

Vývoj prototypu 2-kolového robota ovládaného mobilním zařízením

Bc. Tomáš Makyča

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Makyča**
Osobní číslo: **A22320**
Studijní program: **N0714A150006 Automatické řízení a informatika v průmyslu 4.0**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Vývoj prototypu 2-kolového robota ovládaného mobilním zařízením**
Téma práce anglicky: **Development of a Two-Wheeled Robot Prototype Controlled by a Mobile Device**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Navrhněte a realizujte funkční prototyp 2-kolového robota pro didaktické účely, ovládaného mobilním zařízením.
3. Pro tyto účely vyberte a implementujte vhodné HW i SW řešení tak, aby bylo možno daný model jednoduchou formou ovládat pomocí mobilního telefonu pod OS Android.
4. Navrhněte vhodný řídicí algoritmus zabezpečující stabilizaci robota a jeho pohyb v požadovaném směru.
5. Vytvořený prototyp důkladně otestujte a kriticky zhodnotte dosažené výsledky.
6. V závěru odhadněte ekonomickou náročnost výroby daného modelu a posudte jeho vhodnost pro didaktické a propagační účely.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. KNAPIK, D.; KOLEK, K.; ROSOL, M. a TURNAU, A. Autonomous, reconfigurable mobile vehicle with rapid control prototyping functionality. Online. *IFAC-PapersOnLine*. 2019, roč. 52, č. 8, s. 13-18. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.041>. [cit. 2023-11-09].
2. JIMÉNEZ, A.; JIMÉNEZ, F. a RUGE, I. Modeling and Control of a Two Wheeled Self-Balancing Robot: a didactic platform for control engineering education. Online. In: *Proc. 18th LACCEI Int. Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. Latin American and Caribbean Cons. of Engineering Institutions, 2020. ISBN 9789585207141. Dostupné z: <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.556>. [cit. 2023-11-09].
3. CHAROUS, Z. *Modelování a řízení 2-kolového nestabilního transportéru Inteco*. Zlín, 2021. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
4. HESS, L. *Návrh dvoukolového autonomního robota*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
5. KADLEC, T. *Konstrukce a řízení nestabilního podvozku mobilního robota*. Pardubice, 2014. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
6. BALÁTEĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN, 2004. ISBN 978-80-7300-148-3.
7. SKOGESTAD, S. a POSTLETHWAITE, I. *Multivariable feedback control: analysis and design*. Chichester: Wiley, 2008. ISBN 0-470-01168-8.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. František Gazdoš, Ph.D.**
Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **8. prosince 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2024**

doc. Ing. Jirí Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 8. prosince 2023

Jméno, příjmení: Tomáš Makyča

Název bakalářské/diplomové práce: Vývoj prototypu 2-kolového robota ovládaného mobilním zařízením

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 21.5.2024

Bc. Tomáš Makyča
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Předkládaná práce popisuje problematiku balancujících dvoukolových robotů na principu inverzního kyvadla a způsoby použitelné k jejich řízení. Dále jsou uvedeny základní komponenty, které jsou dále použity v praktické části, která zohledňuje vhodný návrh, vlastní sestavení, naprogramování a kompletní realizaci funkčního prototypu dvoukolového robota ovládaného pomocí mobilní aplikace. Poslední kapitola je zaměřena na patřičné otestování sestaveného prototypu a zhodnocení dosažených výsledků, a to včetně odhadu jeho cenové a časové náročnosti.

Klíčová slova: dvoukolový robot, inverzní kyvadlo, nestabilní systém, PID regulace, Bluetooth ovládání

ABSTRACT

This thesis describes the problem of balancing two-wheeled robots based on the inverse pendulum principle and the methods used to control them. Furthermore, the basic components are presented, which are then used in the practical part, which takes into account the appropriate design, actual assembly, programming and complete implementation of a functional prototype of a two-wheeled robot controlled by a mobile application. The last chapter focuses on the proper testing of the developed prototype and the evaluation of the achieved results, including the estimation of its cost and time requirements.

Keywords: two-wheeled robot, inverted pendulum, unstable system, PID control, Bluetooth control

Chci poděkovat všem, kteří mi pomohli s tvorbou této práce a to jak na konzultacích s doc. Ing. Františkem Gazdošem, PhD., tak s podporou rodiny a mé přítelkyně.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

I	TEORETICKÁ ČÁST	11
1	ÚVOD	12
2	LITERÁRNÍ REŠERŠE	13
2.1	INVERZNÍ KYVADLO	13
2.2	VYBRANÉ REALIZACE DVOUKOLOVÝCH BALANCUJÍCÍCH ROBOTŮ	14
3	ROBOTIKA	19
3.1	ROBOT.....	19
3.2	AUTONOMNOST	19
3.3	ROZDĚLENÍ PODLE PROSTŘEDÍ.....	20
3.4	KONSTRUKCE ROBOTŮ	20
3.4.1	Stacionární roboty	20
3.4.2	Mobilní roboty	21
3.5	KONSTRUKCE TYPU INVERZNÍ KYVADLO.....	22
3.5.1	Inverzní kyvadlo.....	22
3.5.2	Autonomní stabilita dvoukolového robota.....	24
3.6	VYBRANÉ DRUHY VHODNÉ REGULACE	25
3.6.1	LQR.....	25
3.6.2	PID	25
3.6.3	Fuzzy	26
3.6.4	MPC	27
4	ZÁKLADNÍ PRVKY DVOUKOLOVÉHO ROBOTA	28
4.1	KLÍČOVÉ KOMPONENTY	28
4.2	MIKROKONTROLÉR	29
4.2.1	Princip mikrokontroléru	30
4.2.2	Rozdělení mikropočítačů dle jejich architektury	30
4.2.3	Řídicí jednotka Arduino	32
4.3	ELEKTRICKÉ MOTORY - POHON	35
4.3.1	Synchronní stejnosměrné motory	35
4.4	ZPŮSOBY ŘÍZENÍ MOTORŮ	37
4.4.1	Ovládání stejnosměrných motorů	37
4.4.2	Ovládání krokových motorů	37
4.5	SNÍMAČE	39
4.5.1	Rozdělení snímačů	40
4.5.2	Měření náklonu	40
4.6	KOMUNIKACE.....	42
4.6.1	Drátová komunikace	42

4.7	AKUMULÁTOR.....	46
4.7.1	Niklové baterie	47
4.7.2	Lithiové baterie	47
4.7.3	Olověné baterie	47
5.1	HISTORIE 3D TISKU	48
5.2	NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ 3D TISKOVÉ TECHNOLOGIE.....	48
5.3	3D TISKOVÉ MATERIÁLY	49
5.5	3D MODELOVÁNÍ A PŘÍPRAVA K TISKU	50
6	REGULACE	52
6.1	KLASIFIKACE ŘÍZENÍ	52
6.2	ZÁKLADNÍ ZPĚTNOVAZEBNÍ REGULAČNÍ OBVOD	52
6.3	PID REGULACE.....	53
6.3.1	Proporcionální regulátor.....	53
6.3.2	Integrační regulátor	54
6.3.3	Proporcionálně-integrační (PI) regulátor	55
6.3.4	Proporcionálně-derivační (PD) regulátor	56
6.3.5	Proporcionálně-integračně-derivační (PID) regulátor.....	57
6.3.6	Reálný PID regulátor.....	57
6.3.7	Diskrétní PID neboli Proporcionálně-sumačně-derivační (PSD) regulátor	58
6.4	METODY LADĚNÍ REGULÁTORŮ	59
6.5	KVALITA REGULAČNÍHO POCHODU	60
II	PRAKTICKÁ ČÁST	63
7	DVOUKOLOVÝ ROBOT	64
7.1	ZVOLENÉ KOMPONENTY	64
7.1.1	Arduino Nano	64
7.1.2	Bluetooth přijímač HC-05	65
7.1.3	Driver DRV8825	65
7.1.4	A4988 / DRV8825 Adapter	67
7.1.5	Li-Po baterie 11,1V	67
7.1.6	Nabíjení baterie	68
7.1.7	Krokový motor NEMA 17	68
7.1.8	Kompletní kola.....	69
7.1.9	Princip řízení pohybu robota.....	70
7.2	SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	71
7.3	3D NÁVRH.....	73
7.4	3D TISK	77
7.5	POPIS VLASTNÍHO SESTAVENÍ.....	78
7.6	PROGRAMOVÁ REALIZACE.....	82
7.6.1	Realizace řízení	83
7.6.2	Komunikace s mobilním zařízením	84

7.6.3	Mobilní aplikace.....	85
8	TYPOVÉ ÚLOHY A VYBRANÉ EXPERIMENTY	87
8.1	ÚLOHA STABILIZACE	88
8.1.1	Windup manévr	88
8.1.2	Držení pozice – oscilace kolem vzpřímené polohy.....	90
8.2	ÚLOHA REAKCE NA EXTERNÍ ZÁSAH.....	91
8.3	ÚLOHA DÁLKOVÉHO OVLÁDÁNÍ POHYBU	94
8.4	TESTOVÁNÍ STABILITY NA RŮZNÝCH POVRŠÍCH.....	98
8.5	VLIV ZMĚNY PARAMETRŮ REGULÁTORU NA STABILIZACI ROBOTA.....	99
8.6	KVALITA REGULACE.....	101
9	CENOVÁ NÁROČNOST	102
	ZÁVĚR	103
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	105
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	112
	SEZNAM OBRÁZKŮ	113
	SEZNAM TABULEK.....	116
	SEZNAM PŘÍLOH.....	117

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

V dnešní technicky rychle rostoucí době je velmi důležité zůstat v obraze vyvíjených technologií, a to hlavně v oblasti robotiky, která vznikla jako vědní obor ve 20. století. Zabývá se hlavně rozvojem a řízením komplexních elektromechanických systémů. K tomu pomáhá rychlý vývoj robotických systémů v důsledku nízkých cen elektronických komponent a velkého množství způsobů implementace patřičného software.

Tato práce klade hlavně důraz na návrh, konstrukci a vlastní realizaci prototypu 2-kolového robota ovládaného mobilním zařízením. Cílem bude také po softwarové stránce navrhnout patřičný způsob regulace, který zajistí stabilitu tohoto balancujícího robota. Jelikož se jedná o druh robota s diferenčním typem podvozku, tak lze jeho princip matematicky připodobnit k modelu inverzního kyvadla.

Celkově mi téma této práce přijde velmi zajímavé, protože splňuje disciplínu robotiky, návrh a realizaci řízení, návrh a sestavení robota a také vzdálené ovládání. Dlouhodobě se zajímám o programování, robotiku, 3D modelování a tvorbu různých mechatronických zařízení jako je např. má bakalářská práce: Robotická ruka na platformě Arduino [67]. Z hlediska realizace se jedná o zajímavou výzvu, která může vést k prohloubení znalostí v této problematice a budoucímu potenciálnímu vylepšení robota.

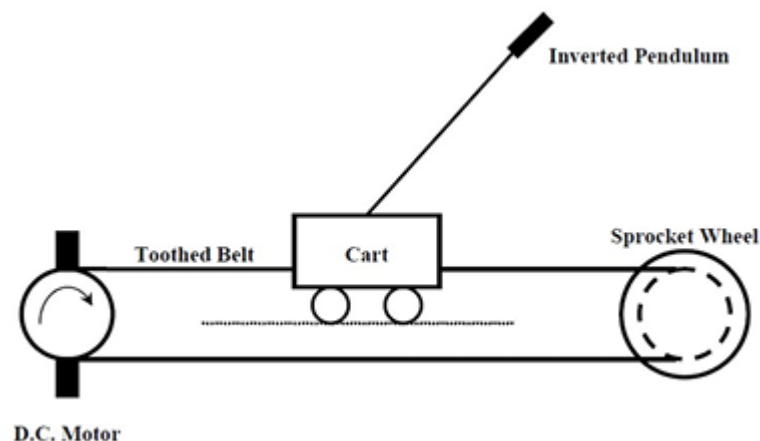
Oproti některým pracím uvedeným dále v rešerši bych chtěl vylepšit schopnost balancování ve větším měřítku a to s větší hmotností než je například B-Robot Evo 2 [3], Balanduino [5] a nRobot [7]. Předkládaná diplomová práce bude z hlediska software vycházet z prototypu robota B-Robot Evo 2 a doufám, že bude ve výsledku inspirací pro všechny, kteří z ní budou v budoucnu čerpat.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 Inverzní kyvadlo

Inverzní kyvadlo slouží jako oblíbená demonstrace zpětnovazebního řízení s cílem stabilizace nestabilního systému. Jedno z prvních řešení tohoto problému popsal J. K. Roberge roku 1960 ve své práci „The Mechanical Seal“ [68]. Toto řešení se dále používá v dalších knihách a dokumentech jako reprezentativní příklad nestabilního systému. T. Siebert zde provádí kompletní analýzu tohoto systému pomocí Routhova kritéria stability.

Mezi další práce zabývající se problematikou inverzního kyvadla je například práce „An Experimental study for Stabilization of Inverted Pendulum“, která popisuje stabilizaci v pracovním bodě se základnou pohybujícího pásu. [70]



Obrázek 1 – Inverzní kyvadlo pohybující se na vozíku s pásovým pohonem [70]

Projekt „Inverted Pendulum“ od autorů Devcin Johnson a Zach Kirch popisuje matematický princip výpočtu stabilizace a dále vytvoření řešitele diferenciálních rovnic modelujících dynamiku tohoto systému. [71]

Další prací je článek „Inverted Pendulum: A system with innumerable applications“. Zde je uvedeno vytvoření modelu, jeho linearizace a simulace v prostředí MATLAB/Simulink, přičemž práce uvádí různé varianty problematiky (stabilizace kyvadla na otočné hřídeli, dvojité inverzní kyvadlo, stabilizace na nakloněné plošině, souvislost s lidskou chůzí apod.). [71]

První prototyp balančního dvoukolového robota



Obrázek 2 – První realizace dvoukolového balančního robota na světě [1]

V roce 1986 přišel patrně jako první na světě profesor Kazuo Yamafuji s konceptem realizace dvoukolového balančního robota. [1] Na základě této koncepce byly vyvinuty různé druhy dvoukolových robotů, mezi které můžeme zařadit např. práce uvedené dále.

2.2 Vybrané realizace dvoukolových balancujících robotů

PID regulace – B-Robot Evo 2

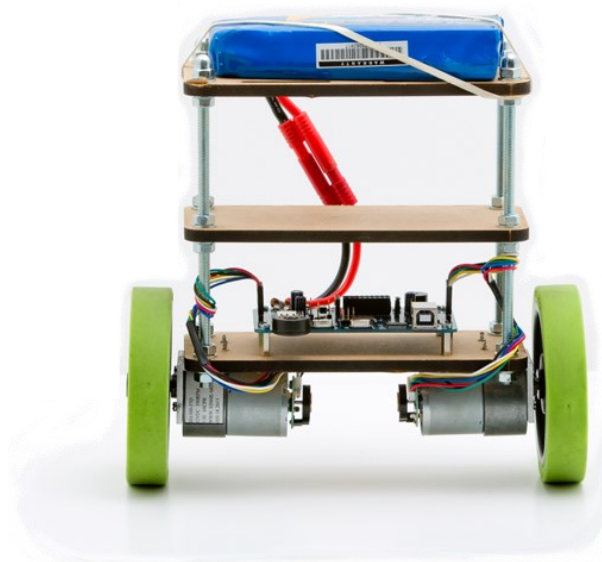
Zde se jedná o open-source edukační projekt – viz obrázek 3 níže. Práce slouží jako vhodný příklad co se softwarové části týče.

- Použití „Blockly“ vizuálního „drag-and-drop“ programování pro vytvoření mobilní aplikace a komunikace přes Bluetooth, která je volně dostupná ke stažení.
- Naprogramován v prostředí Arduino pro mikrokontrolér Arduino Uno.
- Celá konstrukce včetně kol je ve formě 3D modelu volně dostupná a připravena ke zhotovení za použití metody 3D tisku. [3]



Obrázek 3 – B-Robot Evo 2 [3]

Balduino



Obrázek 4 – Robot Balduino [5]

Je to komerčně vyráběný dvoukolový balanční robot řízený mikroprocesorem ATmega 1284P. Byl vyvinut společností TKJ electronics v roce 2013 – viz obrázek 5. Zároveň se jedná o open-source projekt. Jeho stabilizace je založena na využití kombinace 3-osého akcelerometru a 3-osého gyroskopu s implementací Kalmanova filtru pro přesné určení aktuálního úhlu robota. Software je naprogramován tak, že využívá PID regulaci ovlivňující rychlost otáčení stejnosměrných motorů, a tudíž i kol, které zaručí stabilizaci robota i v pohybu. Konstrukčně se jedná o velice jednoduché řešení, jelikož po jeho zakoupení přichází v podobě stavebnice, která obsahuje jen pár základních konstrukčních prvků.

Ovládání robota Balduino je možné pomocí velké škály ovladačů jako jsou herní ovladače, mobilní telefony s OS Android a PC. [5]

nBot



Obrázek 5 – nBot [7]

V tomto případě jde o edukační typ robota, viz obrázek 7, který je vyvíjen Davidem P. Andersonem a v roce 2003 byl oceněn organizací NASA. Jeho klíčovou vlastností je to, že jeho mikropočítač využívá k výpočtu data z akcelerometru a gyroskopu zároveň. Je schopen zdolávat obtížnější překážky a to dokonce i schodiště. Robot je poháněn 2 stejnosměrnými motory s převodovkou. [7]

Robot Inteco

Jedna z prací, která pro mne byla inspirací je diplomová práce studenta Zdeňka Charouse – Modelování a řízení 2-kolového nestabilního transportéru Inteco. Student se zde zabývá modelováním daného robota v prostředí MATLAB/Simulink, návrhem vhodného řízení (zde porovnáno PID, LQ a MPC) a také návrhem typových úloh pro studenty pracující s tímto modelem od polské firmy Inteco. [52]



Obrázek 6 – Dvoukolový robot Inteco [52]

Práce využívá předpřipravené řídicí bloky od výrobce pro snazší komunikaci s modelem, která probíhá bezdrátově přes WiFi .

Obecné výhody a nevýhody dvoukolových balančních robotů

Mezi výhody patří vynikající manévrovatelnost v ideálním prostředí robota. Díky typu diferenčního podvozku je schopen se otáčet na místě s nulovým poloměrem otáčení. Konstrukce tohoto typu robota bývá ve většině edukačních případů velmi jednoduchá a jeho celková hmotnost je malá.

