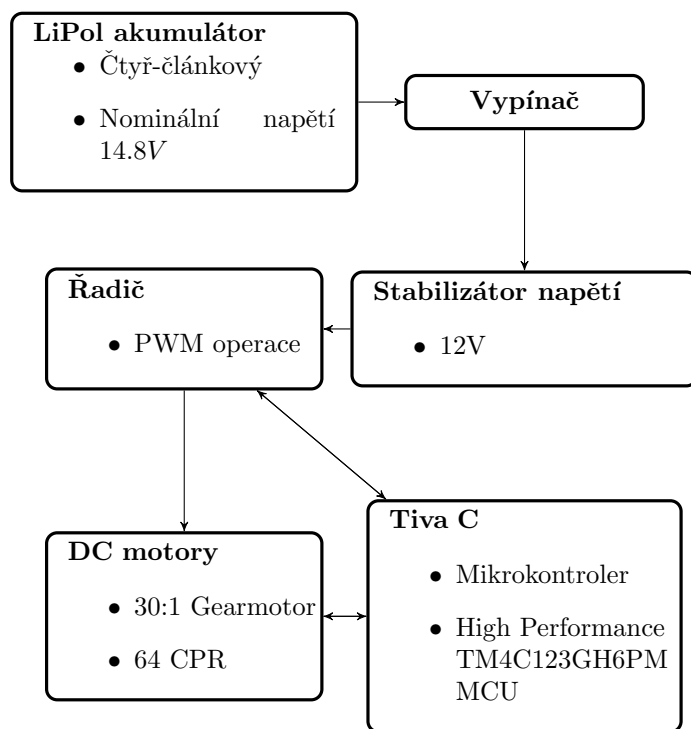
Tabulka 3.3: Tabulka zapojení pro třetí motor a driver

Ve všech třech tabulkách je popsáno konkrétní zapojení mezi piny řídicí jednotky Tiva s danými motory a příslušným řadičem. První čtyři piny v každé z tabulek popisují zapojení napájení enkodéru a také jeho výstupů A a B. V druhé části tabulek se jedná o propojení Tivy s řadiči. Dvojice pinů ke každému z enkodérů se nachází vždy na stejné bázi portu, kdy u Tivy C není možné, aby GPIO měl více jak jednu obsluhu přerušení. Pin pro PWM je také specificky určený takový, aby byl schopný vykonávat obsluhu pulzně šířkové modulace. Ke každému motoru je nutné přivést napájení. Hlavním zdrojem je v tomto případě akumulátor, který je od celého modulu odpojen/připojen pomocí vypínače. Napájení je nutno stabilizovat a regulovat. K tomu je použit 12V stabilizátor od značky Pololu. Připojení výstupních konektorů stabilizátoru je napojeno na řadič stejnosměrných motorů. Konkrétně se jedná o konektory VIN

a GND. Každý z motorů je nutné řídit a proto jsou připojeny k jednotlivým řadičům. Ty jsou spojené pomocí konektorů OUTA a OUTB [19].



Obrázek 3.1: Pinout diagram - (pořízeno z [38])



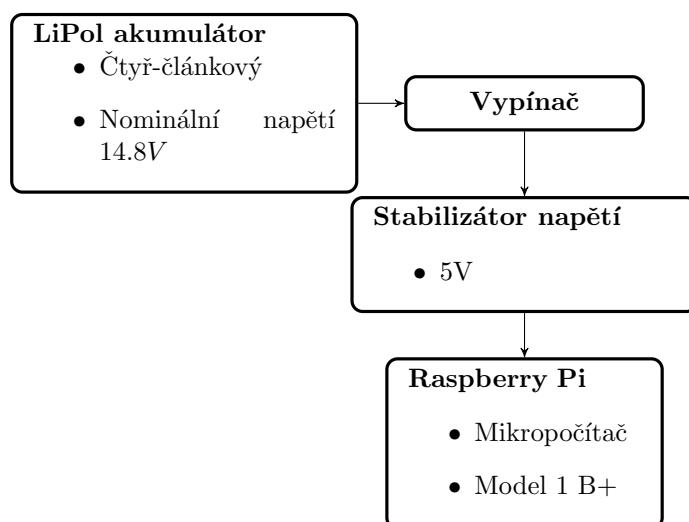
Obrázek 3.2: Modul 1

3.1.2 Modul 2 - okruh s Raspberry Pi

Dalším menším modulem je okruh, který obsahuje řídicí jednotku Raspberry Pi. Tento modul jako v předchozím případě je napájen z akumulátoru. K tomuto modulu lze pomocí vypínače odpojit přívod energie z akumulátoru. Opět je potřeba usměrnit a stabilizovat přívod z akumulátoru tak, aby odpovídal požadované hodnotě, která je následně přivedena do Raspberry Pi. Tento mikro počítač pak obstarává napájení mikrokontroléru Tiva.

Jako první bude popsáno, jakým způsobem přesně je obstaráno zapojení s Raspberry Pi. A dále bude uveden jednoduchý diagram zapojení s jeho popisem.

Pro Raspberry Pi je nutné zajistit zdroj napájení. Jedná se o stejný akumulátor jako u napájení motorů. Tento akumulátor je opět oddělen od celého modulu pomocí vypínače. Raspberry Pi pro správnou funkčnost vyžaduje napájení o velikosti 5V. Z tohoto důvodu bylo potřeba využít 5V stabilizátoru. Ten se nachází přímo mezi napájením z akumulátoru a samotným mikro počítačem.



Obrázek 3.3: Modul 2

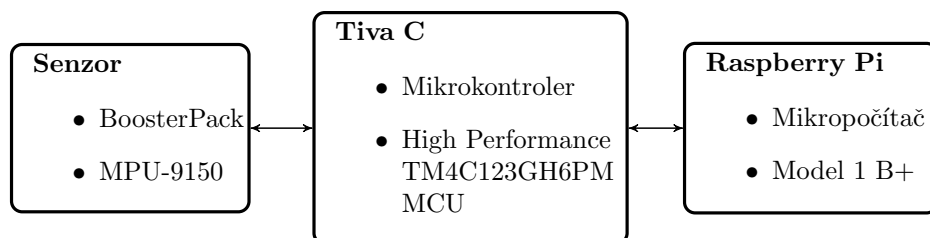
3.1.3 Modul 3 - Spojení řídicích desek

Jako poslední modul bude popsán okruh mezi řídicími jednotkami a jejich komunikace se senzory. Komunikace se senzory dochází v tomto okruhu pomocí řídicí jednotky Tiva, která je přímo spojená se Sensor Booster Packem. Dále napájení a komunikace řídicí jednotky Tiva, je uskutečněno pomocí micro USB kabelu, který tyto dvě desky spojuje.

Nejprve bude popsáno zapojení mezi řídicími jednotkami a poté popsán diagram tohoto zapojení.

Pro správnou funkčnost řídicí jednotky Tiva C je nutné zajistit její napájení. Napájení Tiva C desky je realizováno pomocí mikro počítače Raspberry Pi. Tyto dvě řídicí jednotky jsou mezi sebou propojeny pomocí micro USB kabelu. Výše napětí je řešeno pro mikrokontrolér interně v Raspberry Pi, stejně jakoby tomu