Mezi nevýhody patří jeho přirozená nestabilita, která je klíčová k funkci robota, a tak se musí robot neustále pohybovat. To má za následek rychlejší opotřebení použitých aktuátorů a snížení výdrže baterie. Dále je robot náchylný na překážky, které se běžně objevují v terénu a zároveň povrch, po kterém se robot pohybuje, který nemusí být vždy patřičně přilnavý.

3 ROBOTIKA

Robotika je obor inženýrství a informatiky, který se zabývá koncepcí, konstrukcí, výrobou a provozem robotů. Cílem oboru robotiky obecně je vytvořit inteligentní stroje, které mohou různými způsoby pomáhat lidem.

Robotika může mít řadu podob. Robot se může podobat člověku nebo může mít podobu robotické aplikace, jako je např. robotická automatizace procesů, která simuluje způsob, jakým lidé spolupracují se softwarem při provádění opakujících se úkolů založených na pravidlech.

Ačkoli se oblast robotiky a zkoumání potenciálního využití a funkčnosti robotů v 21. století značně rozrostla, tato myšlenka rozhodně není nová.

3.1 Robot

Slovo „Robot“ bylo poprvé použito českým spisovatelem Karlem Čapkem v jeho vědeckofantastickém dramatu R.U.R (Rossumovi univerzální roboti). V robotice se jedná o mechanický stroj nahrazující práci lidí a činnosti s nimi spojenými. Robot je obecně řízen jeho vnitřní elektronikou a programem, který byl do jeho čipu naprogramován. Chování a použití robota může být různé a to od edukačních, přes humanoidní až po průmyslové či automotivní. Použití robotů pak bývá nejčastěji v průmyslu, a to např. u svařování, paletizace, nanášení barvy na karosérie atd. Dále můžeme roboty v dnešní době najít jak v domácnosti (v podobě robotických vysavačů, chytrých vařičů, AI zařízeních jako je např. Alexa apod.), tak v medicíně, a to např. při precizních operacích srdce či mozku. Dále např. ve farmaceutickém průmyslu při testování léků. V této předkládané práci bude hlavním tématem dálkově řízený dvoukolový robot držící balanc a jedná se tak o částečně autonomní edukační druh robota, který se bude pohybovat na pevném rovném prostředí.

3.2 Autonomnost

Autonomní roboti mají své vlastní „myšlení“, které je jim doplněno člověkem, a to ve formě software (nejčastěji využívající umělé neuronové sítě). Skutečnost, že se jedná o autonomní typ robota je umožněna také tím, že má různé snímače okolního prostředí a je tak schopen se samostatně orientovat a pohybovat v terénu. Může se také jednat o roboty, kteří jsou schopni se samostatně učit, a to např. pomocí různých evolučních algoritmů. Další podmínkou je fungování robota bez dlouhodobého zásahu člověka a detekce nebezpečného prostředí, které může robota poškodit nebo ohrozit okolí. [9]

3.3 Rozdělení podle prostředí

U návrhu robota se musí uvažovat, v jakém prostředí by se měl pohybovat. Většinou se jedná o roboty v pozemním prostředí, létající roboty, příp. pracující ve vodě.

Ve venkovním prostředí je důležité uvědomit si základní faktory. Jedná se o zejména náročnost terénu, kdy robot nemusí překonat všechny překážky a také teplotu okolí. Extrémní teplo nebo vysoká nadmořská výška velmi negativně ovlivňuje funkcionalitu elektroniky. Může dojít k přehřívání jednotlivých komponent jako je vinutí na motorech a tím jeho spálení, nebo také nedostačující chlazení součástek a mikropočítače. To se týká také akumulátorů, kde se u některých druhů velmi rychle ztrácí kapacita. Naopak mrazivé podmínky zvyšují křehkost plastů a jsou tak více citlivé na nárazy.

Dalším faktorem je vlhkost ovzduší nebo přímo kontakt s vodou, při kterém může dojít u elektroniky ke zkratu. Rychlost větru je také rozhodující, je-li robot lehký a zabírá velkou plochu svým krytovaním, může jej vítr vychýlit ze směru pohybu, případně jej shodit. To samé platí obecně pro jakoukoliv poruchovou veličinu, která touto náležitostí stoupá a regulátor pak nemusí být schopen systém uřídit. Pro létající roboty to může znamenat ztrátu kontroly nad ovládním a následnou kolizí se zemí apod.

Tyto faktory lze z velké části eliminovat, nachází-li se robot ve vnitřním prostředí (např. hala s konstantním povrchem a adekvátní teplotou vzduchu).

3.4 Konstrukce robotů

Roboty lze obecně rozdělit podle druhu pohyblivosti na stacionární a mobilní.

3.4.1 Stacionární roboty

Tento druh robota se skládá z pevně umístěné základny a pohyblivého ramene k ní spojeného. Toto spojení je provedeno kloubem a spojením více ramen dohromady se vytváří robot s více stupni volnosti. Stupeň volnosti (DoF) určuje schopnost robota pohybu v globálním souřadném systému (tvořen třemi osami X, Y a Z). Dále se liší ve způsobu provedení kinematické konstrukce. [11]

Nejčastěji se tak jedná o průmyslové roboty s těmito vlastnostmi: manipulační schopnost, automatická činnost, jednoduchá změna programu, zpětná vazba, univerzálnost. [9]

Dělení podle konfigurace

3 stupně volnosti (3 DoF)

- Descartes – všechna uložení jsou posuvná
- Uložení PUMA – všechna uložení jsou na otočných kloubech
- Válcové – dvě posuvná uložení na otočné základně
- SCARA – jedno posuvné chapadlo na dvou otočných kloubech [11]

Dělení podle účelu použití

Sváření (Spot welding a ARC welding) – např. svařování karoserie automobilu

Montáž – instalace a kompletace

Aplikace – např. nanášení lepidel, těsniv

Lakování – stříkání tekutých a práškových barev a laků

Manipulace – překládání, nakládání a vykládání pro dopravníky

Paletizace – skládání nebo vykládání výrobků na paletách

Kontrola – měření pomocí kamer, laseru a čidel [11]

3.4.2 Mobilní roboty

Autonomní – mají vlastní rozhodovací schopnost na základě signálů z čidel.

Dálkově ovládání – řízen operátorem například pomocí Bluetooth nebo RC vysílačky.

Typ pohybu – kráčející, plazivé, pásové, hybridní, létající, kolové atd.

Podvozek robotu

- Diferenciální podvozek – Skládá se ze dvou poháněných kol, přičemž balanc většinou drží mechanismus na principu inverzního kyvadla nebo pomocnými koly.
- Ackermanův podvozek – 2 hnaná kola a 2 zatáčející kola v jedné ose. Mechanismus zatáčení často obsahuje diferenciál, aby se každé kolo otáčelo při zatáčení jinou rychlostí a nedocházelo tak k prokluzu. Tento typ podvozku se běžně nachází u automobilů. [13]
- Kráčející podvozky – zde je schopnost robota procházet náročným terénem dána počtem stupňů volnosti
- Pásové podvozky – ve velmi náročném terénu se jedná o velmi dobré řešení. Robot je schopen otáčet se na místě, a to inverzním pohybem pravého a levého pásu. Energeticky je však tento způsob pohybu neefektivní.

3.5 Konstrukce typu inverzní kyvadlo

Táto práce se zabývá modelem dálkově ovládaného balancujícího robota s diferenciálním řízením podvozku bez asistenčních prvků, jako jsou opěrné body, snímače detekce nárazu nebo pomoc dosažení stabilní polohy po pádu.

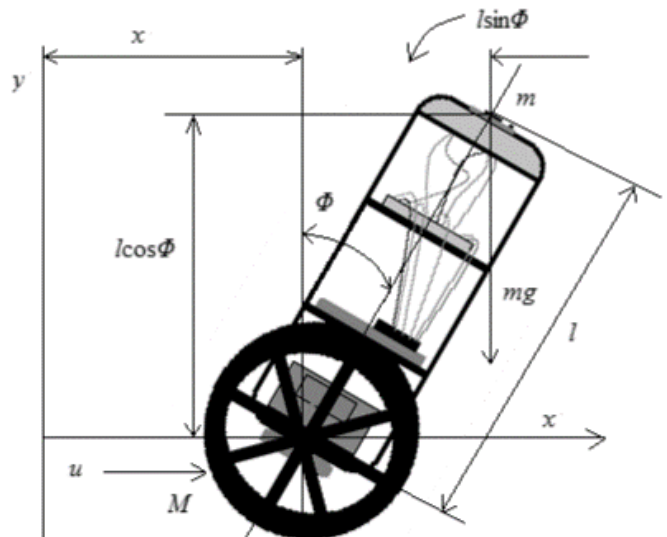
Jedná se o typ robota s vynikajícími manévrovacími schopnostmi, které v závislosti na malých rozměrech a typu podvozku umožňují pohyb a otáčení robota na velmi malém prostoru. Další vlastností robota je jeho přirozená nestabilita, která umožňuje aplikaci algoritmů teorie automatického řízení včetně jejich patřičného otestování.

Robot bude testován v maximálně přívětivých podmínkách, jako je neagresivní a suché prostředí a nekluzký povrch, po kterém se robot bude pohybovat.

3.5.1 Inverzní kyvadlo

Cílem balancování inverzního kyvadla je udržet rameno kyvadla v rovnovážném stavu (nestabilní vertikální poloha). Stabilita je zajištěna vhodným řídicím systémem, který pohybuje základnou kyvadla. [14]

Zjednodušený matematický model 2-kolového robota na principu inverzního kyvadla



Obrázek 10 – Inverzní kyvadlo na vozíku [59]

Tabulka 1 – Fyzikální veličiny a parametry výše vyobrazeného robota

Veličina / funkce	Jednotka	Popis
L	-	Lagrangeova funkce
E_k	[J]	Kinetická energie
E_p	[J]	Potenciální energie
l	[m]	Délka kyvadla
m	[kg]	Hmotnost kyvadla
Φ	[°]	Úhel kyvadla
Φ'	[°/s]	Úhlová rychlost kyvadla
Φ''	[°/s ²]	Úhlové zrychlení kyvadla

Model inverzního kyvadla je získán použitím Lagrangeových funkcí popisující dynamiku systému:

$$L = E_k - E_p \quad (1)$$

Derivace pohybové rovnice pomocí substituce s použitím Eulerovy Lagrangeovy rovnice:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \Phi'} \right) = \left(\frac{\partial L}{\partial \Phi} \right) \quad (2)$$

Po převodu kyvadla podle obrázku 1 do počátku souřadného systému lze zapsat:

$$x = L * \sin\Phi \rightarrow x' = L * \cos(\Phi) \Phi' \quad (3)$$

$$y = L * \sin\Phi \rightarrow y' = L * \sin(\Phi) \Phi' \quad (4)$$

Změna polohy v čase je vyjádřena jako vektor a lze jej zapsat jako:

$$v^2 = x'^2 + y'^2 = L^2 \Phi'^2 (\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)) = L^2 \Phi'^2 \quad (5)$$

Pomocí substituce do Lagrangeovy funkce a dosazení za $E_k - E_p$ se získá vztah:

$$L = \frac{1}{2} m v^2 - m g y \quad (6)$$

$$L = \frac{1}{2} L^2 \Phi'^2 - m g L \cos(\Phi) \quad (7)$$

Vychází se z rovnice (2), dosazení za obě strany a výpočet Φ'' :

$$\frac{\partial L}{\partial \Phi} = 0 + m g L \sin(\Phi) = m L \sin(\Phi) \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Phi'} = mgL^2 \Phi'^2 = mL^2 \Phi' \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \Phi'} \right) = mL^2 \Phi'' \quad (10)$$

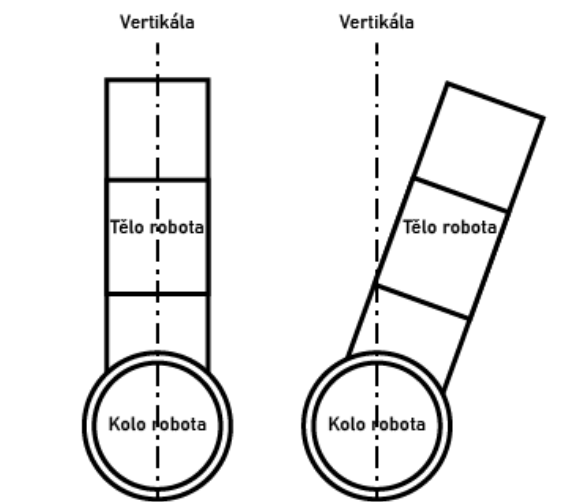
Dosazení rovnice (9) a (10) do rovnice (2):

$$mL^2 \Phi'' = mgL \sin(\Phi) \rightarrow \theta'' = \frac{g}{L} \sin(\Phi) \quad (11)$$

Tímto je získán vztah pro úhlového zrychlení vyvolané gravitační silou na kyvadlo (rovnice 11). [59]

3.5.2 Autonomní stabilita dvoukolového robota

Dvoukolový robot je tvořen ze dvou hlavních částí – šasi, které tvoří konstrukci robota a z kol, na kterých robot stojí. Balancování robota je založeno na tom, že se robot pohybuje pouze ve směru dopředu / dozadu a to v jedné ose, která je úsečkou mezi centrem každého z obou kol. Autonomní stabilita robota je dosažena tím, že je robot schopen držet balanc bez externího zásahu člověka.



Obrázek 11 – Náklon robota

Na základě naznačeného popisu principu inverzního kyvadla lze navrhnout a implementovat vhodný řídicí systém s regulací otáček motorů, reagující na změnu úhlu, která je získávána ze senzorického systému (v tomto případě z gyroskopu). Tím je zaručen pohyb robota a stání na místě bez pádu.

Změna otáček motorů způsobuje pohyb robota v horizontální ose a tím dochází k jeho vyvažování. Aby bylo ulehčeno toto vyvažování k vertikále, je vhodné vytvořit takový návrh robota, který zahrnuje tyto podmínky:

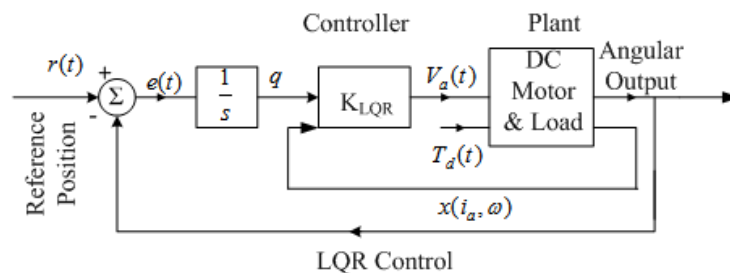
- neprokluzující vlastnosti kol vůči povrchu, po kterém se robot pohybuje.
- reakce elektronického systému je výrazně rychlejší než mechanická a je tak možno zanedbat dynamiku elektronického systému.
- tělo robota je maximálně pevné a nevznikají tak žádné setrvačností síly v různých částech robota.
- úhlová rychlost náklonu je velmi nízká, aby bylo možné zanedbat dostředivou sílu, která vzniká při rotačním pohybu.

3.6 Vybrané druhy vhodné regulace

V této podkapitole budou uvedeny vybrané druhy řízení vhodné a často implementované v aplikacích dvoukolových balancujících robotů.

3.6.1 LQR

Jedná se o lineární kvadraticky optimální stavové řízení hojně používané v praxi (z angl. Linear-Quadratic Regulator). Pokud jde o soustavu na principu inverzního kyvadla, je to ve své podstatě nelineární systém a je třeba jej pro účely tohoto řízení linearizovat v určitém pracovním bodě (nejčastěji v horní nestabilní pozici).



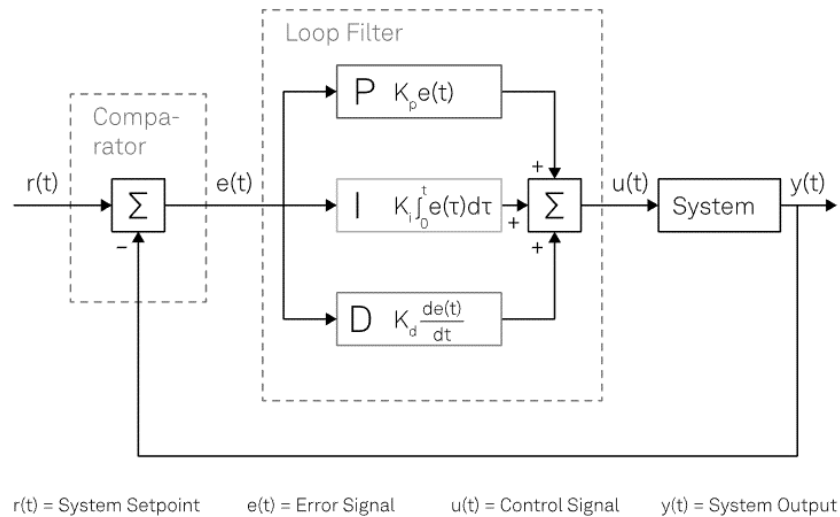
Obrázek 12 – Ilustrační schéma regulační smyčky využívající principu LQR [16]

Regulátor pak pracuje spolehlivě jen v okolí uvažovaného prac. bodu a počáteční podmínky musí být takové, aby odchylku od této polohy dokázal uregulovat. [16]

3.6.2 PID

Regulátory na základě principu PID (Proporcionálně-Integračně-Derivační) se používají v průmyslové praxi již řadu desetiletí, a to hlavně díky svému jednoduchému principu,

návrhu a fyzické realizaci. Je to lineární typ regulátoru. V dnešní moderní době se používají tyto PID regulátory nejčastěji v diskrétní formě, aby je bylo možné realizovat programově např. v mikropočítačích. Tím vzniká typ regulátoru – PSD (Proporcionálně-Sumačně-Diferenční).



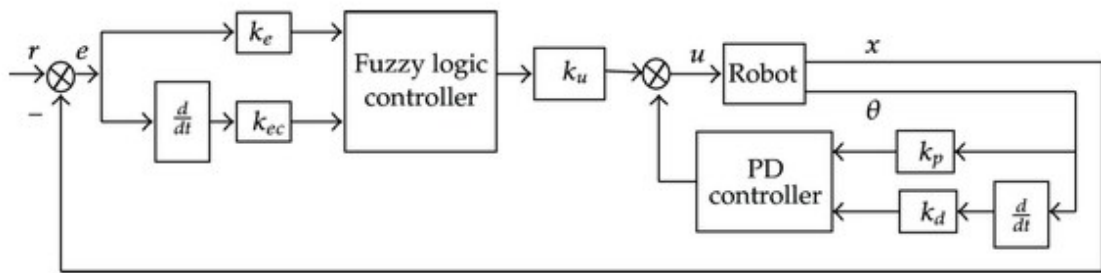
Obrázek 13 – Schématické zobrazení základní regulační smyčky využívající PID regulaci [17]

K řízení robota je vhodné použít obecně dva regulátory, jeden pro udržení stability robota (v této práci je využit PD-regulátor) a druhý pro řízení jeho pohybu (v této práci PI-regulátor).

3.6.3 Fuzzy

Fuzzy regulace je obecně vzato nelineárním typem regulátoru a jeho implementace je velmi častá, zvláště když nechceme použít lineární regulátor. Fuzzy regulátory lze rozdělit na neadaptivní – vycházejí nejčastěji z PID a adaptivní.

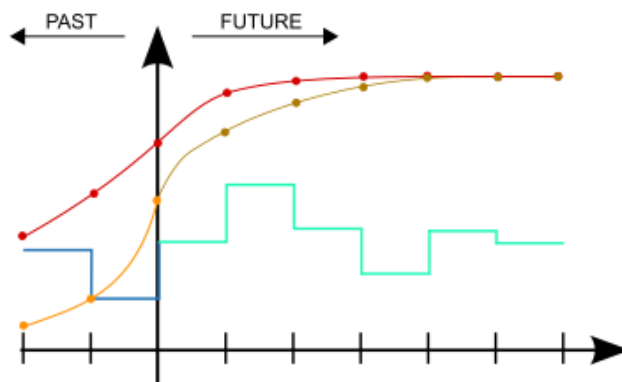
Od klasického lineárního regulátoru se liší v principu jeho fungování. Je totiž definován množinami pravidel – například u regulace teploty kapaliny to může být překrývání množin: studená, vlažná, horká. Pravidla potom definují chování řízeného systému v závislosti na aktuálních vstupech.



Obrázek 14 – Schématické znázornění použití Fuzzy regulátoru k řízení pozice robota [4]

3.6.4 MPC

MPC (Model Predictive Control) je typ regulátoru s predikcí budoucího chování systému na základě jeho modelu a to na konečném časovém intervalu (tzv. horizont). Na základě této predikce a aktuálního měřeného nebo odhadnutého stavu systému jsou vypočítány optimální řídicí vstupy s ohledem na definované kritérium kvality a na dané fyzikální omezení veličin. Využívá se zde postupného posouvání horizontu, kde pokaždé po nějakém čase se přepočítává nový akční zásah (tzv. „receding horizon control-RHC“).



Obrázek 15 – Princip MPC řízení – posouvání horizontu do blízké budoucnosti [18]

Na obrázku 15 je diskretní akční zásah zobrazen modrou čarou (v minulosti) a zelenou čarou (v budoucnosti). Regulovaná veličina čarou žlutou (měřená v minulosti) / oranžovou (předikovaná v budoucnosti). Červená čára je pak referenční (požadovaný) výstup.

Mezi velké výhody MPC patří „předvídaní“ budoucích vlivů, změn požadované hodnoty, možnost využít přímo nelineární modely, či přímé zahrnutí fyz. omezení veličin do návrhu řízení. [18]

4 ZÁKLADNÍ PRVKY DVOUKOLOVÉHO ROBOTA

Šasi – je část robota, která tvoří tělo celého robota a je konstrukčně připevněna na skelet.

Skelet – je část podvozku, ke kterému jsou pevně připojeny motory a sám je připojen k šasi robota.

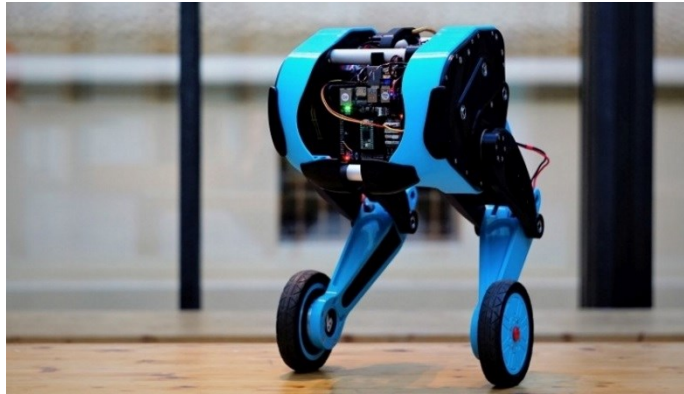
4.1 Klíčové komponenty

Klíčové komponenty jsou takové komponenty, bez kterých se dvoukolový samostatně balancující robot neobejde. Z principu se jedná o řídicí jednotku, která zpracovává signály a vyhodnocuje vnitřní stav robota. Zde byla jako řídicí jednotka zvolena mikrokontrolér Arduino Nano, a to kvůli svým rozměrům, způsobu řízení pohonné části a způsobu zpracování komunikačních dat.

Dále je nutné, aby byl robot vybaven gyroskopem pro určení aktuálního náklonu, popřípadě s funkcí akcelerometru pro určení zrychlení. Takto má robot zpětnou vazbu o svém náklonu. V tomto případě se jedná o 3-osý gyroskop a akcelerometr MPU6050.

Jako pohon může být zvolen stejnosměrný motor nebo krokový motor. Konstrukčně musí být oba motory propojeny se skeletem robota, a tak se vytvoří podvozek o dvou kolech bez schopnosti natáčení jednotlivých kol nebo udržení robota ve vzpřímené poloze bez jeho napájení. Zde byl zvolen jako druh motoru krokový motor. Je to z důvodu předchozích praktických znalostech, jak takový motor ovládat, jakým způsobem toto ovládání naprogramovat a jaké řídicí drivery zvolit. Dále krokový motor oproti stejnosměrnému motoru dosáhne rychleji maximálních otáček, má lepší kontrolu otáček a je více spolehlivý. Dá se taktéž nastavit parametr „microstepping“ (hodnoty $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$), kterým se mění poměr rychlosti otáčení v závislosti na posílaném signálu z řídicí jednotky. Nevýhodou je však obecně slabší točivý moment, nízké maximální otáčky avšak snazší ovládání a není nutnost použití enkodéru.

Může obsahovat i tlumící mechanismy jako má např. robot SK80 Skatego [72] na obrázku níže:



Obrázek 16 - SK80 Skateo [72]

každé kolo je zde připevněno ke skeletu robota skrze tlumič a kloub. V případě dvoukolového robota popsaného v této práci byly jako tlumicí prvky zvoleny Buggy kola se středně měkkou pneumatikou. To snižuje náchylnost na nerovnosti a následný pád robota a zároveň zvyšuje přilnavost neboli také „grip“ mezi kolem a povrchem po kterém se robot pohybuje.

Nakonec je třeba zvolit typ akumulátoru, který bude vyhovovat konstrukčnímu řešení robota. Zde je nutno určit si poměr hmotnost / kapacita.

4.2 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér (MCU) je malý jedno-jádrový počítač navržen k ovládání specifických úkolů. Je postaven na CISC (Complex Instruction Set Computer) architektuře. Je kombinací procesoru (CPU), paměti (RAM/ROM/flash), I/O a komunikačního rozhraní. To vše je integrováno do jednoho čipu.

Je často použit v embedded systémech (řídící systém, který je zcela zabudován do zařízení, které ovládá), jako jsou rozličné aplikace v domácnosti, automobil, zdravotnických zařízeních, v robotech, bezpečnostních systémech a průmyslových řídicích systémech. Dále jsou využívány ve spojení s kamerovými nebo audio systémy.

Procesor mikrokontroléru vykonává instrukce a ovládá jeho ostatní komponenty. Paměť se stará o ukládání dat a kódu programu. I/O příslušenství zajišťuje interakci mezi mikropočítačem a vnějším světem. Mikrokontrolér je programovatelný podle potřeby uživatele. Nejčastěji používané programovací jazyky jsou C, C++ a assembler.

Cílem mikrokontroléru je být hardwarově co nejmenší a k vykonávání jakýchkoliv úloh spotřebovat co nejméně elektrické energie, jelikož je ve většině případů připojen k baterii.

4.2.1 Princip mikrokontroléru

Čip mikrokontroléru je vysokorychlostní zařízení, ale v porovnání s běžným počítačem je velmi pomalý. Takt (CLK) procesoru je dán křemíkovým oscilátorem (jednotky MHz). Komunikace probíhá pomocí sériového/paralelního portu umístěného na desce mikrokontroléru. K fungování I/O portů pro měření hodnot využívá také ADC převodník pro převod analogového signálu na signál digitální.

Časovače a počítadla bývají zpravidla využívány v mikropočítači pro časové a počítací aktivity. Počítadla fungují na principu počítání externích pulzů, zatímco časovače provádí plánované úlohy, tvorbu pulzů, modulaci, měření frekvence a oscilace.

Typy mikrokontrolérů:

- 8bitový – základní, nejjednodušší typ mikrokontroléru, nejčastěji používaný v hračkách a dálkových ovladačích.
- 16bitový
- 32bitový – Nejčastěji používané mikrokontroléry díky svému velkému výpočetnímu výkonu a poměru cena / výkon.
- ARM – Tyto mikrokontroléry jsou založené na ARM architektuře a jsou použity ve velké škále aplikací jako jsou mobilní telefony, automobilní a průmyslové systémy.
- PIC – K jejich výrobě se využívá Microchip Technologie. Jejich využití je široké.
- AVR – Jsou vyráběny firmou Atmel Corporation a jsou používány v robotizaci a průmyslových aplikacích.
- FPGA – Mají velmi flexibilní výpočetní schopnosti. Využívají Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs). Používají se při zpracování digitálních signálů, obrazových signálů a high-end síťových komunikacích. [19]

4.2.2 Rozdělení mikropočítačů dle jejich architektury

Architektura Von Neumann

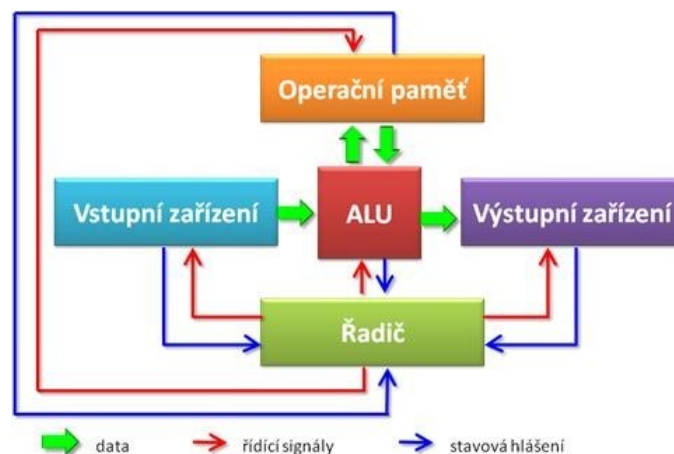
Definuje představu o tom, jak by měl počítač fungovat, jaké části by měl obsahovat a jakou činnost by měly plnit. Návrh obsahuje způsob zapojení komponent, jako jsou operační paměť, řadič, ALU, vstupní a výstupní zařízení. Operační paměť slouží k uchování zpracovaného programu, dat a výsledků. ALU (aritmetickologická jednotka) je hlavní

komponenta v procesoru, ve které probíhají veškeré logické výpočty (negace, logický součin atd.) a aritmetické výpočty (bitových posuv, násobení, sčítání). Procesor obsahuje většinou několik ALU jednotek, které pracují nezávisle na sobě a každá tak zpracovává instrukce současně podle taktu. Řadič řídí činnost veškerých částí počítače a to tím, že jim posílá řídicí signály, přičemž reakce na tyto signály jsou z modulů posílány zpět řadiči a to ve formě stavových hlášení. Vstupní zařízení jsou určena pro vstup dat a programu. Výstupní zařízení naopak pro výstup výsledků, zpracované programem.

Pomocí ALU se do operační paměti nahraje program, který se bude vykonávat. Stejně tak se do operační paměti umístí data, zpracovávané programem. Výpočty jsou jednotlivě vykonávány v krocích pomocí ALU, přičemž je, jako ostatní komponenty, řízena řadičem. Mezivýsledky se uchovávají do operační paměti. Finální výsledky jsou přes ALU posílány do výstupních zařízení, a to přes společnou sběrnici.

Výhody: Programátor určí, jak bude kód a data rozdělen. Přístup do paměti pro data a instrukce probíhá jednotným způsobem. Je jednodušší na výrobu (obsahuje jen jednu společnou sběrnici).

Nevýhody: Může dojít k přepínání vlastního programu. Výkon může být omezen sběrnici, která vytváří úzké místo.

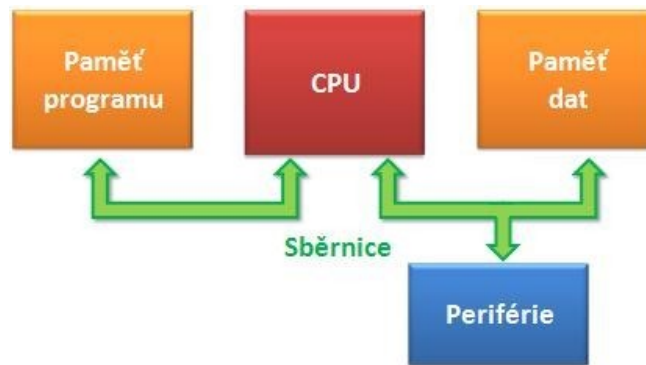


Obrázek 17 – Schématické znázornění architektury von Neumann [20]

Dnešní počítače vychází z právě této představy, která byla navržena v padesátých letech 20. století americkým matematikem John von Neumannem, který se podílel také na výzkumu kvantové teorie a založil matematickou teorii her. [20]

Harvardská architektura

Blok paměti je rozdělen do dvou skupin (paměť programu a paměť dat). Paměť programu dokáže být díky této architektuře mnohem větší, jelikož lze použít paměť typu ROM.



Obrázek 18 – Schématické znázornění Harvardské architektury [21]

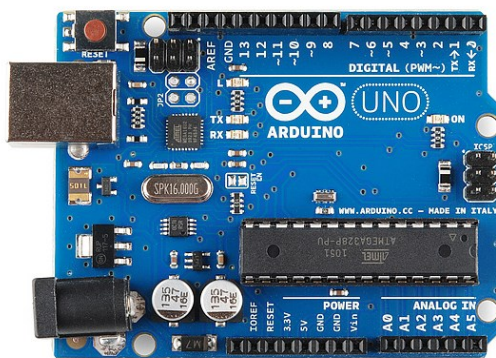
Historicky byla tato koncepce vytvořena ve třicátých letech 20. století na Harvardské univerzitě v USA. Harvardská architektura byla realizována až později v šedesátých letech (s nástupem polovodičů), jelikož to v předchozí době technologie ještě neumožňovala.

Mezi hlavní výhody patří vysoký výpočetní výkon, jelikož architektura obsahuje dvě oddělené paměti a lze přistupovat k oběma částem paměti současně (k výrobě paměti lze použít různé technologie najednou). Dále se instrukční sada a program samotný nemohou přepsat nebo poškodit. Nevýhodou je složitější návrh a výroba procesoru. [21]

4.2.3 Řídicí jednotka Arduino

Arduino je Open-source platforma určená k sestavování elektrotechnických projektů. Skládá se z hlavního programovatelného obvodu a software, ve kterém se píše kód v C++ a následně se jeho pomocí nahrává na desku Arduino. K tomu se používá tzv. „programátor“, který je tedy součástí Arduino IDE a není tak potřeba přídavný hardware. Nahrávání nových dat na Arduino desku se provádí přes USB kabel.

Arduino interaguje s prostředím pomocí digitálních a analogových vstupně / výstupních pinů. Lze tak ovládat např. LED diody, motory, reproduktory, kamery, interakce s internetem a mobilním zařízením. Pro každý účel je vhodný různý typ Arduino. [22]



Obrázek 19 – Mikrokontrolér Arduino Uno [22]

K desce Arduino lze snadno zapojit různé snímače (např. světelný, teplotní, ohybový, tlakový, akcelerometr, gyroskop, měřič barometrického tlaku apod.). Dále lze Arduino napojit na tzv. Shield, neboli předem sestavené elektronické obvody rozšiřující funkcionalitu základní desky Arduino (např. pro ovládání motorů, připojení k internetu, poskytování bezdrátové komunikace, ovládání LCD panelu apod.) Výhody jsou tak primárně v ceně, rychlosti vývoje a univerzálnosti.



Obrázek 20 – Arduino a Raspberry Pi na jedné fotografii [23]

Nevýhoda je pak malý výpočetní výkon a to hlavně v porovnání s výkonnou ARM platformou jako je Raspberry Pi. Zde ovšem hraje velkou roli druh použití mikrokontroléru, každý se hodí víc na něco trochu jiného a nelze je tak přímo porovnávat. [23]

Architektura mikropočítače Arduino

Procesor použitý v Arduinu UNO (ATMEGA328) je postaven na základě harvardské architektury. [24]

Variace Arduino

Arduino Uno (R3) – Obsahuje 14 digitálních I/O PINŮ, 6 z nich lze použít jako PWM, 6 analogových vstupů, USB připojení a DC napájení (Power jack). Procesor ATMEGA328P je vyměnitelný a poskytuje dostatečný výpočetní výkon.

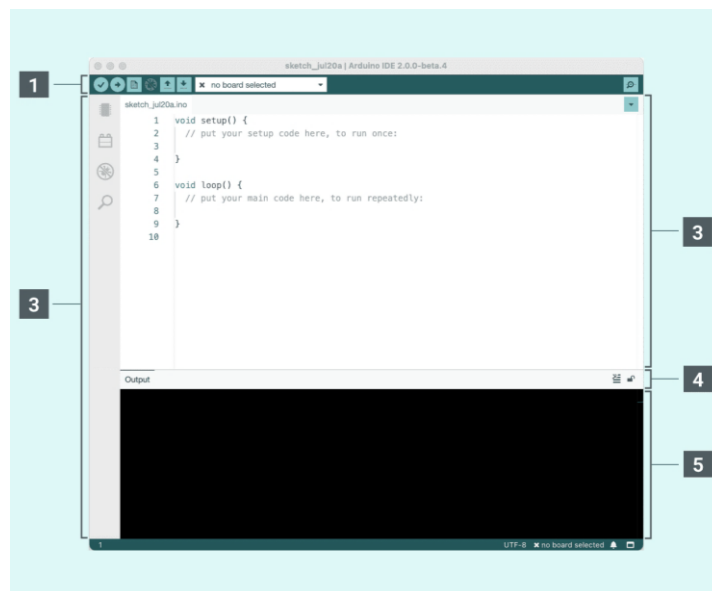
LilyPad Arduino – Specificky vytvořené pro e-textily

Arduino Mega (R3) – Obsahuje 54 digitálních I/O PINŮ, 14 z nich lze použít jako PWM, 16 analogových vstupů a USB připojení. Napájení je stejné jako má Arduino Uno. Procesor ATMEGA2560

Arduino Leonardo – Má v sobě zabudované mikro-USB, které přímo deska zpracovává. Je tak schopna registrovat periférie jako je klávesnice, myš apod. Používá procesor ATMEGA32U4.