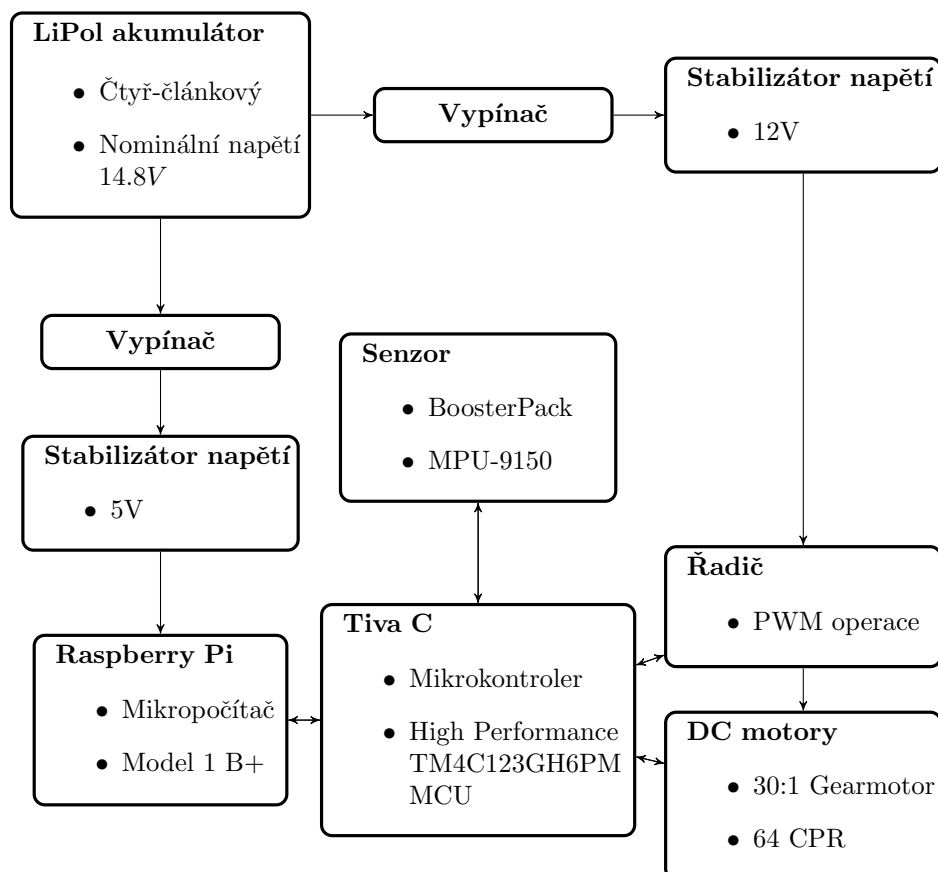
bylo pokud by řídicí deska Tiva byla připojena ke klasickému počítači. Dále je nutné zmínit, že pro tento způsob zapojení je nutné přepínač vyskytující se na desce mít v poloze "Debug".



Obrázek 3.4: Modul 3

3.1.4 Spojení modulů

V této části bude uveden diagram spojení všech předchozích modulů. Takto je výsledně realizováno sestavení a zapojení celého Ballbotu.



Obrázek 3.5: Celkové zapojení elektronických komponent

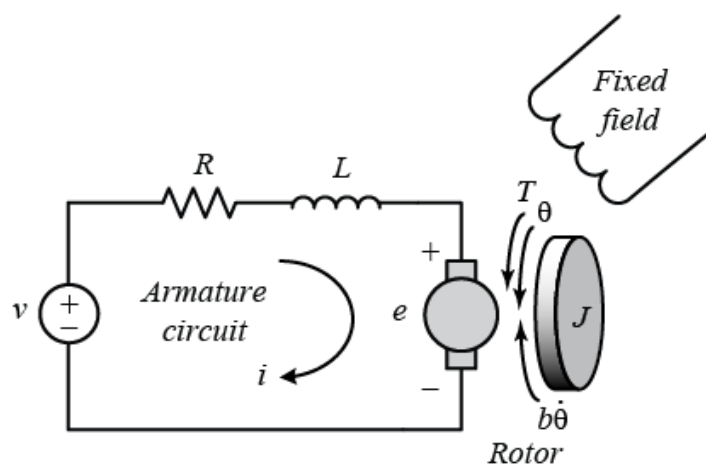
Kapitola 4

Řízení DC motorů

Tato kapitola se zabývá nastíněním modelu stejnosměrných motorů a kvadrantními enkodéry s jejich funkcí. Dále bude popsáno jakým způsobem je možné spočítat rychlost otáčení kol. Na konci této kapitoly bude uvedeno jakým způsobem regulovat a řídit stejnosměrné motory.

4.1 Model motoru

Stejnosemřný motor je složen ze statoru a rotoru. Stator se skládá z permanentních magnetů a rotor z cívek. Dochází k indukci orientovaného magnetického pole. Tímto dochází k otočení hřídele motoru. Změnou orientace magnetického pole dochází k opětovným pootočením motoru. Pro návrh modelu využijeme některých předpokladů. Za vstup budeme považovat napětí přivedené do kotvy elektromotoru a za výstup úhlovou rychlost otáčení hřídele ω . Budeme uvažovat konstantní magnetické pole. Točivý moment bude přímo úměrný proudu a velikosti magnetického pole.



Obrázek 4.1: Model DC motoru (převzato z [21])

značení:

J - moment setrvačnosti rotoru

$\dot{\varphi}$ - třecí moment

b - viskózní tření

φ - úhel natočení hřídele

M - kroutící moment

u - napětí přiváděné do kotvy

R - odpor vinutí kotvy

L - Indukčnost vinutí kotvy

u_e - vzniklé napětí

i - proud procházející kotvou

Elektromotorická síla je úměrná úhlové rychlosti otáčení motoru $\frac{d\varphi}{dt}$. Využijeme druhého Newtonova zákona a také Kirchhoffových zákonů dostáváme rovnice:

$$Ri + L\frac{di}{dt} = u - K_f\frac{d\varphi}{dt} \quad (4.1)$$

$$K_t i = J\frac{d^2\varphi}{dt^2} + b\frac{d\varphi}{dt} \quad (4.2)$$

K_f a K_t jsou konstanty a to elektrická a motoru. Napětí je pak u . Využitím Laplaceovy transformace získáme přenos $u - > \frac{d\varphi}{dt}$.

$$F(s) = \frac{K_t}{(Js + b)(Ls + R) + K_t K_f} \quad (4.3)$$

U tohoto modelu není zahrnuta nelinearita motoru. Reálně by se jednalo o nelineární systém. U toho modelu také není bráno v potaz mrtvé pásmo. Je nutné tedy překonat určité vstupní napětí než se motor uvede do pohybu. Z přenosu vyplývá, že stejnosměrný motor je systém druhého řádu [22].

4.2 PWM

Pulzně šířková modulace je metoda s jakou lze regulovat například jas LED diod nebo také v našem případě otáčky stejnosměrných motorů. Toho lze docílit pomocí dvoustavového signálu, který nabývá hodnot log. 1 a log. 0. Důležitými parametry pro PWM jsou frekvence a střída. Frekvence určuje s jakou rychlostí bude docházet ke změně stavu. Střída je pak poměr mezi stavy log. 1 a log. 0. Čas v kterém dojde k přenosu jedné střídy se označuje jako perioda. Hlavním cílem této metody je tedy, pomocí střídy za periodu řídit střední hodnotu výstupní hodnoty. V této práci je výstupní hodnotou napětí. Pomocí PWM dochází ke změně vstupního napětí 12V na požadovanou střední hodnotu napětí[25].

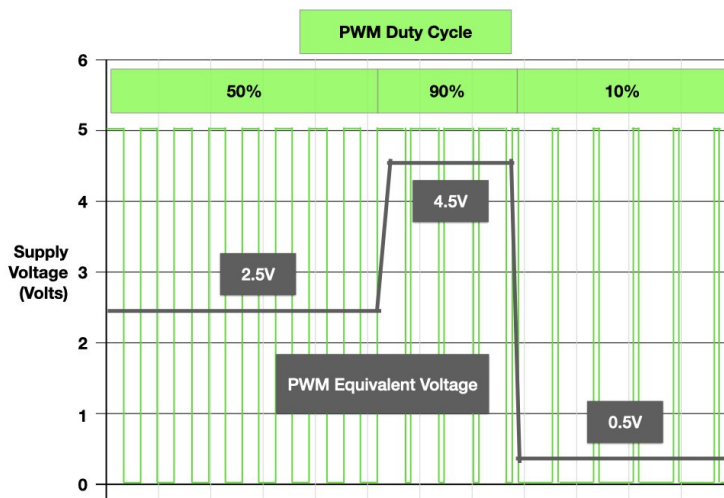
4.3 Charakteristiky motorů

Střední hodnota napětí PWM je rovna násobku napájecího napětí a střidy. Například pokud je napájecí napětí 12V se střidou 100% pak je střední hodnota napětí:

$$12V \cdot \left(\frac{100\%}{100}\right) = 12V \quad (4.4)$$

Pokud změním střidu na 25% pak získáváme ekvivalentní napětí:

$$12V \cdot \left(\frac{25\%}{100}\right) = 3V \quad (4.5)$$



Obrázek 4.2: Ukázka střidy (převzato z [35])

Zde je znázorněna změna střední hodnoty napětí při změně střidy na 50%, 90% a 10% pro napájecí napětí 5V. Zatímco střidou lze řídit rychlost motorů. Samotná frekvence PWM signálů může mít dramatický efekt na efektivitu řízení stejnosměrných motorů a to hlavně pokud se střida dostává pod hranici 30%.