Arduino Nano – Používá procesor ATMEGA328. Je distinktivní svými rozměry (43 x 18 mm). Obsahuje 14 digitálních I/O PINŮ, 6 z nich lze použít jako PWM, 8 analogových vstupů. Podporuje TTL porty RX / TX. [22]

Vývojové prostředí Arduino IDE



Obrázek 21 – Arduino IDE [25]

Jedná se o snadný a rychlý způsob, jak nahrát nový software na Arduino desku. Historicky byla verze IDE 1.x.x. Dnes už se používá modernizovaná verze Arduino IDE 2.x. [25] Získávání dat lze realizovat výpisem do sériového monitoru a pomocí uložení zkopírovaných dat do CSV je možné z nich vytvořit plnohodnotný xlsx. dokument Excel.

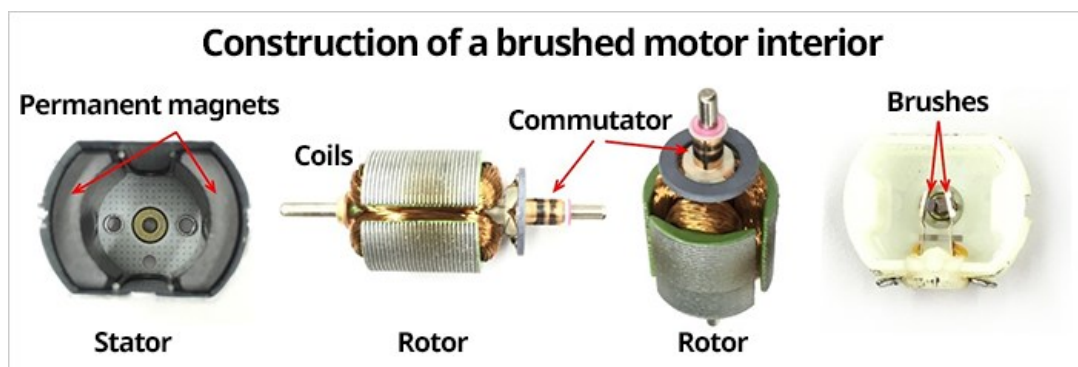
4.3 Elektrické motory - pohon

Elektrické motory používané v robotech mohou být stejnosměrné, střídavé nebo krokové. V průmyslu se často používají synchronní nebo asynchronní střídavé motory, avšak v robotice, což je problematika této práce, se nejčastěji setkáme motory na principu stejnosměrného proudu.

4.3.1 Synchronní stejnosměrné motory

DC motor

Stejnospměrné motory, jak už jejich název napovídá, využívají ke generování výstupních otáček stejnosměrný proud (například z baterií nebo jiných nestřídavých zdrojů). Tato třída motorů se dělí na kartáčové stejnosměrné motory a bezkartáčové stejnosměrné motory, ale jejich nejběžnější podoba je typická pro kartáčované. Běžný stejnosměrný motor má podobné uspořádání, jaké je znázorněno na následujícím obrázku:



Obrázek 22 – Rozložený kartáčový DC motor [26]

Stejnospměrné motory jsou napájeny stejnosměrným zdrojem připojeným k rotoru přes uhlíkové kartáče. Tento rotor se nachází uvnitř statoru neboli stacionárního pouzdra, které obsahuje permanentní magnetické pole vytvářené buď magnetickým kovem, nebo některým typem elektromagnetu. Sestava rotoru obsahuje kotvu neboli drátovou cívku izolovanou kovovými vrstvami, dále komutátorové kroužky a výstupní hřídel. Komutátorové kroužky jsou připojeny ke koncům sverek cívky kotvy, ale při vypnutém motoru se přímo nedotýkají kartáčů ani výstupního hřídele. Při spuštění motoru kartáče stlačí komutátorové kroužky k sobě, čímž umožní průchod stejnosměrného proudu kartáči, přes komutátorové kroužky a do vinutí kotvy. Při průchodu proudu kotvou se vytvoří magnetické pole, které bude působit proti statorovému poli. Sestava rotoru se tedy díky tomuto odporu roztočí a způsobí, že motor produkuje užitečnou mechanickou energii a točivý moment.

Tyto motory jsou známy již od 30. let 19. století, a proto se používají v různých aplikacích. Jsou relativně levné na pořízení i instalaci, spolehlivé a regulovatelné a dodávají se ve stovkách jmenovitých hodnot. [26]

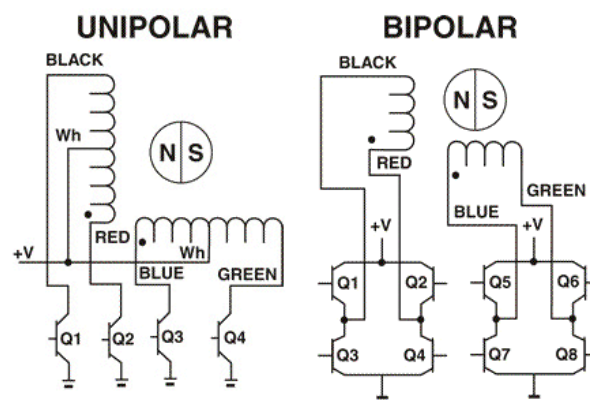
Bezkartáčový DC motor

Zatímco kartáčový stejnosměrný motor používá k přepínání proudu kartáč a komutátor, bezkartáčový stejnosměrný motor používá k přepínání proudu snímač a elektronický obvod. Vývoj tohoto motoru byl umožněn díky vývoji technologií polovodičů a periferních zařízení.

Mezi vlastnosti bezkartáčového stejnosměrného motoru patří kompaktní rozměry, vysoký výkon, dlouhá životnost a absence vzniku jisker a hluku a používá se v široké škále aplikací od osobních počítačů až po domácí spotřebiče. [27]

Krokový motor

Bipolární krokový motor má jedno vinutí na každou fázi statoru. Dvoufázový bipolární krokový motor má 4 vinutí. Dále u bipolárního krokového motoru není společný vodič jako u unipolárního krokového motoru. Proto nedochází k přirozené změně směru proudu vinutím. Bipolární krokový motor má snadné uspořádání zapojení, ale jeho provoz je trochu složitější. K řízení bipolárního krokového motoru je potřeba řídicí integrovaný obvod s vnitřním obvodem H můstku (ovladač, například DRV8825). Je to proto, že k obrácení polarity pólů statoru je třeba obrátit směr proudu. To lze provést pomocí H můstku. [28]



Obrázek 23 – Způsob zapojení vnitřního vinutí unipolárního a bipolárního krokového motoru [28]

Bipolární krokové ovladače

Mnoho společností začalo montovat vlastní bipolární krokové ovladače (drivery). Je třeba dbát na správné připojení krokového motoru k ovladači. Také ovladač musí být schopen dodávat dostatečný proud pro daný krokový motor. Mikrokontrolér musí ovladači dodávat

pouze signál o kroku a směru. Tato metoda zabere pouze dva piny (Step, Direction) mikrokontroléru a je velmi užitečná v projektech, které vyžadují velký počet pinů mikrokontroléru pro jiné funkce. [28]

4.4 Způsoby řízení motorů

Řídicí jednotky a pohony motorů jsou elektronická zařízení, která regulují otáčky, točivý moment a polohu motoru. Pohon upravuje příkon motoru tak, aby bylo dosaženo požadovaného výstupu. Řídicí obvody jsou běžně integrovány s obvody pohonu jako jedna samostatná jednotka, proto se termíny pohon motoru a regulátor motoru často používají zaměnitelně. Existují čtyři základní typy regulátorů a pohonů motorů: Střídavý, stejnosměrný, servopohon a krokový, přičemž každý z nich má typ vstupního výkonu upravený podle požadované výstupní funkce, aby odpovídal dané aplikaci.

4.4.1 Ovládání stejnosměrných motorů

Řídicí jednotky a pohony stejnosměrných motorů jsou elektrická zařízení, která upravují vstupní výkon nastavením zdroje konstantního nebo střídavého proudu na pulzní stejnosměrný výstup s různou dobou trvání nebo frekvencí pulzů (změna střídy signálu). Důležité vlastnosti pro výběr pohonné jednotky jsou aplikace, provozní režim pohonu, typ motoru, systém smyčky, typ výstupního signálu, komunikační rozhraní a také vstupní a výstupní elektrické specifikace. Regulátory a pohony stejnosměrných motorů se používají především k řízení otáček a krouticích momentů motorů pro obráběcí stroje, elektrická vozidla, čerpadla atd. Řídicí jednotka, běžně integrovaná s obvody pohonu, dodává řídicí signály pohonu. [29]

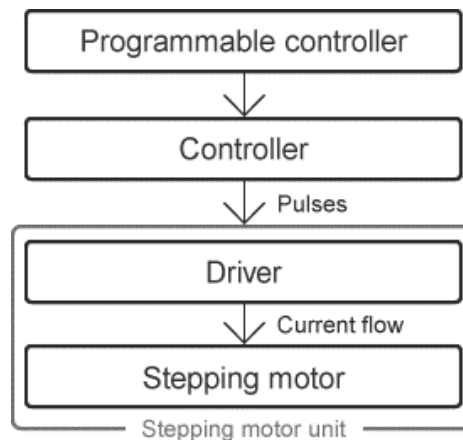
4.4.2 Ovládání krokových motorů

Princip fungování

Jelikož je krokový motor řízen elektrickými pulzy o napětí několika desítek voltů a zároveň skrze jeho vnitřního vinutí prochází pro mikrokontrolér příliš velké hodnoty elektrického proudu, je potřeba jej řídit pomocným driverem.

Princip řízení motoru je takový, že se řídí s otevřenou smyčkou, což znamená, že řízení se provádí posíláním signálů z nadřazeného regulátoru do motoru a to jednosměrně. Tím je řízení snadnější, protože odpadá potřeba senzorů a zpětné vazby. Generátor pulzů (v tomto

případě mikrokontrolér) generuje pulzy, které jsou vstupy do budiče, který dodává adekvátní proud do vinutí motoru. [29]



Obrázek 24 – Hierarchické zobrazení ovládaní krokového motoru pomocí driveru [29]

Řízení rychlosti krokových motorů

Jak je uvedeno výše, krokový motor je řízen vstupy elektrických impulzů, které mají nějakou frekvenci opakování. Počet těchto pulzů za sekundu udává rychlost otáčení hřídele krokového motoru. To umožňuje přesné polohování natočení hřídele a lze jej spočítat dle následujícího vzorce:

$$\text{Úhel motoru } [^\circ] = \text{úhel 1 kroku } [^\circ * \text{krok}^{-1}] * \text{počet impulzů}$$

Úhel kroku neboli Step bývá většinou $1,8^\circ$. To znamená, že na plnou otáčku motoru potřebujeme $360^\circ = 1,8^\circ * 200$ kroků

Stejně tak je rychlost otáčení krokového motoru úměrná rychlosti vstupních impulsů. Vyšší frekvence pulzů způsobí, že se rychlost otáčení krokového motoru úměrně zvýší. Tyto otáčky motoru (otáčky za minutu) lze vypočítat následovně:

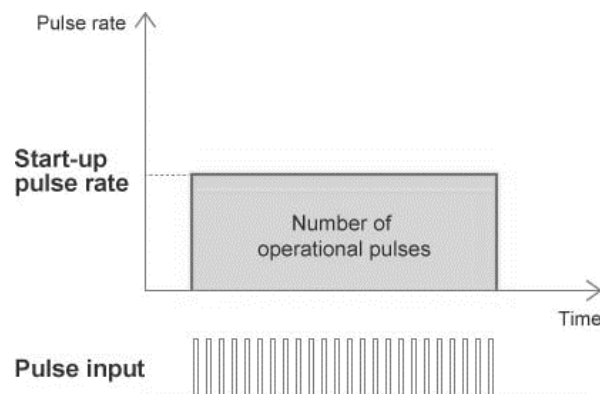
$$\text{Otáčky motoru } [\text{ot.} * \text{min}^{-1}] = \frac{\text{úhel kroku } [^\circ * \text{krok}^{-1}]}{360 [^\circ]} * \text{frekvence pulzů } [\text{Hz}] * 60$$

Tato charakteristika otáčení motoru, která je dokonale synchronizována s frekvencí pulzů, je to, co dělá krokové motory tak žádanými pro účely přesného řízení natočení. Nevýhodou je že může dojít ke ztrátě synchronizace mezi vstupními impulsy a rotací motoru v důsledku přetížení nebo náhlých změn otáček.

Pro krokové motory existují dva různé provozní režimy, nazývané profil pohybu konstantní rychlosti a profil pohybu zrychlení/zpomalení. První z nich okamžitě mění rychlost otáčení motoru. Tento režim se také nazývá obdélníkový pohybový profil a je omezen na provozní

rozsah, ve kterém je motor schopen samovolně nastartovat (okamžitě se dostat na otáčky). Pokud je pro toto zrychlení k dispozici dostatečný točivý moment, je tento režim velmi jednoduchý s konstantní frekvencí pulsů.

Pokud však nelze vytvořit dostatečný točivý moment zrychlení, pak dojde ke ztrátě synchronizace. V tomto případě je třeba místo toho použít pohybový profil zrychlení/zpomalení. To zahrnuje postupnou změnu pulzní frekvence, aby byl poskytnut čas pro zrychlení a zpomalení. Tento režim se také nazývá profil lichoběžníkového pohybu a rozšiřuje provozní rozsah, za kterým se motor může samovolně spustit.



Obrázek 25 – Profil konstantní rychlosti [30]

Protože však náhlé zrychlení nebo zpomalení riskuje ztrátu synchronizace, je třeba věnovat pozornost tomu, jak změnit rychlost motoru (pulzní frekvenci) nahoru a dolů. [30]

4.5 Snímače

Snímače nebo také senzory slouží robotům a podobným zařízením např. k určování polohy v prostoru a nachází se v přímém styku s měřeným prostředím. Jejich citlivá část se nazývá čidlo. Sensor snímá sledovanou veličinu (může být fyzikální, chemická nebo biologická) a na základě principu chování ji přeměňuje na měřicí veličinu, a to nejčastěji ve formě elektrického napětí nebo protékajícího elektrického proudu.

U snímačů se rozlišují zejména statické (převodní charakteristika je dána funkční závislostí $y = f(x)$) a dynamické parametry (lze popsat lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty).

Tabulka 2 – Statické a dynamické parametry snímačů [31]

Statické parametry	Dynamické parametry
Citlivost	Parametry časové odezvy
Práh citlivosti	Časová konstanta
Dynamický rozsah	Šířka frekvenčního pásma
Reprodukovatelnost	Frekvenční rozsah
Rozlišitelnost	Rychlost číslicového převodu
Aditivní a multiplikační chyby	Parametry šumu
linearita	
Parametry výstupu	

4.5.1 Rozdělení snímačů

Snímače se rozdělují dle následujících kritérií:

- dle měřené veličiny – měření teploty, tlaku, mechanických veličin, průtoku, senzory elektrických a magnetických veličin, optoelektrické, piezoelektrické, radiační veličiny;
- dle fyzikálního principu – senzory odporové, kapacitní, indukčnostní, piezoelektrické, chemické, biologické;
- dle typu styku s měřeným prostředím – dotykové, bezdotykové;
- dle transformace signálu – aktivní (senzor se zároveň chová jako zdroj elektrické energie), pasivní (je nutné externího napájení a naměřenou veličinu jako je odpor, indukčnost nebo kapacitu je dále nutné transformovat na elektrický signál);
- dle výrobní technologie – mechanické, elektromechanické, pneumatické, polovodičové. [31]

4.5.2 Měření náklonu

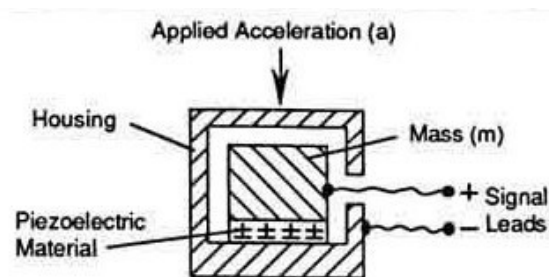
K měření náklonu se používají buď křemíkové akcelerometry, gyroskopy nebo další pohybové senzory. Jsou konstrukčně miniaturní a říká se jim MEMS (Micro Electro Mechanic Systems). Pomocí elektromagnetických charakteristik jsou schopny zjistit změnu fyzikálních veličin objektů. [32]

Akcelerometr

Měří statické nebo dynamické zrychlení a jsou vhodné pro měření odstředivých a setrvačných sil a pro určení pozice tělesa, jeho naklonění nebo snímání vibrací. Jejich časté použití je např. v automobilovém průmyslu nebo např. pro snímání seismické aktivity. [33]

Piezelektrický akcelerometr – Principem je piezelektrický krystal, který důsledkem mechanické energie (zrychlení) generuje elektrický náboj. Měření náboje vytvořeného piezokrystalem se provádí buď externí elektronikou s vysokou impedancí, nebo vnitřní elektronikou kde se konvertuje náboj na výstup s nízkou impedancí. Jeho konstrukce je velmi jednoduchá, ale snímací frekvence je velmi nízká (0,1 Hz) což snižuje jeho citlivost na málo prudké pohyby.

Konstrukčně se skládá z piezelektrického materiálu a seismické hmoty (využívá se zde Newtonova zákona $F = m \cdot a$). [33]



Obrázek 26 – Blokové schéma principu piezelektrického akcelerometru [33]

Snímač je připevněn na tuhou podpěru základny senzoru. Seismická hmota je připevněna na piezosnímač. Po vystavení snímače zrychlení a se generuje síla F , která působí směrem na piezelektrický element, ten generuje náboj, který můžeme snímat externí nebo interní elektronikou.

Piezorezistivní akcelerometr – Principem je mikrokřemíková mechanická struktura, která mění vlastní odpor v závislosti na jejím zrychlení.

Akcelerometry s proměnnou kapacitou – Principem je mikrokřemíková mechanická struktura, která mění vlastní kapacitu v závislosti na jejím zrychlení. [34]

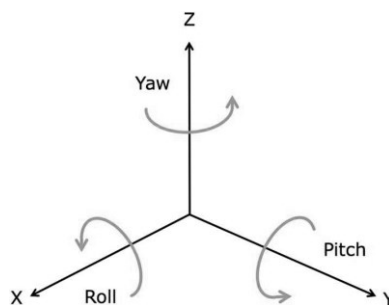
Inklinometr

Inklinometr neboli snímač náklonu funguje na principu měření úhlu relativně ke směru gravitační síly, a to v jedné nebo ve dvou osách. Inklinometry bývají založené na technologii MEMS, takže jejich rozměry bývají miniaturní. Jako výstup bývá typu analogového napětí v hodnotách 0,5 – 4,5 V, nebo protékajícího proudu v rozmezí 4 – 20 mA. Praktické použití

pak bývá ve stavebnictví, a to při vyrovnávání, ochraně proti náklonu a jeho měření. Dále je lze aplikovat například u měření náklonu solárních panelů. [35]

Gyroskop

Gyroskop na rozdíl od akcelerometru dodává informaci o otáčení v rovině (princip kompasu). Úhly měří nezávisle na zrychlení ale na orientaci vůči gravitaci. Jeho souřadný systém obsahuje 3 prostorové osy, kde natočení kolem každé z nich se nazývají roll, pitch a yaw. [34]



Obrázek 27 – Rozdělení os tříosého gyroskopu [34]

MEMS gyroskopy detekují otáčení pomocí Coriolisova efektu, přičemž využívá konstrukčních technik jako je např. DRG.

4.6 Komunikace

4.6.1 Drátová komunikace

RS-232

Je to rozhraní pro přenos informací. RS-232 pracuje s vyšším napětovým signálem, než je standardních 5 V. To má za následek lepší odolnost proti rušení a přenos na větší vzdálenosti. Rychlost přenosu je asynchronní a je tedy pevně dána. Napětové úrovně jsou 1 a 0 přičemž 1 je zastoupena napětovou úrovní -10V a 0 je zastoupena napětovou úrovní +10 V.

Parita – je to nejjednodušší způsob, jak zvýšit zabezpečení přenosu dat. U vysílače se sečte počet jedničkových bitů a následně se doplní paritním bitem tak, aby byla zachována předem dohodnutá podmínka počtu jedničkových bitů (sudá parita, lichá parita). [36]

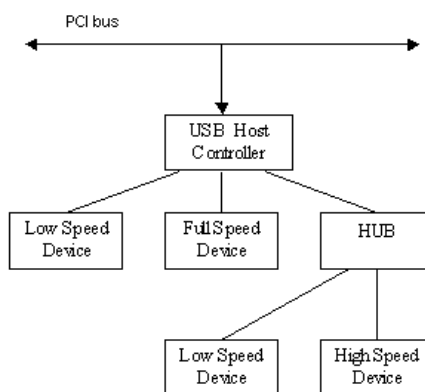
CAN

CAN Bus sběrnice je elektronická komunikační sběrnice definována normou ISO 11898 a je založená na bázi RS-485. [37]

USB

Komunikační protokol USB

USB je externí univerzální sériová sběrnice, po které se přenáší data sériově a to poloduplexně. K přenosu se používají dva signálové vodiče a využívá se diferenčního kódování (podobně jako u RS-422). Tím se zvyšuje odolnost vůči okolnímu rušení (elektromagnetický šum). Fyzicky jsou komunikující zařízení propojeny systémem point to point (1 kabel propojuje pouze 2 sousední uzly). Více koncových zařízení lze připojit pomocí rozbočovače. Na logické úrovni se jedná o sběrnici, jelikož řídicí uzel dokáže komunikovat s jakýmkoli zařízením připojeným do topologie této sítě, a to bez ohledu na to, v jakém místě se zařízení nachází. [38]



Obrázek 28 – Stromová topologie univerzální sériové sběrnice [38]

Existuje tedy pouze jeden řídicí uzel (host), což bývá většinou počítač (přesněji řadič USB na základní desce). K tomuto uzlu jsou připojeny buď koncová zařízení s různou rychlostí komunikace, nebo rozbočovače. Kvůli formátu adresy, která je přiřazena ke každému komunikujícímu zařízení, je maximální počet těchto zařízení 127 (adresa má 7 bitů).

Díky této struktuře nemůže dojít k výskytu smyčky, což značně zjednodušuje komunikační protokol a umožňuje odpojování zařízení (periférií) bez narušení činnosti ostatních uzlů. [38]

Rychlost USB

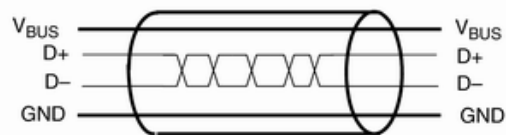
USB pracuje ve třech různých typech předem definovaných rychlostí a to Low-Speed, Full-Speed, High-speed a SuperSpeed (USB 3.0 a výše).

Jako první forma USB byla USB 1.0 se základní rychlostí Full Speed – 12 Mb/s. V roce 2001 bylo představeno USB 2.0 s novým typem rychlosti High-Speed a to o rychlosti přenosu 60 MB/s. Mezi nejnovější verze USB, která vyšla roku 2008) patří USB 3.0 (3.1)

s maximální rychlostí 5Gbit/s. USB 3.1 je vylepšenou verzí USB 3.0 (Gen 2) s maximální rychlostí přenosu 10 Gbit/s. Některá zařízení jako jsou klávesnice pracují v režimu Low-Speed, jelikož není potřeba přenášet velký počet dat během uplynulého času. [38]

Přenosové médium USB

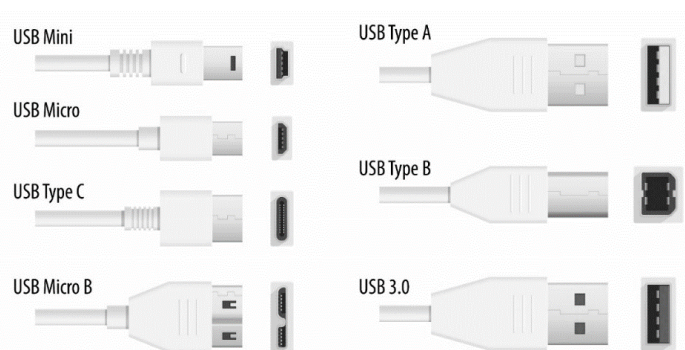
K propojování uzlů mezi sebou jsou použity čtyři vodiče. Dva vodiče slouží jako napájecí a jsou označovány jako VBUS a GND. Toto napájení slouží jako zdroj pro připojené periférie a ty tak nemusí mít zabudovaný vlastní zdroj elektrické energie. Zbylé dva vodiče jsou použity pro sériový poloduplexní přenos dat při využití diferenčního kódování a označují se jako D+ a D-. Fyzicky jsou vodiče vedeny jako kroucená dvoulinka s minimální impedancí 90 ohm. To zajišťuje větší robustnost přenášeného signálu, kdy jeden vodič neinterferuje druhý (elektromagnetické pole vzniklé přenosem se navzájem vyruší). [38]



Obrázek 29 – Struktura propojovacího kabelu – USB [38]

Typy USB

Dle aplikace a evoluce se USB dělí na různé různé typy a to USB-A, Mikro-B, USB-B, Mini-B, USB-C atd.



Obrázek 30 –Typy USB [15]

Logické úrovně USB:

Logická nula (L) je ekvivalentní úrovni napětí 0 V a logická jednička (H) napěťové úrovni TTL (3.3 V). V režimu vysoké rychlosti jsou napěťové úrovně L = (-10 až 10 mV) a H = (360 až 440 mV). Tyto úrovně však nerepresentují přenášené bity, jelikož se používá upravené kódování NRZI. [38]

SPI

Sběrnice SPI je založena na obousměrném plně duplexním přenosu dat. Tento přenos je řízen hodinovým signálem vysílaným uzlem typu master. Její hlavní výhodou je jednoduchost. Příjímá stranu může klidně představovat i běžný posuvný registr. Umožňuje komunikaci mezi dvěma nebo více připojených zařízení (uzlů). Rychlost přenosu dosahuje až 70 MHz. [39]

I2C

Sběrnice I2C používá společný hodinový signál (synchronní přenos), ale oproti sběrnici SPI je přenos pouze poloduplexní. V jednom okamžiku může existovat pouze jeden vysílač a libovolný počet přijímačů. Každý uzel má natvrdo přiřazenou jednoznačnou adresu. Ve srovnání s SPI sběrnici je složitější, ale flexibilnější sériovou externí sběrnici.

Používá se převážně na vzdálenosti metrů. Rychlost přenosu je maximálně 3,4 MHz. [40]

4.6.2 Bezdrátová komunikace

Je vhodné použít tohoto typu komunikace, máme-li mobilní nebo vzdálený typ zařízení (zdroj/přijímač signálu).

RF

Rádiová frekvence (RF) je frekvence kmitání v rozsahu přibližně 3 kHz až 300 GHz, což odpovídá frekvenci rádiových vln a střídavých proudů, které přenášejí rádiové signály. Vzdálenost přenášeného signálu je téměř neomezená (ovlivněna jen překážkami mezi vysílačem a přijímačem). Pro nelicenční používání lze využít pásma menší 1 GHz nebo přesně 2,4 GHz. [41]

802.11 Wi-Fi (Wireless-Fidelity)

Wi-Fi je v dnešní době čím dál tím populárnější formou propojení robota po síti s počítačem (hostem), nebo přímo s ovládacím zařízením jako je mobilní telefon. K vytvoření spojení je potřeba použít bezdrátový router a Wi-Fi jednotku v robotovi. Mezi velké výhody patří komunikace s velkým datovým tokem (přenosová rychlost až 54 Mbps) a velkou vzdáleností přenosu (omezená vysílacím výkonem routeru) v pásmu 2,4 GHz

ZigBee

ZigBee je v dnešní době velmi důležitý prvek umožňující komunikaci v chytrých domácnostech a internetu věcí (IoT). Propojuje například mobilní telefon s prvky domácnosti jako je osvětlení, zabezpečovací systémy, topení atd. Původně se jednalo o standard bezdrátové rádiové komunikace s účelem využití v průmyslu. Pracuje v pásmech 868, 915 a 2400 MHz a to na standardu IEEE 802.15.4. Přenosová rychlost je oproti Wi-Fi podstatně menší (až 250 kbps) a podporuje maximálně 27 kanálů. Vzdálenost připojení je maximálně 30 metrů ve vnitřních prostorech a 200 metrů ve venkovních prostorech. [42]

Bluetooth

Bluetooth je definován standardem IEEE 802.15.1 a dovoluje vyšší rychlost přenosu dat oproti ZigBee (až 1 Mbps). Vzdálenost je nižší v jednotkách metrů a je založen na principu master-slave. Master může být řídicí jednotka (vysílač – mobilní telefon) a slave přijímač. Master může mít až 7 aktivních zařízení v dané síti.

Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) je často používán k ovládání různých zařízení, jako může být robot. Jedná se totiž o systém s velmi nízkou spotřebou elektrické energie.

Spotřeba elektrické energie u BLE zařízení je udržována tím, že připojené zařízení je udržováno ve spánkovém režimu (Stand-by Mode) a k jeho probuzení dojde jen když je zahájena jeho aktivní komunikace, která trvá jen několik milisekund. Odběr proudu v tomto okamžiku je pouhých 15 mA. Rychlost přenosu je velmi omezená a lze tak teoreticky přenášet maximálně 1 Mb/s. [43]

4.7 Akumulátor

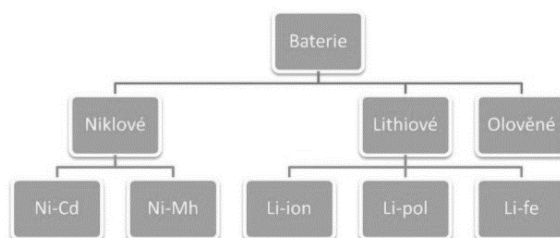
Akumulátor neboli baterie je zdrojem elektrické energie, kde dochází k převodu chemické energie na elektrickou.

Skládá se ze tří základních komponent – Kladná elektroda, záporná elektroda a elektrolyt.

V RC světě se nejčastěji používají dva typy akumulátorů (niklové a lithiové). Jejich parametry jsou vybíjecí proud (například 1 C je nabíjecí/vybíjecí proud rovnající se jejich kapacitě), počet článků (například značení 3 S znamená 3 články - celkové napětí je 11,1 V (3x 3,7 V)), a kapacita (například 1200 mAh – značící proud, při kterém se baterie vybije za

1 hodinu). Baterie mění své napětí v závislosti na nabití a je tak možné tuto hodnotu měřit. [44]

Akumulátory můžeme obecně rozdělit dle obrázku níže.



Obrázek 31 – Rozdělení akumulátorů [44]

4.7.1 Niklové baterie

Jsou levnější než lithiové baterie a odolnější vůči nárazu a poškození. Jejich nevýhodou bývá nízká kapacita v poměru k hmotnosti článků. Dále se dělí ve spojení s jinými prvky na:

- Nikl-Metal Hydridové (Ni-Mh)
- Nikl-Cadmiové (Ni-Cd) [44]

4.7.2 Lithiové baterie

Dokážou udržet mnohem vyšší kapacitu než baterie niklové. Jsou vybaveny ochrannými prvky, jako jsou hlídání diferenčního napětí na jednotlivých člancích, hlídání teploty a zkratu. Dělí se na:

- Lithium-iontové (Li-ion) – velmi často používané, avšak velmi nebezpečné, zvláště když si chce člověk vytvořit vlastní baterii s více články a zapomene na stabilizátor napětí nebo jiné ochranné prvky.
- Lithium-Polymerové (Li-pol) – jsou mnohem bezpečnější než lithium-iontové a je možné je uhasit zamezením přístupem vzduchu nebo hasícím přístrojem. Při nabíjení je dobré používat nehořlavé bezpečnostní pouzdro [44]
- LFP baterie - obsahují pevný elektrolyt, který používá katodového materiálu LiFePO (Lithium-železo-fosfát)

4.7.3 Olověné baterie

Nejčastěji se používají jako baterie v automobilech díky jejich kapacitě a velkému vybíjecímu proudu, který potřebuje startér spalovacího motoru. Jejich použití v RC světě je minimální. [44]

5 METODA 3D TISKU

Jedná se o aditivní způsob výroby, kde na rozdíl od CNC obrábění se výrobek vytváří nanášením nových vrstev pomocí 3D tiskárny. Tato metoda se nazývá 3D tisk. Nejprve je potřeba vytvořit nebo načíst požadovaný 3D model, který se pomocí metod popsaných v dalších podkapitolách, připraví k tisku. 3D tisk pak probíhá postupným nanášením tenkých vrstev, které se k sobě navzájem přitavují pomocí tepla. Nejčastěji se tak používají tavné materiály, které jsou dostatečně pevné po zchlazení.

5.1 Historie 3D tisku

V roce 1986 byla Charles W. Hullem vytvořena první 3D tiskárna. V roce 1992 se začínala metoda 3D tisku používat k tvoření prototypů v automobilovém a leteckém průmyslu. Na základě myšlenky otevřeného hardware byl v roce 2005 založen projekt RepRap. Plastové části 3D tiskárny lze vytisknout na jiném RepRapu. Následně po 3 letech vychází samoreplikační tiskárna Darwin, která dokáže tisknout většinu vlastních komponent. Druhá verze se jmenovala Mendel a byla menší a rychlejší. Další verze RepRapu vynalezl Josef Průša. Postupem let se 3D tisk dostal např. až k tisku ledvin a orgánů pro zvířata. V roce 2014 došlo k prvnímu tisku ve vesmíru, který byl využit k tisku testovacích vzorků na Mezinárodní vesmírné stanici ISS [45]

5.2 Nejpoužívanější 3D tiskové technologie

BJ (Binder Jetting) – Vrstva naneseného prášku je spojena pojivem, které je vytlačováno z tiskové hlavy. Tisk je rychlý a levný, avšak kvalita tisku a pevnost modelu je velmi nízká.

DLP (Digital Light Processing) – Technologie nasvícování fotopolymeru UV projekcí v daném řezu modelu. Modely jsou dokonale hladké, ale jejich životnost je kratší.

FDM (Fused Deposition Modelling) – Princip je v nanášení roztaveného materiálu v nízkých (0,25 mm) vrstvách. Tiskem vzniká minimální odpad, ale je vyžadována velká tloušťka jednotlivých vrstev a povrch vodorovné vrstvy může být nerovný.

MLS (Micro Laser Sintering) – Metoda laserového spékání kovů. Tloušťka vrstvy je extrémně malá (1 μm).

SLA (Stereolithography) – vytvrzování tekutého kompozitu laserovým paprskem.

Další metody 3D tisku

2PP (Two Photon Polymerization), **ADAM** (Atomic Diffusion Additive Manufacturing), **PBF** (Poly Bed Fusion), **SLS** (Selective Laser Sintering), **MJ** (Material Jetting), **MJP** (MultiJet Printing), **MJM** (Multijet Modeling), **LOM** (Laminated Object Manufacturing), **SLM** (Selective Laser Melting), **EBM** (Electronic Beam Melting) [45]

5.3 3D tiskové materiály

Kov – Je použit ve formě prášku a dokáže nahradit složitější technologii výroby dílů jako je slévání či obrábění.

Sklo – Tento materiál je také použit ve formě prášku, který je vyroben recyklací starého skla. K němu se používá přídatný spojovací materiál.

Plast – Jedná se o neznámější a nepoužívanější materiál pro aditivní výrobu. Chemicky lze dělit plast použitý k 3D tisku na ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), PLA (Polyactid acid / kyselina mléčná), PET-G (glykol) a různé další speciální druhy plastů – např. Flex (velmi roztažný), PLA+ (nižší bod tání než PLA a má jinou pevnostní charakteristiku) atd. Tisknout se dá také z recyklátu, což je starý použitý materiál, ze kterého se vyrobí klubko tzv. filamentu pro další tisk.