Při výpočtu PWM střední hodnoty napětí se obecně předpokládá, že se motor bude chovat ideálně tzn. jakoby byl připojen ke zdroji napětí přímo. Jelikož stejnosměrné motory mají fyzickou konstrukci, která se nechová přesně jako ideální motor dochází tak k omezení PWM pásma, kde opravdu dochází k pohybu motoru. Při vysokých PWM rychlostech se pulzy z řídicí desky mění natolik rychle, že nejsou schopné poskytnout dostatečnou střední hodnotu napětí. Snížením PWM frekvence je možné dosáhnout zvýšení použitelného rozsahu otáček motoru.

Aby bylo možné zjistit nejvhodnější PWM frekvenci je vhodné zjistit odezvu motoru na tento parametr. Je vhodné začít od nízkých frekvencí až po

vysoké a sledovat jakým způsobem se pohybuje práh roztočení motoru. Obecně na nižších frekvencích pod 60Hz může docházet k vibracím a třasu motoru. Práh otáčení motoru je však na těchto frekvencích nejnižší a motoru je schopný reagovat na nízkou střední hodnotu napětí. Je proto vhodné zvolit PWM frekvenci tak, aby nedocházelo k vibracím na motoru, ale zároveň zůstal práh otáčení co nejnižší[35].

4.4 Kvadraturní enkodéry

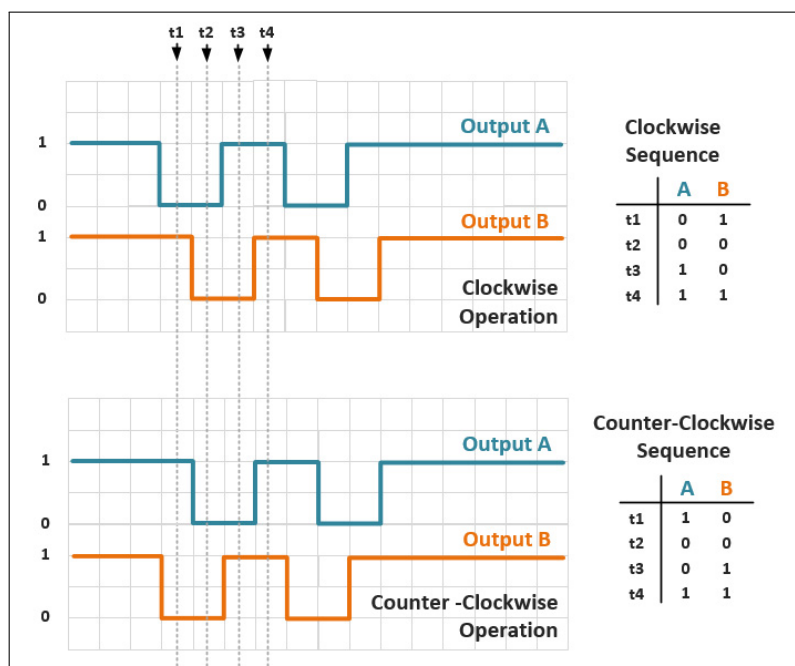
Každý z motorů je vybaven kvadraturním enkodérem. Kvadraturní enkodéry slouží ke měření polohy a směru otáčení kola na daném motoru. Na základě měření polohy kola je možné dopočítat úhlovou rychlost ω daného kola. Tato informace je pak dále využívána v PID regulátoru. Tyto enkodéry patří do skupiny inkrementálních enkodérů, kdy kvadraturní jsou z důvodu generování čtyř různých stavů. Ke generování impulsů může docházet několika způsoby a to magnetickým, mechanickým a optickým. Použité kvadraturní enkodéry využívají právě magnetický způsob generování impulsů.

4.5 Magnetické enkodéry

Magnetické enkodéry obsahují dvě části rotor a stator. Statorová část obsahuje prvek k detekci změn magnetických pólů, ke kterým dochází při otáčení rotoru. U rotoru dochází k otáčení spolu s hřídelí. Rotor obsahuje střídavě umístěné jižní a severní póly magnetu. K detekování této změny se využívají dva hlavní způsoby a to magnetorezistence a Hallův jev. Magnetorezistence se využívá u takzvaných magnetorezistenčních snímačů. Ty jsou vyrobeny z materiálu, který reaguje změnou odporu podle toho v jakém magnetickém poli se právě nachází. Hallova jevu využívají Hallovy sondy. Na těchto sondách vzniká elektrické napětí, které je přímo úměrné magnetické indukci daného magnetického pole v kterém se sonda nachází.

4.6 Funkce enkodéru

Dvoukanálový Hallův senzor se používá ke snímání rotace magnetického disku. Kvadraturní enkodér poskytuje rozlišení 64 impulsů na 1 otáčku hřídele motoru, pokud uvažujeme oba okraje obou kanálů. Hallův senzor potřebuje vstupní napětí mezi 3.5V a 20V. Výstupy *A* a *B* jsou čtvercové signály, které jsou fázově posunuté o 90°. Z frekvence přechodů lze zjistit rychlost motoru a z pořadí přechodů směr otáčení. Z důvodu čtení výstupů *A* a *B*, je nutné zajistit, aby bylo možné vyvolat přerušení na základě změny každého z těchto signálů[20].



Obrázek 4.3: Funkce enkodéru (převzato z [20])

4.7 Implementace enkodéru

Enkodér vybraných motorů je schopen měřit změnu signálů 64x za jednu otáčku hřídele. Poměr převodu je u stejnosměrných motorů 30:1. Na těchto dvou parametrech závisí přesnost měření rychlosti kola. Ze zjištěných informací lze spočítat, že počet pulzů N_{pulz} za otáčku kola je:

$$N_{pulz} = 64 \cdot 30 = 1920 \quad (4.6)$$

Zpracování těchto signálů je realizováno pomocí následující tabulky:

	Předchozí stav	1	2	3	4
Aktuální stav		00	01	10	11
0	00	X	dec	inc	X
1	01	inc	X	X	dec
2	10	dec	X	X	inc
3	11	X	inc	dec	X

Tabulka 4.1: Zpracování signálů z enkodéru (převzato z [37])

Matice obsahuje přechody stavů, které jsou popsány dvěma bity. Pomocí matice je implementován šestnáctimístný řádkový vektor. Pomocí předchozího a aktuálního stavu získáváme čtyři bitovou informaci. Ta je uložena na čtyřech dolních bitech, které jsou využity pro přesnou adresaci v řádkovém vektoru. Z tohoto řádkového vektoru, je následně získáván počet pulzů při otáčení motoru[37].

4.8 Měření a výpočet rychlosti

Nejjednodušším způsobem, jak odhadnout rychlost, je změřit změnu v pozici a vydělit jí změnou v čase. Tento problém se dá rozdělit na dvě klasické možnosti. První možností je spustit kód s pevně danými časovými úseky. V každém časovém okamžiku změřit pozici a následně dostat změnu pozice mezi dvěma po sobě jdoucími měřeními. Druhou možností je kdy kód je spuštěn změnou stavu enkodéru. Změří se uběhnutý čas a opět se spočítá změna mezi dvěma po sobě jdoucími měřeními. Tyto dva způsoby se také dají rozdělit z pohledu rychlosti otáček[23].