Beton – použit k vytištění např. energetický nenáročných domů. Dnes jde o převratnou technologii, která se dennodenně rozvíjí. [45]

5.4 3D tiskárna

Standardní 3D tiskárna pracuje na principu vytlačování roztaveného filamentu žhavou tryskou o teplotách mezi 180 – 260°C. Pomocí 3-osého souřadnicového uspořádání krokových motorů je tiskárna schopná tisknout jak do stran 2D objekty, tak do výšky 3D objekty. U levnějších tiskáren může docházet k nízké kvalitě jednotlivých vrstev – nekonzistence tlačeného materiálu tryskou, „stringování“ – tj. tvoření nežádaných nití mezi přeskokováním trysky nad vrstvami, nebo může docházet k častému zasekávání materiálu v trysce (nekonzistentní teplota a průřez trysky). Jsou různé metody 3D tisku, které daly život různým 3D tiskárnám, které fungují na jiných principech.

Použitá 3D tiskárna v tomto projektu je konkrétně Prusa Mini+, která má vlastní operační systém, tisknutelnou plochu 180 x 180 x 180 mm a robustní konstrukci. Firmware je často aktualizovaný a postupným vylepšováním se zlepšují vlastnosti tisku (rychlost, kvalita, „stringování“).



Obrázek 32 – 3D tiskárna Prusa Mini+ [12]

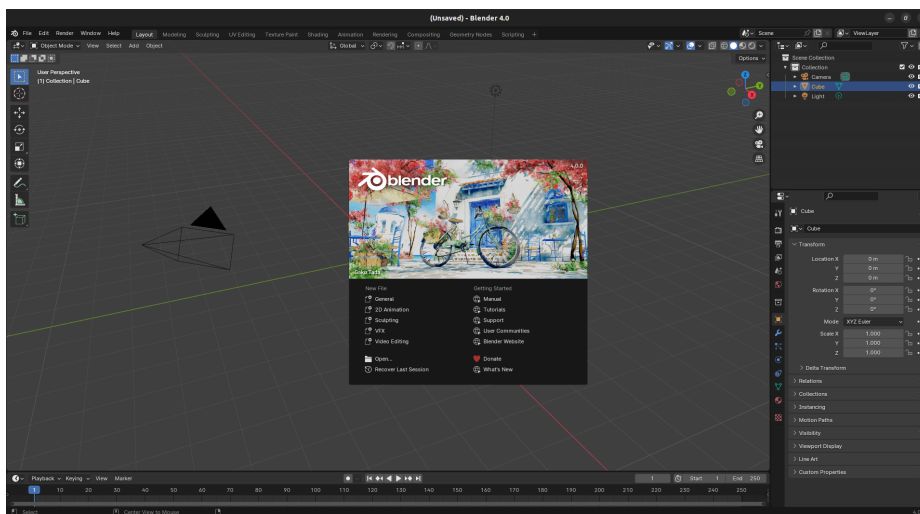
Její možnou alternativou jsou jiné tiskárny Prusa – MK3, MK3s, MK4, nebo jiné značky konkurenčních výrobců – např. Creality, Anycubic, Bambu Lab atd.

5.5 3D modelování a příprava k tisku

Je to proces počítačové grafiky, při kterém se pomocí specializovaného softwaru vytváří matematická reprezentace trojrozměrného objektu nebo tvaru. Digitální ztvárnění fyzického objektu se nazývá 3D model a používají je různá průmyslová odvětví.

Odvětví včetně architektury, stavebnictví, vývoje rozličných produktů, vědy, medicíny, filmu, televize a videoher používají aplikace a software pro 3D modelování k vizualizaci, simulaci a vykreslování grafických návrhů.

3D modelovací software – Blender



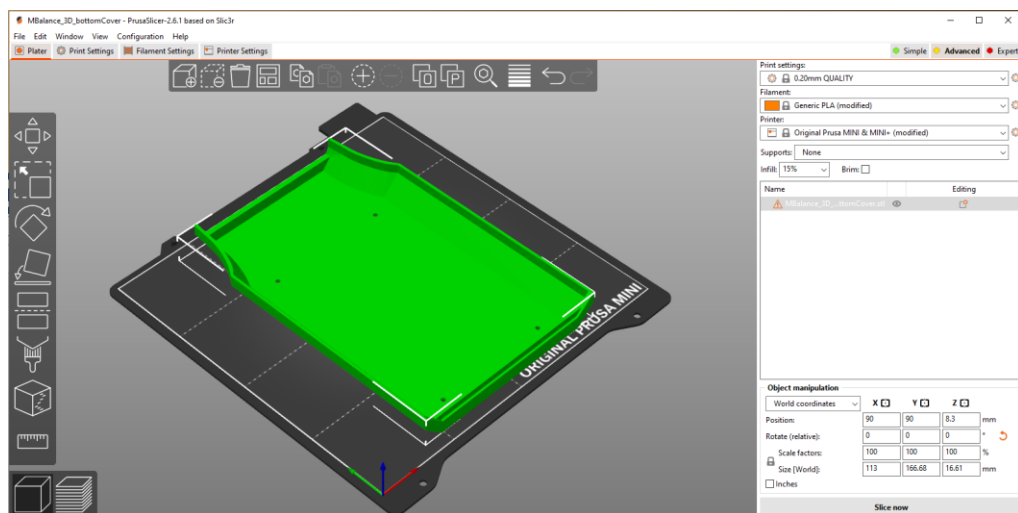
Obrázek 33 – Program pro tvorbu 3D modelů a animací – Blender

Program Blender je open-source a je velmi populární mezi modeláři, tvůrci animací a vývojáři her. Jeho hlavní výhodou je jednoduchost a téměř nekonečný obsah funkcionalit,

kteřé jsou doplňovány jeho komunitou. Pro vytvoření 3D modelu je základem nastavit si globální jednotky (například milimetry) a připravení referenčního nákresu (například nárys, bokorys a půdorys součástky). Následně pomocí mnoha dostupných metod vznikne 3D model, který lze kdykoliv upravit či vylepšit. Aby mohl být 3D model exportován (pro 3D tisk nejlépe ve formátu STL), je nutné jej zkontrolovat, zda jsou všechny polygony orientované směrem ven, nebo jestli existují překrývající se vertexy (body hran). To by totiž mohlo dělat problémy dále v programu pro tzv. „slicování“ objektu.

Mezi další populární programy pro návrh 3D modelů můžeme zařadit např. AutoCAD, Autodesk, Cinema 4D, FreeCAD, SolidWorks, SketchUp, Maya atd.

Software pro přípravu 3D modelu na tisk – Prusa Slicer 2.7.1



Obrázek 34 – Program pro přípravu modelu k tisku – PrusaSlicer

Tento program pro před-chystání modelu na tisk „Slicer“ funguje tak, že se nejprve nastaví druh tiskárny, druh použitého materiálu (Filament) a naimportuje se požadovaný soubor například ve formátu STL. Tento soubor je vstupem a výsledný soubor ve formátu gcode je pak výstupem. Aby bylo možné model připravit k tisku, musí se „nařezat“ (angl. „slice“) a to tak, že se zvolí parametry tisku jako je šířka vnějšího perimetru, výška a šířka vrstvy, teplota trysky, typ vnitřní výplně, možnost podpěr a další.

Po tomto „slicování“ je objekt připraven k exportu, a to ve formátu gcode, který má podobu textového dokumentu, kde jsou instrukce obsaženy v každém řádku za sebou. Tento soubor se dále pomocí Flash disku nebo USB kabelu přenesse do operačního systému 3D tiskárny. Ta následně předejde trysku a podložku a připraví se na 3D tisk. Mezi další populární SW pro tuto přípravu před tiskem můžeme zařadit např. *Cura*, *Slic3r* nebo *Astroping*.

6 REGULACE

V této kapitole bude stručně pojednáno o základních principech řízení a to s ohledem na rozsáhlost této problematiky zejména v návaznosti na dále v práci využitě přístupy.

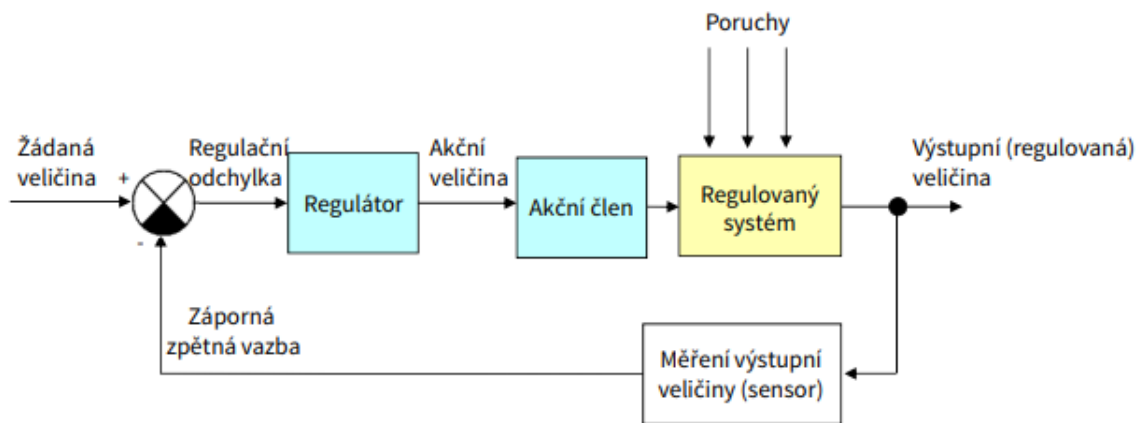
6.1 Klasifikace řízení

Řízení můžeme obecně dělit dle rozličných kritérií, základní rozdělení by mohlo vypadat následovně:

- manuální – systém (proces) je řízený člověkem – např. řízení automobilu;
- automatické – systém je řízený nezávisle na člověku (např. technickým zařízením, počítačem, přírodními zákonitostmi apod.);
- přímovazební (v otevřené smyčce) – stav (výstup) systému není měřen, výpočet vstupu do systému probíhá bez této informace (nazývá se taktéž ovládání, např. může jít o prací cyklus v automatické pračce podle zadaného programu – čistota prádla zde není zpětně měřena);
- zpětnovazební – výstupní signál (nebo stav) z řízeného systému je měřen a na jeho základě (resp. na základě rozdílu mezi požadovaným a zjištěným „chováním“) se generuje vstup do systému, tzv. akční veličina.

6.2 Základní zpětnovazební regulační obvod

Základní zpětnovazební regulační obvod (viz obrázek 35 níže) funguje na principu záporné zpětné vazby, kde hlavním prvkem je řízený systém (proces), jehož výstup (popř. stav) je řízen. Zařízení ovlivňující řídicí (akční) veličinu, která vstupuje do řízeného systému, se nazývá akční člen (též „aktuátor“). Na řízený systém působí i jiné, neřiditelné vstupy – poruchy, jejichž vliv se snažíme minimalizovat. Akční veličina je vypočtena v regulátoru na základě jeho algoritmu a rozdílu mezi referenčním (požadovaným) signálem (veličinou) a měřeným výstupním signálem. Tento rozdíl se nazývá regulační odchylka. Řízení ve zpětné vazbě je taktéž nazýváno regulací. [46]



Obrázek 35 – Základní zpětnovazební regulační obvod [46]

Zavedené označení veličin [46]:

u – akční veličina (vstup do řízeného systému),

y – výstupní (regulovaná) veličina,

w – žádaná hodnota regulované veličiny,

$e = w - y$: regulační odchylka,

n – porucha.

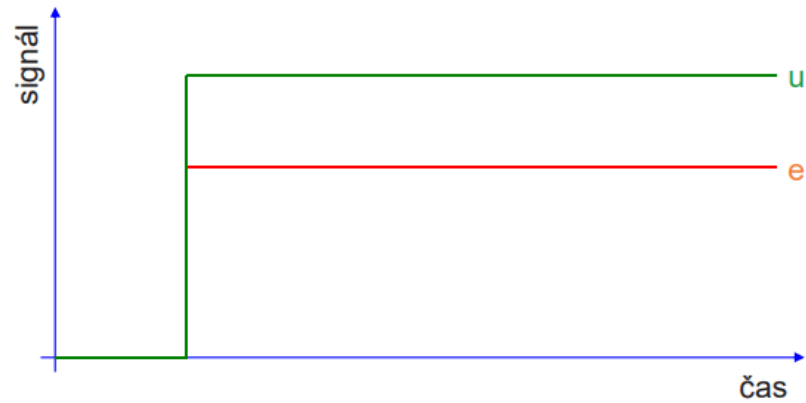
6.3 PID regulace

Jelikož existuje nespočet přístupů k regulaci, nejvíce rozšířený je typ regulátorů založených na využití 3 základních složek – proporcionální (P), integrační (I) a derivační (D). Tato skupina regulátorů označovaná jako PID-regulátory má také spoustu variant a nespočet metod nastavení. Jelikož je tento princip v této práci také využit, bude dále stručně popsán a vysvětlen.

6.3.1 Proporcionální regulátor

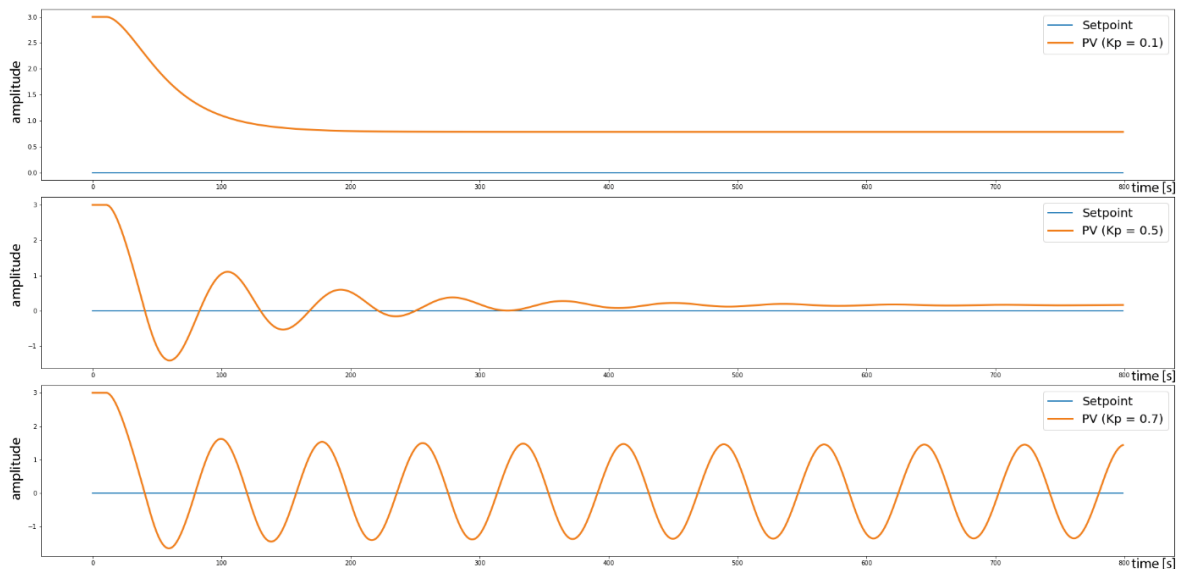
Jedná se o nejzákladnější a nejjednodušší typ spojitého regulátoru. Tento regulátor generuje výstup, tedy akční veličinu, pouze jako násobek vstupu (tj. reg. odchylky e) a konstanty k_P , která vyjadřuje zesílení takového P-regulátoru:.

$$u(t) = k_P * e(t)$$

Obrázek 36 – Reakce P-regulátoru (u) na regulační odchylku (e) [46]

Princip funkce:

- čím je regulační odchylka (e) a zesílení k_P větší, tím více roste akční zásah (u)
- bez použití kombinace s I-složkou dochází u statických (proporcionálních) systémů k trvalé reg. odchylce při řízení na konst, žádanou hodnotu.
- je-li zesílení k_P příliš vysoké, soustava má tendenci ztrácet stabilitu a dochází k rozkmitání. Proto je vhodné do regulace přidat další složku, která zabrání v rozkmitání a ztrátě stability. [49]

Obrázek 37 – Ilustrace vlivu změny K_P na průběh řízení P-regulátorem [49]

6.3.2 Integrovní regulátor

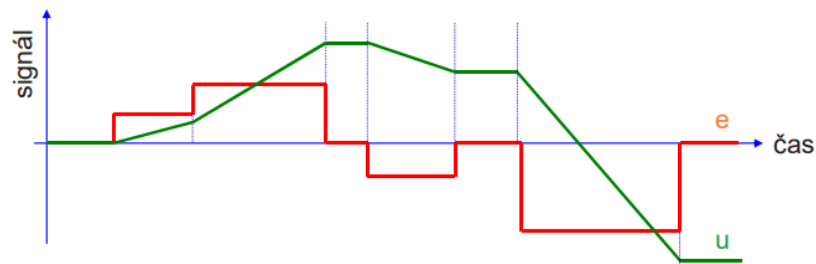
Integrovní regulátor lze také použít i samostatně a v časové oblasti ho lze popsat následující rovnicí, kde T_I označuje integrační časovou konstantu:

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int e(t) dt$$

nebo alternativně s tzv. integrační konstantou k_I udávající rychlost (strmost nárustu) integrace:

$$u(t) = k_I \int e(t) dt$$

Tato složka se nejčastěji používá ve spojení jako PI nebo PID-regulátor kde díky této složce může být odstraněna trvalá regulační odchylka (např. při řízení proporcionálních soustav na konstantní žádanou hodnotu).



Obrázek 38 – Reakce I-regulátoru (u) na změnu regulační odchylky (e) [48]

Princip funkce:

- když je regulační odchylka (e) kladná, roste akční zásah (u)
- když je regulační odchylka (e) záporná, klesá akční zásah (u)
- velikost hodnoty reg. odchylky (e) tedy ovlivňuje rychlost změny akčního zásahu (u). To je zapříčiněno integrálem, který reaguje na velikost a historii (e)
- to znamená, je-li regulační odchylka (e) nulová, akční zásah (u) je konstantní.
- schopností této složky je běžně eliminovat konstantní chybu, která vzniká, když se použije pouze P složka v regulátoru. Pak je vhodným řešením regulace ve spojení jako PI-regulátor. [48]

6.3.3 Proporcionálně-integrační (PI) regulátor

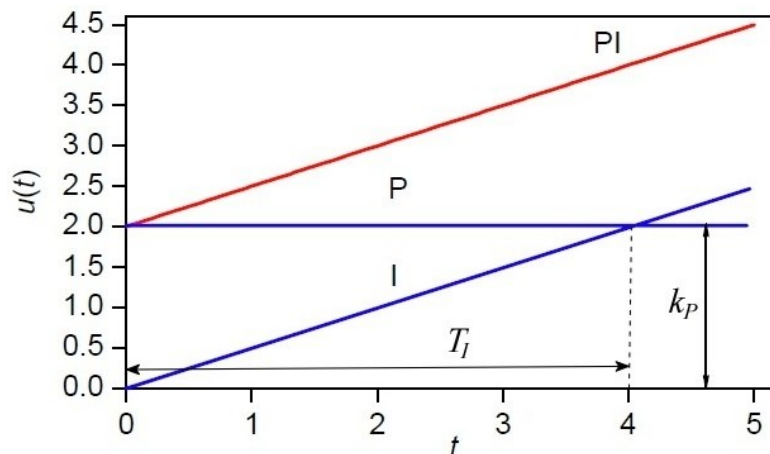
Tento regulátor zesiluje a zároveň integruje regulační odchylku (kombinuje zesílení k_p a integrační časovou konstantu T_I). V časové oblasti je popsán rovnicí:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right]$$

a ve tvaru s integrační konstantou k_I :

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int e(t) dt$$

Integrační složka je reakcí na historii regulační odchylky (integruje/sumuje ji a tím ve častu odstraňuje trvalou regulační odchylku). Velikost této složky také kladně ovlivňuje velikost kmitání.



Obrázek 39 – Vybraná přechodová charakteristika P, I složek a jejich kombinace [75]

6.3.4 Proporcionálně-derivační (PD) regulátor

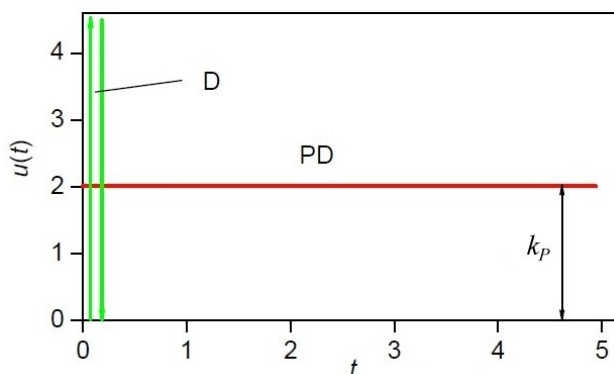
Tento typ regulátoru zesiluje a zároveň derivuje regulační odchylku. V časové oblasti je popsán **nejčastěji** rovnicí (kde T_D je časová derivační konstanta):

$$u(t) = k_p \left[e(t) + T_D * \frac{de(t)}{dt} \right]$$

nebo s derivační konstantou k_D potom jako:

$$u(t) = k_p e(t) + k_D e'(t)$$

Derivační složka je ovlivněna „budoucností“ regulační odchylky. Reaguje na rychlé změny a tím vylepšuje stabilitu uzavřeného regulačního obvodu.



Obrázek 40 – Vybraná přechodová charakteristika P, D složek a jejich kombinace [75]

6.3.5 Proporcionálně-integračně-derivační (PID) regulátor

PI a PID regulátory představují nejrozšířenější způsob regulace v průmyslu – jsou rychle a relativně snadno realizovatelné, srozumitelné, efektivní a dlouhodobě používané.

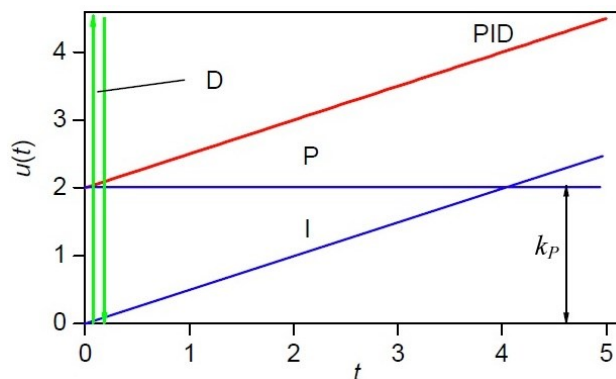
Tento typ regulátoru zesiluje a zároveň integruje a derivuje regulační odchylku. V časové oblasti je popsán rovnicí:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D * \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Lze tak nastavovat 3 jeho parametry a to k_p , T_I a T_D nebo pak k_p , k_I a k_D :

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int e(t) dt + k_D e'(t)$$

V uzavřeném regulačním obvodu obecně odstraňuje trvalou regulační odchylku a zlepšuje stabilitní vlastnosti.



Obrázek 41 – Vybraná přechodová charakteristika P, I, D složek a jejich kombinace [75]

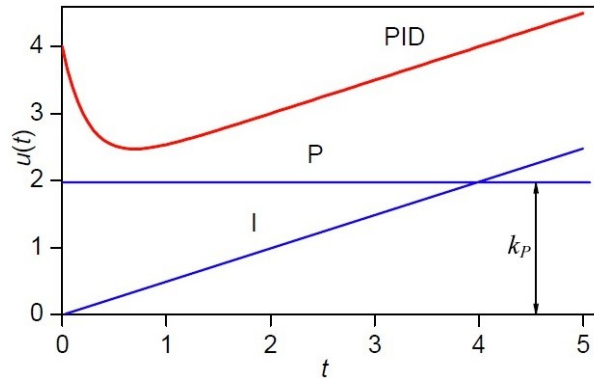
6.3.6 Reálný PID regulátor

Jelikož ideální verze PD a PID regulátorů využívá čistou derivační složku, která způsobuje impulzní odezvu (tzv. Diracův impulz), je důležité k její reálné implementaci použít filtr prvního či vyššího řádu. PID s filtrem prvního řádu pak vypadá následovně:

$$u(t) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I * s} + \frac{T_D * s}{\alpha T_D * s + 1} \right)$$

Kde parametr α bývá zpravidla volen mezi 0,05 až 0,2. [75]

Přechodová charakteristika tohoto reálného PID pak bude vypadat následovně:



Obrázek 42 – Vybraná přechodová charakteristika P, I složek a jejich kombinace s filtrací D-složky (reálný PID) [75]

6.3.7 Diskrétní PID neboli Proporcionálně-sumačně-derivační (PSD) regulátor

Diskrétní tvar lze PID-regulátoru pro definovanou periodu vzorkování signálů T dostaneme obecně tak, že integrál nahradíme sumací a spojitou derivace pak diferencí:

$$u[k] = K_p \left(e[k] + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e[j] + \frac{T_d}{T} (e[k] - e[k-1]) \right)$$

což můžeme vyjádřit také jako:

$$M_n = K_p \left(e_n + K_i \sum_{(i=1)}^n e_i + K_d (e_n - e_{n-1}) \right)$$

kde

$$K_i = \frac{T}{T_i}; K_d = \frac{T_d}{T}$$

Ve výsledku tak dostaneme vztah vhodný pro použití při návrhu softwarového řešení

$$M_n = K_p e_n + K_p K_i \sum_{(i=1)}^n e_i + K_p K_d (e_n - e_{n-1}) + M_0$$

kde M_0 značí počáteční hodnotu, kterou robot použije jako referenční bod.

6.4 Metody ladění regulátorů

Obecně existují analytické a experimentální metody nastavení parametrů regulátorů. U nastavování parametrů regulátoru se klade důraz na požadovanou kvalitu regulačního pochodu, tj. např. trvalou regulační odchylku, maximální překmit, dobu regulace, tlumení či další kritéria.

Analytické metody

Vychází ze znalosti matematického modelu řízeného systému a předpokládaného modelu regulátoru. K určení parametrů mohou být použity operace v časové, frekvenční a nejčastěji v komplexní oblasti (vychází se pak z přenosu řízeného systému).

Dále uvedu jako příklad alespoň 2 ilustrující zástupce této kategorie metod.

Neaslinova metoda

Patří mezi „klasické“ analytické metody. Vychází z charakteristického polynomu uzavřeného regulačního obvodu a vlivu jeho koeficientů na výsledný překmit regulované veličiny. [75]

Touto metodou lze určit jen $(n-1)$ parametrů regulátoru, přičemž „ n “ je řád charakteristického polynomu uzavřeného regulačního obvodu.

Metoda požadovaného modelu (dříve Metoda inverze dynamiky)

Je to analytická, jednoduchá a účinná metoda seřízení konvenčních typů spojitých a diskrétních regulátorů. Je použitelná pro systémy s i bez dopravního zpoždění. Lze dosáhnout nulové trvalé regulační odchylky a požadovaného maximálního překmitu regulované veličiny od 0 do 50% při skokové změně žádané veličiny nebo poruchy na výstupu. [73]

Experimentální metody vychází z naměřených dynamických charakteristik řízeného procesu (nejčastěji přechodových).

Dále opět uvedu alespoň 2 typického zástupce z této oblasti.

Ziegler-Nicholsova metoda

Je typickým představitelem experimentálních metod.

Z naměřené přechodové charakteristiky se vyjádří doba náběhu T_n , doba průtahu T_u a zesílení systému k . Ze zjištěných dat lze pak n azákladě empirických vztahů vypočítat

„optimální“ hodnoty parametrů na základě zvoleného typu regulátoru. Kvalita řízení je ale obvykle horší (větší překmit, menší tlumení).

Ziegler-Nicholsova metoda kritických parametrů

Je jednou z nejznámějších, historicky prověřených metod experimentálního seřízení regulátorů. Hlavní myšlenkou je přivést regulovaný obvod na hranici stability zvyšováním zesílení P-regulátoru při vyřazení ostatních složek a následně se odečtou tzv. kritické parametry (kritické zesílení a kritická perioda kmitů). Z takto zjištěných parametrů lze opět empirickými vztahy spočítat „optimální“ hodnoty stavitelných parametrů regulátoru.

Mimo výše uvedených existují také velmi jednoduché metody založené pouze na přepínání akční veličiny mezi určitými, předem definovanými polohami (např. dvoupolohová regulace), která se používá u jednodušších zařízení bez větších nároků na výslednou kvalitu řízení.

Metod nastavení regulátorů existuje nespočet, jmenujme alespoň několik základních zdrojů s uvedenou tematikou pro základní orientaci: [60] [73] [74] [1]

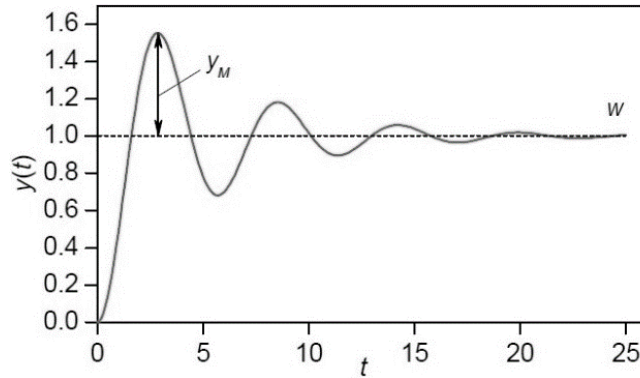
6.5 Kvalita regulačního pochodu

Po splnění stability regulačního obvodu je často požadováno, aby průběh regulované veličiny měl určitý charakter (aby splňoval určitou kvalitu řízení). Z tohoto důvodu se používají různé kritéria hodnotící průběh řízené (nebo i akční) veličiny. Mezi nejpoužívanější kritéria kvality regulace patří:

- **trvalá regulační odchylka:** je to chyba řízení, která zůstane po odeznění přechodových dějů v ustáleném stavu

$$TRO = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

- **maximální přeregulování:** je to v podstatě maximální překmit (výška překmitu řízeného výstupu nad hodnotu signálu žádané hodnoty), při kterém dochází v 1. fázi řízení viz obrázek 43. Překmit může být nežádoucí například pro znehodnocení produktu vysokou teplotou nebo tlakem.

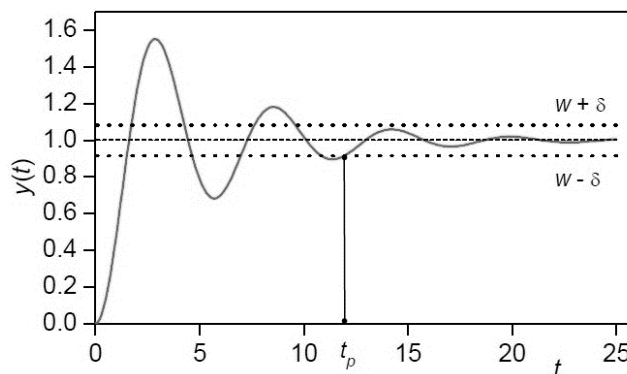


Obrázek 43 – Přechodová odezva regulace zobrazující maximální přeregulování [75]

Je vyjádřen procentuální hodnotou σ [%] poměru velikosti překmitu ku žádané veličině:

$$\sigma [\%] = \frac{y_M}{w}$$

- **doba regulace:** je to obecně čas t_p , ve kterém se výstup ustálí mezi defin. hranicemi žádané hodnoty viz obrázek 44.



Obrázek 44 – Přechodová odezva regulace ilustrující dobu regulace [75]

Doba regulace t_p je pak obecně vyjádřena vztahem:

$$w - \delta \leq y(t) \leq w + \delta$$

- **tlumení regulačního pochodu:** využívá se k hodnocení u kmitavých regulačních pochodů – vždy se hodnotí 2 po sobě jdoucí amplitudy kmitů. Tím se vypočítá tzv. koeficient tlumení ξ

$$\xi = \frac{A_1 - A_2}{A_1}$$

Je-li $\xi = 0$, dochází k netlumeným kmitům s konstantní amplitudou. Naopak při $\xi = 1$ by docházelo k aperiodickému regulačnímu pochodu již bez kmitů.

- **vybraná integrální kritéria:** jedná se např. o výpočet plochy pod křivkou regulační odchylky, její absolutní hodnoty nebo kvadrátu, akčního zásahu nebo jeho derivace (často kombinace). Cílem je, aby tyto integrály nabývaly minimálních hodnot.

Například kritérium kvadrátu regulační plochy je vyjádřeno vztahem:

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t)dt = \int_0^{\infty} [w(t) - y(t)]^2(t)dt$$

Tyto kritéria lze také použít i k samotnému návrhu regulátoru, kde se hledá takové nastavení, jenž minimalizuje uvedené integrály, což je předmětem tzv. optimálního řízení.

V této práci dále, při provedených experimentech, bude využito vyhodnocení kvality regulace pomocí doby ustálení, koeficientem tlumení a také velikostí oscilace kolem vzpřímené nestabilní polohy robota.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 DVOUKOLOVÝ ROBOT

Je takový robot, který musí obsahovat řídicí elektroniku, baterii, pohon a konstrukčně šasi, skelet a kola. Samovolně drží balanc a nakláněním mění svůj pohyb vpřed a vzad. K otáčení využívá diferenční typ podvozku. Projekt je dále pojmenován jako MBalance (spojení iniciálů autora a typ robota).

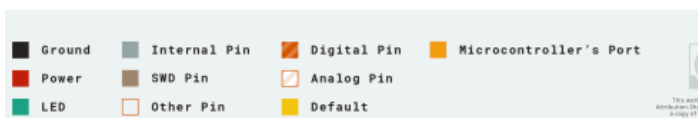
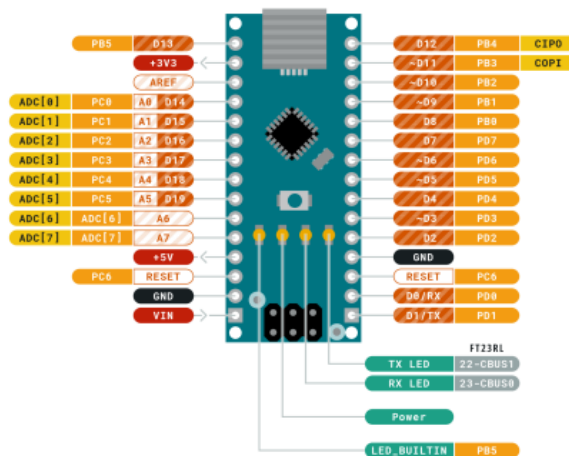
7.1 Zvolené komponenty

7.1.1 Arduino Nano

Arduino Nano je deska založená na čipu ATmega328P a má podobné funkce jako jeho větší originální verze Arduino UNO. Arduino Nano má integrovaný Mini USB konektor a pasuje do nepájivého pole. Jedná se o malou, ale kompletní Arduino desku, která je vhodná na experimentování na nepájivém poli a do konkrétních Arduino projektů. Elektricky obsahuje vše jako Arduino UNO, má ale více analogových vstupů. Použitá verze Nano s čipem ATmega328P nabízí více paměti pro program a data.



Obrázek 45 – Mikropočítač Arduino Nano [25]



Obrázek 46 – Schéma a popis pinů Arduino Nano

Vlastnosti mikrokontroléru Arduino Nano

Čip ATmega328 – Vysoce výkonný energeticky úsporný 8bitový procesor, vysoký takt procesoru (16 MHz), 32 kB flash paměť z toho 2 KB používá bootloader, 2 kB interní SRAM, 1 kB EEPROM, 32 x 8 GPWR, RT counter, 6 PWM kanálů, programovatelný sériový USART, master / slave SPI sériové rozhraní

Napájení – Mini-B USB připojení, 7-15V neregulované externí napájení (pin 30), -5V regulované externí napájení (pin 27)

Režimy – Idle, ADC, režim úspory, vypnutí a standby

I/O piny – 20 digitálních (včetně komunikačních pinů RX, TX), 8 analogových a 6 PWM výstupů

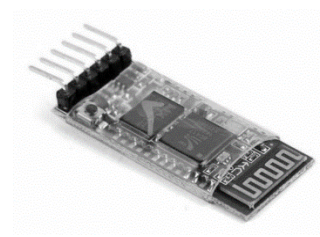
Řídící jednotka je zasazena do patice Nano terminál pro snadnější zapojení kabelů.

7.1.2 Bluetooth přijímač HC-05

Umožňuje mikrokontroléru přijímat a posílat data přes Bluetooth rozhraní. Napájení modulu je v rozmezí 3,3 – 5 V a na desce obsahuje stabilizátor napětí. Jeho vlastnosti jsou:

- max dosah: 10 m, obsahuje integrovanou anténu, čip 29LV800 a BC417, podporuje Bluetooth verze V2.0 + EDR, přenosová rychlost je 9600 bd.