4.8.1 Měření rychlosti pro nízké otáčky

Při této metodě se měří čas mezi jednotlivými impulsy. K tomuto využijeme následující rovnice, která obsahuje konstantní vzdálenost a časový interval mezi impulsy:

$$v(k) = \frac{X}{t(k) - t(k-1)} = \frac{X}{\Delta T} \quad (4.7)$$

Značení:

$v(k)$ = rychlost v okamžiku k

$t(k)$ = časový okamžik k

$t(k-1)$ = časový okamžik v $k-1$

X = ujetá vzdálenost

ΔT = časový interval mezi impulsy

Zde je nutné si ukládat čas mezi dvěma po sobě jdoucími impulsy. Dále je nutné znát počet impulsů na jednu otáčku. Výhodou je, že není nutné znát periodu vzorkování. Přesnost této metody pak záleží na dané časové jednotce.

4.8.2 Měření rychlosti pro vysoké otáčky

Při této metodě je určena konstantní perioda čtení počtu impulsů. K tomuto využijeme následující rovnice, která obsahuje konstantní časový interval a vzdálenost za daný čas:

$$v(k) = \frac{x(k) - x(k-1)}{T} = \frac{\Delta X}{T} \quad (4.8)$$

Značení:

$v(k)$ = rychlost v okamžiku k

$x(k)$ = poloha v časovém okamžiku k

$x(k-1)$ = poloha v okamžiku $k-1$

T = časový interval

ΔX = ujetá vzdálenost

U této metody je nutné si ukládat počet naměřených impulsů z minulého měření. Zde je také nutné znát počet impulsů na jednu otáčku. Přesnost této metody pak záleží na počtu impulsů a na periodě s jakou jsou čteny[23].

4.9 PID regulátor

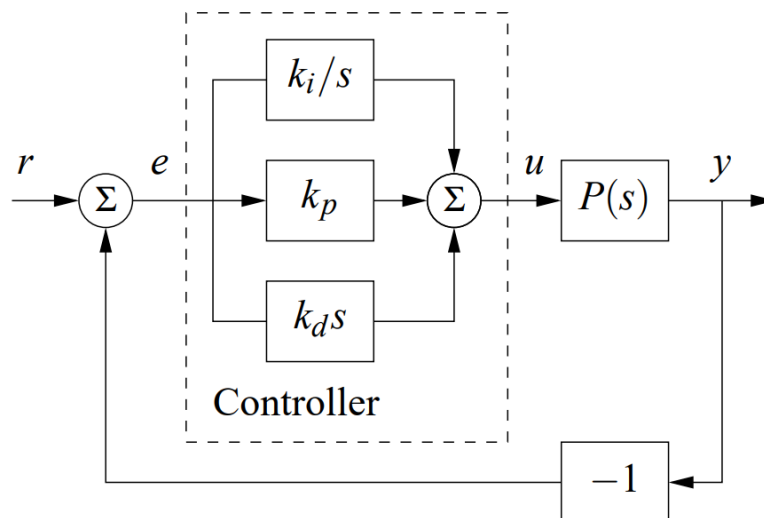
V této části bude popsáno navržení zpětnovazebního regulátoru pro řízení motoru napájeného stejnosměrným napětím. Tento regulátor je určený k regulaci úhlové rychlosti daných motorů na získanou referenční hodnotu. Tento regulátor bude realizován na desce Tiva C. Z enkodéru motoru získáme aktuální úhlovou rychlost ω . Požadavek na regulátor bude, aby generoval řízení. To je závislé na regulační odchylce: $e(k) = \omega(k) - y(k)$.

- $e(k)$ - je regulační odchylka
- $w(k)$ - je referenční signál
- $y(t)$ - je výstup

Zvolený PID regulátor je s jedním stupněm volnosti. Kde vstupem pro náš implementovaný regulátor je požadovaná úhlová rychlost a aktuální úhlová rychlost. Výstupem regulátoru je řídicí signál. Řídicí signál je poté použit pro pulzně šířkovou modulaci, která je poslána na konkrétní řadič. Tento PID regulátor má tři základní složky a to:

- P - proporcionální člen
- I - integrální člen
- D - derivační člen

PID řízení je zdaleka nejpoužívanější způsob využití zpětné vazby v systémech. PID regulátory se vyskytují v mnoha podobách jako samostatný, vestavěný a nebo jako součást hierarchického řídicího systému. Část regulátorů nevyužívá derivační složku například kvůli zhoršení působícího šumu.



Obrázek 4.4: PID regulátor se zpětnou vazbou (převzato z [33])

Řídící signál u je zcela získán z regulační odchylky e . V této konfiguraci se nenachází dopředná vazba. Zmíněný referenční signál se také označuje jako setpoint. Vstupně výstupní vztah ideálního PID regulátoru se zpětnou vazbou lze získat pomocí následujícího vztahu:

$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} = k_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (4.9)$$

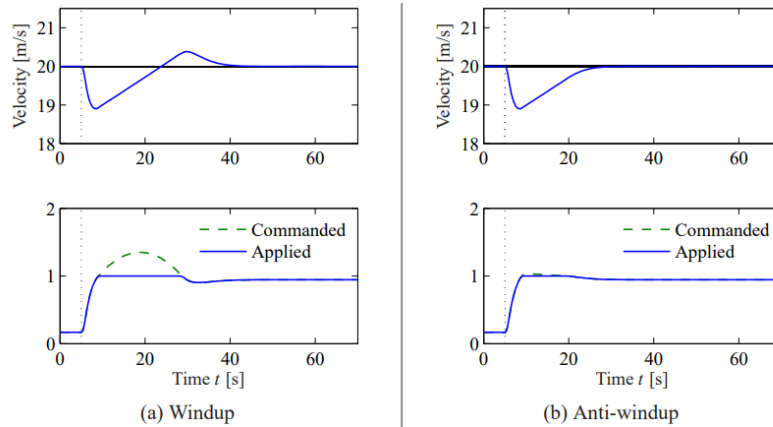
Výstup regulátoru je tedy sumou tří členů. Těmito členy jsou proporcionální, integrální a derivační člen. Parametry regulátoru jsou pak proporcionální složka k_p , integrační složka k_i , a derivační složka k_d . Časové konstanty T_i a T_d , které jsou integrální časová konstanta a derivační časová konstanta. Proporcionální složka je násobkem regulační odchylky. Tato složka má vliv na rychlost změny akčního zásahu avšak pokud k_p dosahuje příliš vysoké hodnoty může docházet ke kmitání a následné nestabilitě. Samotná proporcionální složka není schopná sama dosáhnout nulové regulační odchylky v ustáleném stavu. Integrační složka je součtem regulačních odchylek a napomáhá k dosažení nulové regulační odchylky v ustáleném stavu. Integrační složka může způsobovat oscilace systému [33].

Při implementaci integrační složky, která je součtem regulačních odchylek. Je nutné si dávat pozor na takzvaný windup, což je unášení integrační složky. Tato složka při správné volbě zlepšuje regulaci a zajišťuje nulovou odchylku v ustáleném stavu. K tomuto jevu dochází u reálných systémů, kde dochází k saturaci. V našem případě se jedná o stejnosměrné motory. Ty mají saturaci způsobenou maximální hodnotou, kterou jsme schopni na motor přivést[24].

4.9.1 Unášení integrační složky

Regulátor se pokouší zvětšit akční zásah, ale i tak se regulační odchylka nemenšuje. Dochází k nárůstu integrační složky. Poté pokud se regulátor snaží snížit otáčky motoru, na integrované složce dlouho trvá než začne klesat a tak dochází ke zpoždění regulace.

Řešení unášení integrační složky, je možné provést porovnáním akčního zásahu a mezní povolenou hodnotou saturace. Pokud dojde k překročení této meze je integrační složka nastavena na maximální hodnotu[24].



Obrázek 4.5: Příklad unášení integrační složky (převzato z [33])

Na obrázku je ilustračně ukázáno co se děje pokud dojde k unášení integrační složky. V čase $t = 5$ dochází ke spádu a lze vidět, že dochází ke saturaci motorů. Výstup regulátoru je přerušovaná čára. V pravé části dochází k potlačení unášení tím, že je zabráněno regulační odchylce, aby dále rostla v integrační části PID regulátoru[33].

Existuje několik způsobů jak zabránit unášení integrační složky ty se nazývají Anti-windup. Například existují způsoby inkrementálního algoritmu, zpětného výpočtu a nebo podmíněné integrace. Inkrementální algoritmus lze uplatnit pouze v případě, že je PID regulátor implementován v inkrementální formě.

$$\Delta u(kT) = u(kT) - u((k-1)T) \quad (4.10)$$

Integrace je zastavena pokud přidáním nového $\Delta u(kT)$ dochází k porušení saturační hranice.

Metoda zpětného výpočtu nemá vliv pokud aktuátor není v saturaci $e_t(t) = 0$. Využívá se konstanty T_t , která udává jak rychle je integrátor PID regulátoru resetován. Pokud je aktuální výstup $u(t)$ aktuátoru není měřitelný můžeme využít matematického modelu například:

$$e_t(t) = v(t) - \text{sat}(v(t)) \quad (4.11)$$

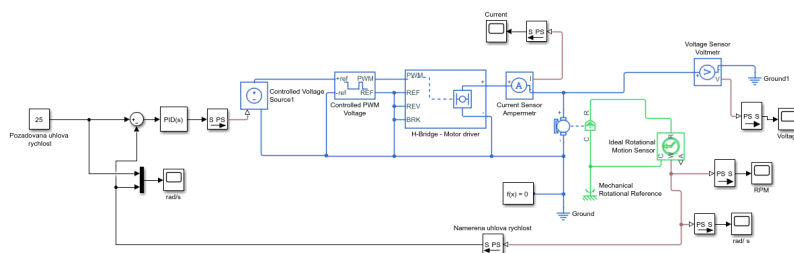
Metoda podmíněné integrace je způsob, kdy dochází k aktualizaci integrační složky $I(t)$ pouze tehdy pokud predikce výstupu y_p v čase $t + T_d$ je v proporcionálním pásmu[34].

4.9.2 PID ve fixed point aritmetice

Tento způsob implementace je efektivnější než jiné způsoby, protože se vyvarujeme náročným operacím s plovoucí čárkou. Tento způsob regulátoru je navržen tak, že přenáší koeficienty s plovoucí čárkou na koeficienty s pevně daným počtem čísel za desetinnou čárkou. Důležité je nastavení frekvence s jakou PID regulátor bude operovat. Koeficienty k_i a k_d jsou škálovány pomocí frekvence H_z . Konkrétní hodnota frekvence pak říká PID regulátoru s jakou frekvencí bude volán.

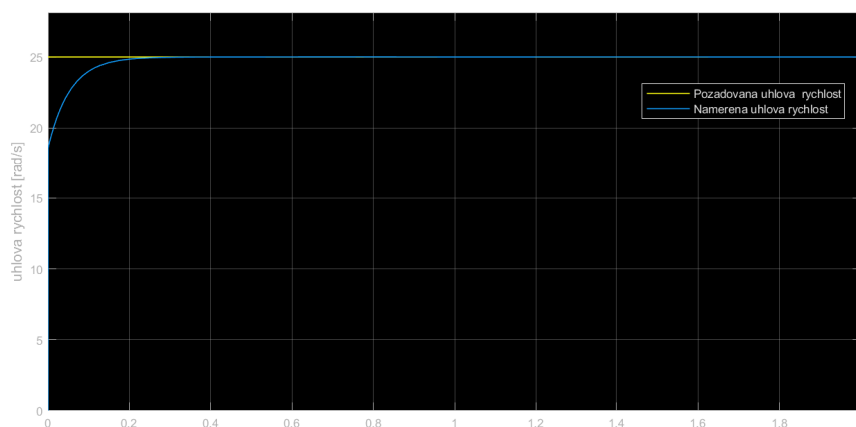
4.10 Simulace

Pro určení parametrů PID regulátoru bylo využito **Simulinku** a rozšiřovací knihovny **simscape**. Simscape umožňuje rychlé zapojení simulačního modelu. Díky blokům, které knihovna **simscape** obsahuje, není nutné odvozovat rovnice stejnosměrného motoru. Blok obsažený v knihovně **simscape** *DC motor* je možné nastavit podle parametrů, které běžně udává výrobce[26].



Obrázek 4.6: Model simulace stejnosměrného motoru s PID

Parametry PID regulátoru byly odvozeny experimentálně pomocí tohoto modelu. Konkrétní hodnoty PID regulátoru jsou následující $P = 1$, $I = 25$ a $D = 10$. V simulačním modelu lze sledovat napětí a proud, které se právě nachází na testovaném stejnosměrném motoru. Je také možné sledovat otáčky za minutu motoru a jeho úhlovou rychlost. Jako nejdůležitější informace, kterou lze získat je však řízení motoru. Toto konkrétní řízení reaguje na požadovanou úhlovou rychlost $\omega = 25[rad/s]$. Na simulaci lze vidět, že k sledování požadované hodnoty je potřeba $0.2[s]$.



Obrázek 4.7: Řízení DC motoru

4.11 Sériová Komunikace

Při práci s vícero zařízeními je komunikace jedna z nejdůležitějších věcí. Sériová komunikace slouží k přenášení dat. V sériové komunikaci dochází k přenosu dat postupně.

UART

Při propojení mikrokontroléru a Raspberry Pi bude využito právě UART protokolu. UART znamená univerzální asynchronní příjem a přenos. V principu jde o asynchronní protokol s více mastery založený na sériové komunikaci. Tímto způsobem je umožněna komunikace mezi dvěma deskami. Rozdíl mezi více mastery a master/slave protokoly je ten, že při více masterech jsou obě připojené zařízení schopné posílat data kdy chtějí. Na Raspberry Pi je možné připojit několik sériových zařízení najednou. Raspberry Pi obsahuje několik USB portů, kdy každý z nich má jiné označení.

Detekování desky a přenášená data

Tiva C je připojena do USB slotu. Konkrétně se jedná o USB vpravo nahoře při pohledu ze předu. Při připojení Tiva C desky je nutné najít správný název připojeného USB. Vybraný port má název: `/dev/ttyACM0`. Hlavním důvodem sériové komunikace mezi řídicími deskami je výměna informací ohledně konkrétního stavu Ballbota. Raspberry Pi má za úkol posílat data z hlavního řídicího softwaru o požadované rychlosti kol. Zatímco Tiva C se stará o posílání informací ze senzorů a to jak z pohybového senzoru MPU-9150, tak z enkodéru o aktuální rychlosti a směru kol Ballbota[27].

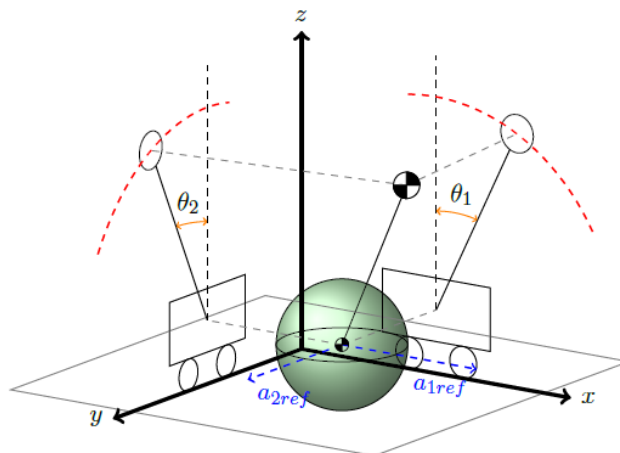
Kapitola 5

Model

V této kapitole bude stručně popsán matematický model 3D inverzního kyvadla a jeho linearizace. Tento model je potřeba získat pro následné použití při regulaci. Tato problematika byla již řešena v jiné Bakalářské práci[12].

5.1 Inverzní kyvadlo - 3D

Je nutné vyjádřit vztahy mezi prostorovým a planárním modelem. Dynamika a kinematika systému jsou zjednodušené na dva kolmé planární modely inverzního kyvadla na pohyblivém vozíku. V plochách XZ a YZ jsou na sebe planární modely kolmé. Zde je možné si představit inverzní kyvadlo v návaznosti s Ballbotem. Kdy poloha vozíku odpovídá poloze míče a aktuální poloha kyvadla odpovídá těžišti robotu. Výchylky ramena kyvadla od osy vozíku pak vyjadřují výchylku robotu. Analogicky lze takto popsat i ostatní stavové proměnné.



Obrázek 5.1: Model inverzního kyvadla - (převzato od [12])

Pohybové rovnice 3D inverzního kyvadla:

$$-m_p g \sin(\theta_1) = m_p \ddot{x}_1 \cos(\theta_1) - m_p L \ddot{\theta}_1 \quad (5.1)$$

$$(m_p + m_c) \alpha_{1ref} + m_p L \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1) - m_p L \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1) = (m_p + m_c) \dot{x}_1 \quad (5.2)$$

$$-m_p g \sin(\theta_2) = m_p \ddot{x}_2 \cos(\theta_2) - m_p L \ddot{\theta}_2 \quad (5.3)$$

$$(m_p + m_c) \alpha_{2ref} + m_p L \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2) - m_p L \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2) = (m_p + m_c) \dot{x}_2 \quad (5.4)$$

5.2 Linearizace modelu

V reálném životě neexistuje čistý lineární systém, avšak u mnoho systému lze malou změnou stavových proměnných dosáhnout přibližně lineárního chování. K linearizaci však dochází pouze v blízkém okolí známého bodu na což je důležité brát zřetel hlavně při odvozování vlastností nelineárního systému.

Linearizaci provádíme na okolí pracovního bodu v našem případě tedy kdy je robot v přímé poloze. Pracovní bod: $\theta_1, \theta_2 = 0$.

Uřídíme a zapíšeme stavy linearizovaného systému:

Stav	x a y	y a z
Úhel	$x_1(t) = \theta_1$	$x_5(t) = \theta_2$
Úhlová rychlost	$x_2(t) = \dot{\theta}_1 = \dot{x}_1$	$x_6(t) = \dot{\theta}_2 = \dot{x}_5$
Dráha	$x_3(t) = x_{x,z}$	$x_7(t) = x_{x,z}$
Rychlost	$x_4(t) = \dot{x} = \dot{x}_3$	$x_8(t) = \dot{y} = \dot{x}_7$

Tabulka 5.1: Stavy linearizovaného systému

Převědeme systém na soustavu n diferenciálních rovnic prvního řádu.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (5.5)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{L} \cos x_1 + \frac{g}{L} \sin x_1 \quad (5.6)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (5.7)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{L m_p}{(m_p + m_c)} \left(\frac{1}{L} \cos x_1 + \frac{g}{L} \sin x_1 \right) \cos x_1 - \frac{L m_p}{(m_p + m_c)} x_2^2 \sin x_1 \quad (5.8)$$

$$\dot{x}_5 = x_6 \quad (5.9)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{L} \cos x_5 + \frac{g}{L} \sin x_5 \quad (5.10)$$

$$\dot{x}_7 = x_8 \quad (5.11)$$

$$\dot{x}_8 = \frac{L m_p}{(m_p + m_c)} \left(\frac{1}{L} \cos x_5 + \frac{g}{L} \sin x_5 \right) \cos x_5 - \frac{L m_p}{(m_p + m_c)} x_6^2 \sin x_5 \quad (5.12)$$

Po zavedení odchylkových proměnných v okolí pracovního bodu a stavové výstupní rovnice dostaneme stavovou výstupní rovnici v odchylkových proměnných. Ta je však formálně shodná se stavovou reprezentací.

$$S(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}) : \ddot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t); \quad (5.13)$$

$$y(t) = \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t) \quad (5.14)$$

Kde $\mathbf{A}..n \times n$, $\mathbf{B}..n \times m$, $\mathbf{C}..p \times n$, $\mathbf{D}..p \times m$

Matice $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ a \mathbf{D} se určují pomocí Jacobiho matic po dosazení pracovního bodu $x(t) = x_r$, $u(t) = u_{konst}$.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\cdot)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(\cdot)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1(\cdot)}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\cdot)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n(\cdot)}{\partial u_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\cdot)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1(\cdot)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_n(\cdot)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_n(\cdot)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\cdot)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial h_1(\cdot)}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_n(\cdot)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial h_n(\cdot)}{\partial u_n} \end{bmatrix}$$

Matice $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ jsou matice rozměrů s konstantními parametry. Vstup a výstup stavové reprezentace není potřeba normalizovat. Hodnoty těchto matic závisí na volbě stavových proměnných.

Dosazení do maticového stavu:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \\ \dot{x}_5(t) \\ \dot{x}_6(t) \\ \dot{x}_7(t) \\ \dot{x}_8(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{g}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{gm_p}{m_c+m_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{g}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{gm_p}{m_c+m_p} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \\ x_7(t) \\ x_8(t) \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ m_c + m_p & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & m_c + m_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (5.15)
 \end{aligned}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \\ x_7(t) \\ x_8(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (5.16)$$

Nyní už stačí pouze dosadit zvolené konstanty g , m_p , m_c a L .

Kdy $g = 9.806[m_s^{-2}]$ je konstanta tíhového zrychlení. Váha míče je $m_c[kg]$. Váha kyvadla je $m_p[kg]$ a délka těla je $L = [m][12]$.

Kapitola 6

Senzory

V této kapitole bude popsáno jaké konkrétní senzory jsou u Ballbota využity. Dále bude popsáno jakým způsobem konkrétní senzory fungují a jaké nám poskytují informace o stavu Ballbota.

6.1 Senzory obecně

Senzor nebo také snímač je zařízení, které měří specifickou fyzikální veličinu a převádí ji na signál. Tento signál je možné poté zpracovat jako zdroj informací pro řídicí systém. Senzorů existuje nespočet druhů, ale pro případ Ballbota se budeme zabývat především inerciálními senzory. Tyto senzory jsou používány k měření pozice a natočení. Mezi tyto senzory patří především gyroskopy, které měří úhlovou rychlost a akcelerometry, které se zabývají měřením zrychlení.

6.2 Gyroskopy

Gyroskopy jsou senzory, které slouží k měření pohybu a to rychlosti otáčení ve stupních za sekundu. Gyroskopy se využívají k měření a určování polohy nebo také natočení kteréhokoliv předmětu. Gyroskopy fungují na principu gyroskopického jevu, tento jev vzniká ve chvíli, kdy je hmotnost soustředěna po obvodu setrvačnicku. Gyroskopy existují v mechanické, optické a nebo integrované podobě. Hlavním principem gyroskopu je pak jeho udržení osy rotace díky momentu setrvačnosti[28].

6.2.1 MPU6050 - gyroskop

Na upevnění gyroskopu ve většině případů záleží. Nejlepší místo je pak s malými vibracemi a na ose těžiště robotu. Gyroskop má několik rozsahů stupnic a je nutné jednu z nich vybrat v tomto případě byla vybrána druhá stupnice. Výstupní hodnota gyroskopu bude 65.5 při $1^\circ/s$. Jako první je nutné kalibrovat gyroskop. Pro správnou funkčnost gyroskopu požadujeme, aby jeho výstup ve chvíli, kdy nedochází k pohybu byl nulový. Pokud, ale gyroskop připojíme zjistíme, že nám gyroskop na výstupu udává, že dochází k pohybu i když k pohybu nedochází. U gyroskopu dochází postupem času k takzvanému unášení. Řešení tohoto problému je docíleno získáním středních hodnot několika prvních měření,

kteře jsou následně vždy odečítány od původní hodnoty. Poté je nutné zjistit obnovovací frekvenci, která bude sloužit k výpočtu příčného a podélného náklonu (pitch a roll). Gyroskop je obecně mnohem méně náchylný na vibrace [30].

6.3 Akcelerometry

Akcelerometry jsou zařízení, které slouží k měření změny rychlosti neboli zrychlení. Akcelerometry se pak často využívají k měření vibrací a pozice. Ve vibrační analýze slouží k měření frekvence, spektra a amplitudy vibrace. Tyto senzory se využívají v široké škále oborů. Těmito obory jsou například: Biologie, průmysl, medicína, přeprava a také navigace[29].

6.3.1 MPU650 - akcelerometr

Akcelerometr je umístěn na stejném místě jako gyroskop. Akcelerometr má několik stupnic a je nutné opět jednu z nich vybrat. Akcelerometr bude vykazovat výstupní hodnotu shodnou se zvolenou stupnicí, kdy na akcelerometr působí gravitační síla $1g = 9.8[m/s^2]$. To znamená, že je akcelerometr v klidovém stavu. Tato hodnota bude 4096 právě při $1g$. Pomocí akcelerometru budeme kompenzovat unášení u gyroskopu. Na začátku je pitch a roll nastaven podle akcelerometru, který je v klidové hodnotě[30].

6.4 Komplementární filtr

Pro získání úhlu Ballbotu je využito komplementárního filtru. Komplementární filtr kombinuje dvě složky v jednu těmi jsou právě vhodné informace jak z akcelerometru tak z gyroskopu. Z krátkodobého hlediska je využito dat z gyroskopu, který je schopný získat přesná měření a není ovlivněn vnějšími vlivy. Z dlouhodobého hlediska je využito dat z akcelerometru u, kterého nedochází k unášení. Základní filtr vypadá následujícím způsobem:

$$angle = 0.98 \cdot (angle + gyroskopData \cdot dt) + 0.02 \cdot (accelerometrData)$$

Konstantu filtru lze pak spočítat:

$$K = \frac{\tau}{\tau + dt}$$

Data z gyroskopu jsou integrována v každém kroku aktuálním úhlem. Tyto data jsou pak zkombinována s daty z akcelerometru, tímto je vypočten úhel naklonění. Funkce komplementárního filtru musí být implementována v nekonečném cyklu. Každou iterací jsou aktualizovány data z gyroskopu. K aktualizování úhlů dochází pomocí poměrů čtení hodnot z gyroskopu a akcelerometru, kdy hlavní složku tvoří data z gyroskopu a malá část z akcelerometru, která zajistí, že nebude docházet u měření k unášení.

Tento filtr je vhodný pro řešení problémů s vyvažováním. Výhodou tohoto filtru je jeho intuitivnost a implementace, kdy nedochází k ovlivnění měření horizontálním zrychlením a unášením gyroskopu[36].

Kapitola 7

Návrh LQ regulátoru

Lineární kvadratický regulátor je optimální zpětnovazební řídicí technika. Tento regulátor patří do skupiny stavových regulátorů, které nezvyšují řád regulační smyčky. Řízení tohoto regulátoru je generováno jako lineární kombinace měřitelných složek vektoru stavu. Hlavním cílem lineárně kvadratického regulátoru je výpočet optimálních řídicích vstupů a minimalizace kumulativních nákladů, kdy je získáno zpětnovazební zesílení zpětnovazebního řízení $u(t) = -\mathbf{K}x(t)$. Toto zpětnovazební zesílení minimalizuje kritérium ztrátové funkce. Ta je definovaná následujícím způsobem:

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T \mathbf{Q}x(t) + u(t)^T \mathbf{R}u(t)) dt \quad (7.1)$$

Toto kritérium popisuje náklady, které jsou funkcí chyby stavu a námahy aktuátoru.

Cílem Lineárního kvadratického regulátoru je minimalizace nákladů stavové chyby, zatímco se snaží minimalizovat náklady námahy aktuátoru. Čím vyšší je stavová chyba, tím jsou vyšší i celkové náklady. Čím vyšší je námaha aktuátoru, tím vyšší jsou celkové náklady. Lineární kvadratický regulátor určuje bod na funkci nákladů, kde je funkce minimální. Tímto způsobem balancuje oba cíle a to udržení stavové chyby a námahy aktuátoru na minimu.

V případě, že nejsou pozorovatelné všechny složky vektoru stavu je nutné navrhnout rekonstruktor stavu. U Ballbota jsou však všechny stavy pozorovatelné a tím pádem není nutné rekonstruktor stavu realizovat[31][12].

7.1 Matice \mathbf{Q} a \mathbf{R}

Matice \mathbf{Q} reprezentuje váhu regulační odchylky. Matice \mathbf{Q} nám pomáhá určit relativní váhu důležitosti každého stavu ve stavovém vektoru. Matice \mathbf{Q} je čtvercová matice, která má stejný počet řádků a sloupců jako je počet stavů. Tato matice penalizuje špatný výkon např. velké rozdíly mezi požadovaným stavem a stavem aktuálním. Musí být také pozitivně semidefinitní. Pomocí této matice můžeme určovat v jakém stavu požadujeme malou chybu tím, že se u tohoto stavu nastaví velká hodnota. Matice \mathbf{R} reprezentuje váhu akčních zásahů řízení. Tato matice penalizuje námahu aktuátoru. Matice \mathbf{R} má stejný počet

řádků a sloupců jako řídicích vstupů. Tato matice musí být pozitivně definitní. Pomocí této matice můžeme určit u kterých stavů aktuátoru požadujeme malou námahu aktuátoru tím, že se u toho stavu nastaví opět velká hodnota. V našem případě u Ballbota budou vypadat matice \mathbf{Q} a \mathbf{R} následujícím způsobem:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & & \\ & \ddots & \\ & & q_8 \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & & \\ & \ddots & \\ & & r_2 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

7.2 Zpětnovazební zeslení a Riccatiho rovnice

Zpětnovazební zeslení se získá z následující rovnice:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (7.4)$$

Zpětnovazební zeslení obsahuje hodnoty optimálního zpětnovazebního zeslení. Tato matice, když se vynásobí z chybou stavu, pak jsme schopni generovat vstupy optimálního řízení.

Matice \mathbf{P} je řešení takzvané Algebraické Riccatiho rovnice a vypadá následovně:

$$0 = \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} \quad (7.5)$$

Je to typ nelineární rovnice, který vzniká v kontextu s problémem optimálního řízení nekonečného horizontu v čase. Tato rovnice má vždy řešení, pokud jsou matice \mathbf{Q} a \mathbf{P} pozitivně definitní.

7.3 Lineární kvadratický regulátor

Při návrhu regulátoru využijeme postupu z minulé sekce. Je nutné zvolit váhové matice \mathbf{Q} a \mathbf{R} . Pro matici jsou zvolené váhy 20 pro oba akční zásahy, tyto hodnoty jsou menší z důvodu realizace akčních zásahů. Konstanty zvolené pro matici \mathbf{Q} závisí na důležitosti stavu, kdy nejvíce důležité jsou stavy výchylky, které jsou nastavené na 250. Stav dráhy jsou pak nastavené na hodnotu 50, přičemž zbytek je roven 1. Tyto hodnoty byly převzaty z jiné Bakalářské práce.

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(250, 1, 50, 1, 250, 1, 50, 1) \quad (7.6)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

7.4 Implementace LQ regulátoru

LQ regulátor je implementován na straně Raspberry Pi a pomocí programu Python. Jako první je potřeba nastavit všechny potřebné matice, které jsou v LQ regulátoru využity. Těmito maticemi jsou \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{R} a \mathbf{Q} . Poté je nutné uvést požadovaný stav, v našem případě se jedná o stabilní polohu Ballbota. Poslední důležitá informace je aktuální stav Ballbota. Pomocí dynamického programování je vypočtena Algebraická Riccatiho rovnice. Z této rovnice lze nyní spočítat optimální zpětnovazební zesílení \mathbf{K} . Jakmile je známo \mathbf{K} je možné spočítat optimální řídicí vstup.

Kapitola 8

Závěr

Pro návrh robotu na míči byly vybrány a popsány hardwarové komponenty, které slouží k běhu robotu. Dále byla upravená mechanická konstrukce Ballbota pro lepší zapojení a uschování elektronických komponentů. Elektronické zapojení komponent je pak rozděleno do několika přehlednějších modulů.

Pro řízení stejnosměrných motorů byl vytvořen zjednodušený matematický model těchto motorů. K řízení bylo nutné implementovat kvadrurní enkodéry a PID regulátor. Nastavení PID regulátoru bylo provedeno pomocí simulace.

Následně byla vytvořena sériová komunikace pro hlavní řídicí jednotky. Pro řízení celého robotu byl popsán model inverzního kyvadla a jeho linearizace. Informace o pohybu Ballbota jsou pak získány z implementovaných senzorů. Jako poslední je pak popsán lineární kvadratický regulátor.

Dalším cílem budoucí práce, je umožnění Ballbotu sledování trajektorie a tím uskutečnit pohyb v prostoru. Pro robot uskutečnit dálkové ovládání pro uživatele. Umístit na robot senzory pro sledování jeho okolí a možnost reakce na vnější vlivy.

Seznam tabulek

3.1	Tabulka zapojení pro první motor a driver	21
3.2	Tabulka zapojení pro druhý motor a driver	21
3.3	Tabulka zapojení pro třetí motor a driver	21
4.1	Zpracování signálů z enkodéru (převzato z [37])	29
5.1	Stavy linearizovaného systému	37

Seznam obrázků

2.1	Čtyři ortogonální kola ve středu míče - (pořízeno z [6])	12
2.2	Čtyři ortogonální kola nad středem os míče - (pořízeno z [6])	12
2.3	Tři směrová kola nad středem os míče - (pořízeno z [6])	13
2.4	Všesměrová kola - (pořízeno z [32])	14
2.5	Všesměrová kola	16
3.1	Pinout diagram - (pořízeno z [38])	22
3.2	Modul 1	22
3.3	Modul 2	23
3.4	Modul 3	24
3.5	Celkové zapojení elektronických komponent	24
4.1	Model DC motoru (převzato z [21])	25
4.2	Ukázka střídý (převzato z [35])	27
4.3	Funkce enkodéru (převzato z [20])	29
4.4	PID regulátor se zpětnou vazbou (převzato z [33])	31
4.5	Příklad unášení integrační složky (převzato z [33])	33
4.6	Model simulace stejnosměrného motoru s PID	34
4.7	Řízení DC motoru	34
5.1	Model inverzního kyvadla - (převzato od [12])	36

Literatura

- [1] *Wikipedie [Robot]* [online]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Robot>
- [2] *M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and the BigDog Team [Bigdog, the rough-terrain quadraped robot]*. 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2008, pp. 10 822–10 825.
- [3] *J. Grizzle, J. Hurst, B. Morris, H.-W. Park, and K. Sreenath [“Mabel, a new robotic bipedal walker and runner”]*. American Control Conference, St. Louis, MO, June 2009
- [4] *Umashankar Nagarajan [Dynamic Constraint-based Optimal Shape Trajectory Planner for Shape-Accelerated Underactuated Balancing Systems]* [online]. Dostupné z:
<https://doi.org/10.15607/RSS.2010.VI.031>
- [5] *Koos van der Blonk [MODELING AND CONTROL OF A BALL-BALANCING ROBOT]* [online]. Dostupné z:
<https://essay.utwente.nl/65559/>
- [6] *Justin FONG, Simon UPPILL, Ben CAZZOLATO [899: BALLBOT]* [online]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/235898240_899_BALLBOT
- [7] *Fankhauser, Péter; Gwerder, Corsin [Modeling and Control of a Ballbot]* [online]. Dostupné z:
<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/154271>
- [8] *T. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis [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, pages 2884–2889. IEEE, 2006.
- [9] *M. Kumaga and T. Ochiai [Development of a robot balanced on a ball: Application of passive motion to transport]*. In Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on, pages 4106–4111. IEEE, 2009.
- [10] *J. Fong and S. Uppill [Ballbot: Preliminary report]*. Mechatronics honours project, University of Adelaide, 2009.

- [11] C.-C. Tsai, C.-K. Chan, and L.-C. Kuo. [Lqr motion control of a ball-riding robot]. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2012 IEEE/ASME International Conference on*, pages 861–866. IEEE, 2012
- [12] Dach, A. [Návrh, modelování a řízení mobilního robotu balancujícího na míči.]. Plzeň, 2016
- [13] Texas Instruments [Sensor Hub BoosterPack] [online]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ug/spmu290/spmu290.pdf>
- [14] InvenSense [MPU-9150] [online]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9150/>
- [15] Pololu [0:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V with 64 CPR Encoder] [online]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2823>
- [16] Gregor Klančar Andrej Zdesar Saso Blazic Igor Skrjanc [WHEELED MOBILE ROBOTICS From Fundamentals Towards Autonomous Systems]. 10th January 2017
- [17] Acepow Electronics [GENS-ACE 4S 14.8V 5000MAH LIPO BATTERY] [online]. Dostupné z: <https://www.rchobbies.co.nz/gens-ace-4s-14-8v-5000mah-50c-hardcase-rc-car-lipo-battery>
- [18] Raspberry Pi [Raspberry Pi 2014] [online]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org>
- [19] Texas instruments [TM4C123G] [online]. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL>
- [20] Tim Youngblood [How to Use a Rotary Encoder in an MCU-Based Project] [online]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/how-to-use-a-rotary-encoder-in-a-mcu-based-project/>
- [21] Control tutorials [DC Motor Speed: System Modeling] [online]. Dostupné z: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>
- [22] Švec, J. [Návrh, řídicího systému kolového robota s využitím softwarového rámce ROS]. Plzeň, 2019
- [23] Martin Locker [Inkrementální enkodér] [online]. Dostupné z: <http://robotika.vosrk.cz/guide/sensors/decode/cs>. 2009
- [24] J. Melichar [Lineární systémy 2, 2011. Pomocný učební text.] [online]. Dostupné z: <http://www.kky.zcu.cz/cs/courses/ls2>.

- [25] *MT* [*Pulzně šířková modulace – PWM*] [online]. Dostupné z:
<http://www.tajned.cz/2015/06/pulzne-sirkova-modulace-pwm-2/>
- [26] *MT* [*DC Motor Model*] [online]. Dostupné z:
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/example-modeling-a-dc-motor.html>
- [27] *The robotics Back-End* [*Raspberry Pi Arduino Serial Communication*] [online]. Dostupné z:
<https://roboticsbackend.com/raspberry-pi-arduino-serial-communication/>
- [28] *Antonín Vojáček* [*Integrované MEMS GYROSKOPY*] [online]. Dostupné z:
<https://automatizace.hw.cz/integroovane-mems-gyroskopy>
- [29] *Engineers Edge* [*Accelerometers Review and Application*] [online]. Dostupné z:
<https://www.engineersedge.com/instrumentation/accelerometers.htm>
- [30] *Brokking* [*MPU-6050 6dof IMU*] [online]. Dostupné z:
<http://www.brokking.net/imu.html>
- [31] *Automatic Adison* [*Linear Quadratic Regulator (LQR) With Python Code Example*] [online]. Dostupné z:
<https://automaticaddison.com/linear-quadratic-regulator-lqr-with-python-code-example/>
- [32] *David Grigarčík* [*Konstrukční návrh všesměrového kola pro velká zatížení*]. Ostrava, 2018
- [33] *Karl Johan Aström, Richard M. Murray* [*“Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers”*]. In the United Kingdom: Princeton University Press, 2020
- [34] *Prof. Alberto Bemporad* [*“Anti-windup techniques”*]. University of Trento 2010
- [35] *Jan Goolsbey* [*Improve Brushed DC Motor Performance*] [online]. Dostupné z:
<https://learn.adafruit.com/improve-brushed-dc-motor-performance/>
- [36] *Shane Colton* [*The Balance Filter*] [online]. Dostupné z:
https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_44/ourdev_665531S2JZG6.pdf
- [37] *ING. FLÁDR MIROSLAV, PH.D.* [*POSS, 2021.*] Laboratorní cvičení - Platforma arduino - enkodéry.
- [38] *Energia* [*Guide to the TM4C123 LaunchPad*] [online]. Dostupné z:
<https://energia.nu/pinmaps/ek-tm4c123gx1/>