Alternativou může být HM-10, který ale není kompatibilní s mobilními zařízeními, která mají OS Android 4.0.0 a vyšší.

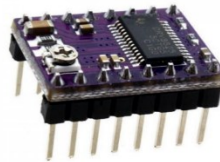


Obrázek 47 – Bluetooth přijímač HC-05 [62]

7.1.3 Driver DRV8825

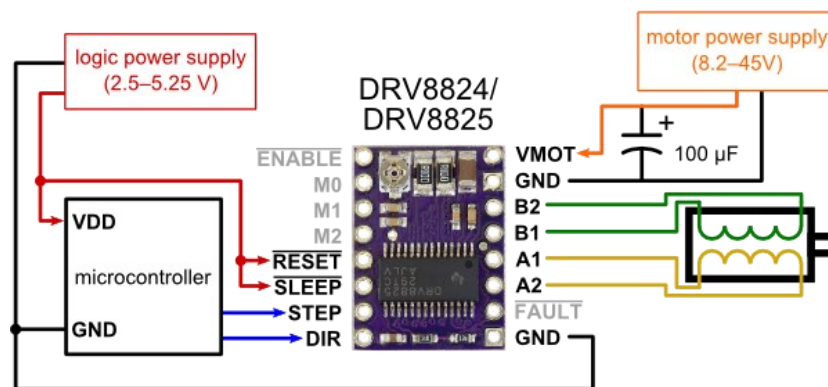
Driver DRV8825, viz. Obrázek 48 níže, je mikro-stepping bipolární ovladač krokového motoru, který nabízí nastavitelné omezení proudu, ochranu proti proudovému přetížení, přehřátí a variaci rozlišení (1 až 1/32 kroku). Pracovní napětí je od 8,2 V do 45 V s maximálním výstupním proudem 1,5 A na fázi, s použitím chladiče je maximální proud 2,2 A. Rozhraní pinout je stejné jako na ovladači A4988, který plní stejnou funkci jako

ovladač DRV8825, avšak s horší kvalitou výstupních signálů (podle zkušeností bývá znát nižší kvalita funkce micro-stepping a výsledný pohyb hřídele krokového motoru je méně plynulý. Mezi další vylepšení oproti ovladači A4988 je vyšší odběrový výkon, který ovladač poskytuje krokovému motoru.



Obrázek 48 – Driver DRV8825 [63]

Nastavení proudu probíhá změnou odboru na potenciometru, který se nachází v dostupném místě na desce ovladače. To nám umožňuje používat napětí vyšší, než je jmenovité napětí krokového motoru a lze tak dosáhnout vyšších krokových rychlostí. Zjednodušené schéma zapojení je na obrázku 49 níže.



Obrázek 49 - Zjednodušené schéma zapojení ovladače DRV8825 do obvodu s mikrokontrolérem a krokovým motorem. [63]

Napájecí piny

Ovladač vyžaduje připojení napájecího napětí motoru 8,2 – 45 V přes VMOT a GND. Tento zdroj by měl mít doporučeně vhodné oddělovací kondenzátory blízko desky a měl by být schopen dodávat očekávaný proud krokového motoru.

Propojovací piny s motorem

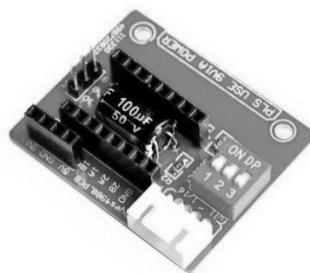
Čtyři, šesti a osmi-vodičové krokové motory mohou být poháněny DRV8825, pokud jsou správně připojeny. Běžně mohou být poháněny čtyř-vodičové krokové motory. Při správném připojení lze připojit i šesti-vodičové nebo osmi-vodičové krokové motory.

Krokování

Krokové motory mají typicky specifikaci velikosti kroku (např. $1,8^\circ$ nebo 200 kroků na otáčku), což platí pro celé kroky. Mikrokrokový ovladač, jako je DRV8825, umožňuje vyšší rozlišení tím, že umožňuje umístění mezikroků, kterých je dosaženo buzením cívek středními úrovněmi proudu. Například řízení motoru ve čtvrt-krokovém režimu poskytne motoru s 200 kroky na otáčku 800 mikrokroků na otáčku při použití čtyř různých úrovní proudu.

7.1.4 A4988 / DRV8825 Adapter

Tento adaptér, viz obrázek 50, umožňuje snadného zapojení krokového motoru k ovladači. Stejně tak je jednoduché zapojit mikrokontrolér jako je Arduino na vstupy DIR, ENABLE a STEP piny.



Obrázek 50 – Adaptér pro driver DRV8825

7.1.5 Li-Po baterie 11,1V

Jedná se o nabíjecí baterii BH Power vhodnou pro RC účely. Kapacita baterie je 2200mAh a reálně vydrží cca 5 hodin provozu. Výstupní napětí je udáváno jako 11,1 V, a to díky sériovém propojení tří článků (3 x 3,7V). Reálně se ale jedná o 12,4V což pro napájení mikropočítače Arduino Nano a krokových motorů není problém. Nabíjecí a vybíjecí proud je udáván jako 25 C neboli 55 A. Konektor k propojení baterie s napájecí deskou je typu T-Dean. Celkové rozměry (25 x 34 x 100 mm) a váha 182 g znamenají, že použití této baterie je velmi vhodné pro tento typ robotu.

Co se bezpečnosti týče tak se jedná o jednu z nejlepších variant chemického složení baterie. Oproti Li-Ion bateriím ji lze při nečekaném vzplanutí uhasit hasicími přístroji nebo zamezením kyslíku.



Obrázek 51 – Li-Po baterie BH Power 11,1V 3 S [64]

7.1.6 Nabíjení baterie

Nabíjení baterie je zajištěno adekvátní nabíječkou baterií s balancerem G.T. Power A3. Je schopna nabíjet jak jedno-čládkové, dvoučládkové a trojčládkové (3 S) Li-Po baterie. Obsahuje vestavěný zdroj pro 230 V AC. Signalizace nabití je červená (nabíjení) nebo zelená (nabito). Propojení s baterií je provedeno přes servisní konektor baterie JST-XH.



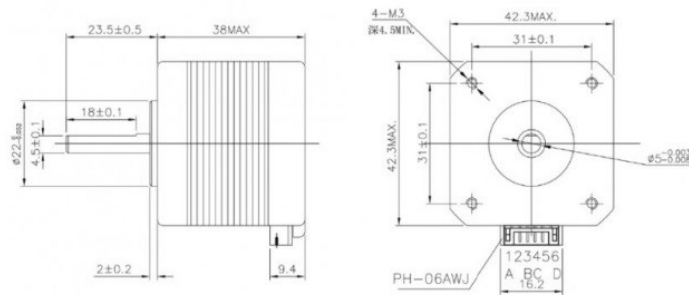
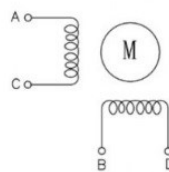
Obrázek 52 – Nabíječka G.T. Power A3 [64]

7.1.7 Krokový motor NEMA 17

Krokový motor NEMA 17 17HS4401 (0,4 Nm) je bipolární krokový motor běžně používaný u malých NC/CNC strojů a 3D tiskáren. Z důvodu snadného řízení a minulých zkušenostech byl zvolen právě tento motor jako aktuátor pro dvoukolový balanční robot.



Obrázek 53 – Krokový motor NEMA 17 [66]

Dimension(mm):**Electrical schematic:**

Obrázek 54 – Rozměry a schéma zapojení motoru NEMA 17 [66]

Parametry krokového motoru: bipolární typ (4-drátové zapojení), úhel 1 kroku: 1.8° , krouticí moment: 40 N.cm, počet kroků na jednu otáčku: 200 kroků, určen pro napětí 3,6 V při odběru proudu 1,5 A, rozměrově pak 42 x 42x 38 mm, přičemž jak je vidět na obrázku 54, rozteč děr je 31 mm. Proto je důležité myslet na správné uchycení motoru k šasi. [66]

7.1.8 Kompletní kola

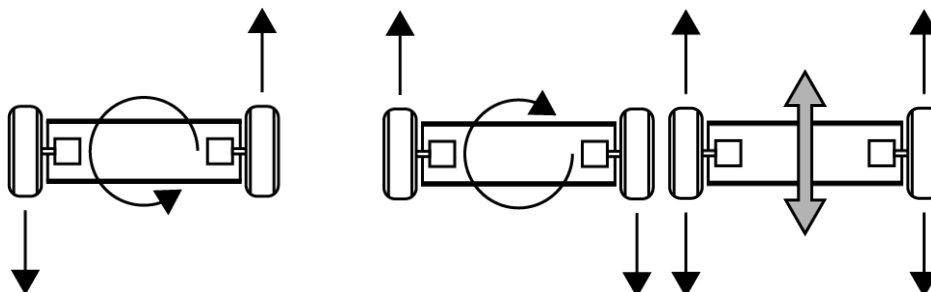
Jako vhodný typ kol pro uvedené účely byl vybrán: ADDICTIVE V2 BUGGY C3 (MEDIUM). Přílnavost pneumatiky je vzhledem k váze robota (2,6 kg) velmi dobrá a na běžném povrchu tak nedojde k prokluzu. Použitý krokový motor nemá tak velký točivý moment, aby se kolo protočilo, proto raději ztratí synchronizaci pulzů řízení. K plastovému ráfku kola byl vytvořen ocelový spoj mezi ráfkem a hřídelí krokového motoru. Zajištění hřídele je vyřešeno přitažením červíkovým šroubem M3, který sevře díl k hřídeli krokového motoru. Bez tohoto dílu není možné jinak spojit hřídel krokového motoru s kolem.



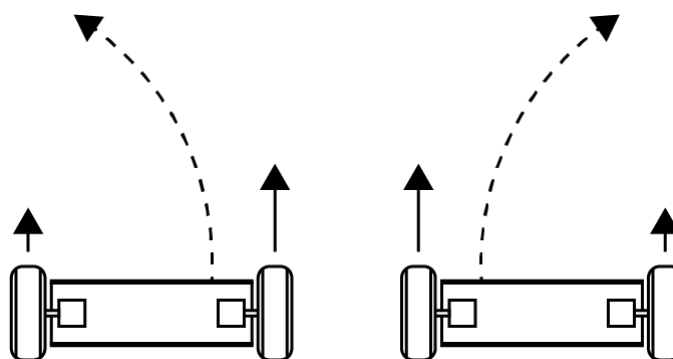
Obrázek 55 – Buggy kolo [65]

7.1.9 Princip řízení pohybu robota

Robot má diferenční podvozek, tzn. že se může otáčet na místě, zatáčet a zároveň se pohybovat dopředu / dozadu jako je znázorněno na obrázcích níže.



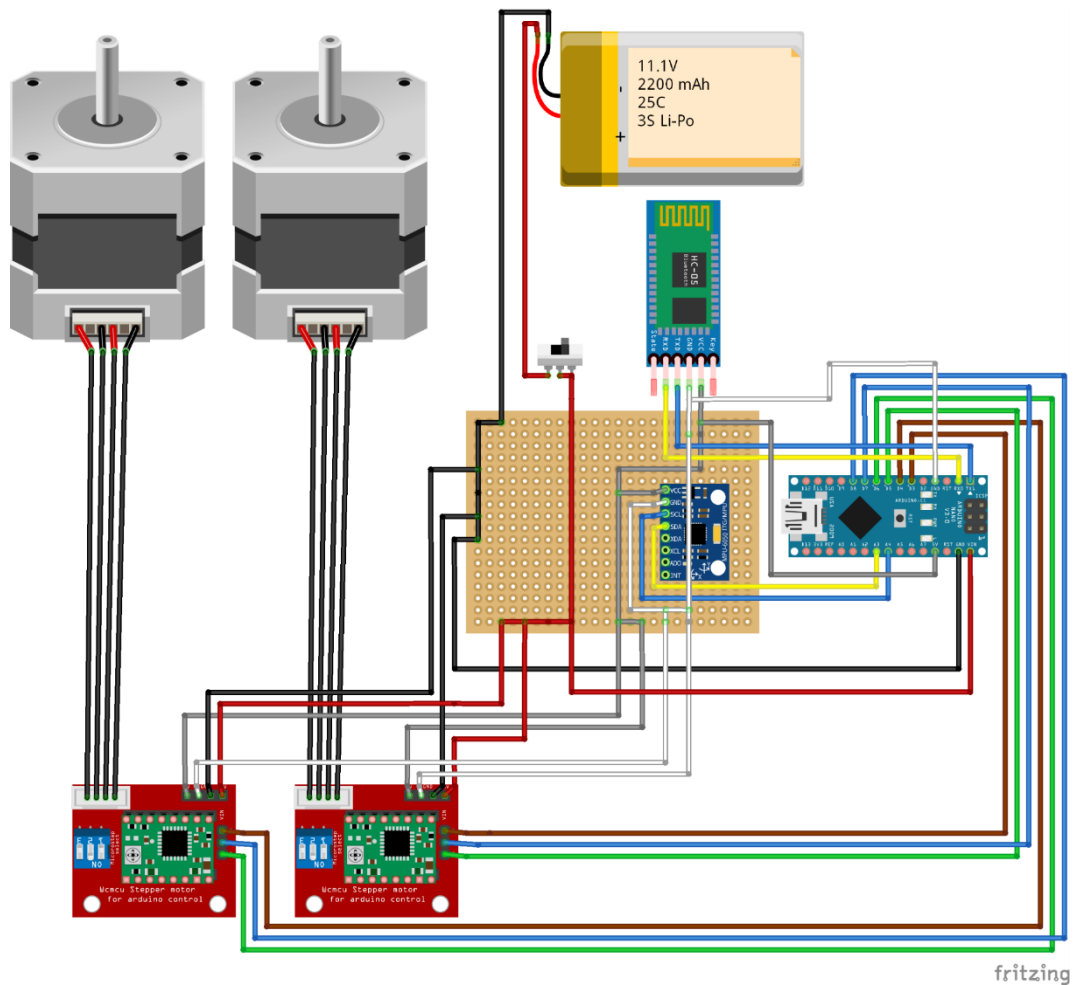
Obrázek 56 – princip otáčení doprava/doleva a pohyb dopředu/dozadu



Obrázek 57 – princip pohybu dopředu se zatáčením

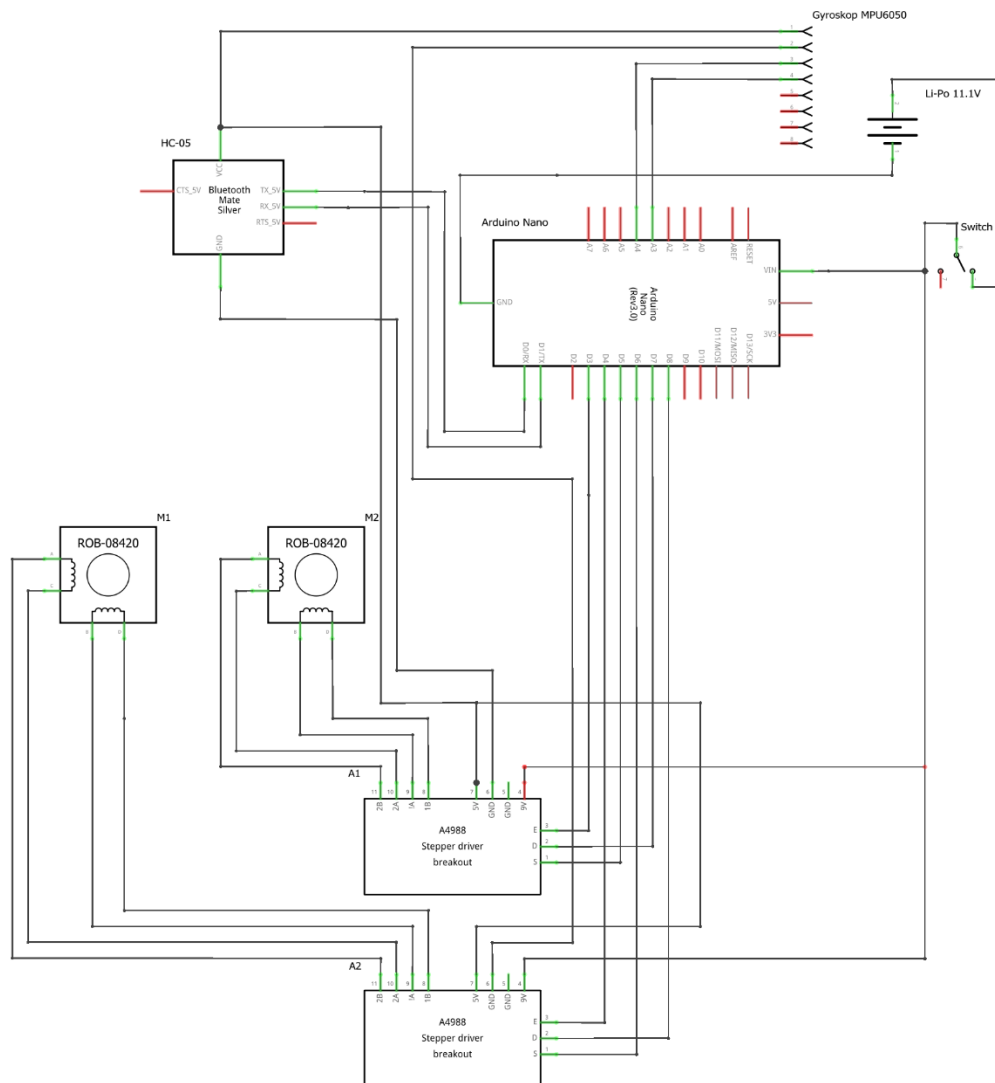
7.2 Schéma zapojení

Následující schéma zapojení bylo vytvořeno v placeném programu Fritzing 1.0.2. Toho se dá dále využít k návrhu PCB desky a zjednodušené kompletace elektronických komponent.



Obrázek 58 – Schéma zapojení komponent robota v Breadboard zobrazení

Tento typ schématu zobrazuje reálnou vizualizaci jednotlivých komponent jako je Arduino Nano, Gyroskop MPU6050, Bluetooth přijímač HC-05, krokové motory apod. Důležitá je taktéž možnost vytvořit si obvodovou desku, jejíž rozměry jsou dány počtem děr. V tomto případě se podle programu Fritzing jedná o ty „Perfboard“, kde jsou jednotlivé díry desky izolovány od ostatních. V realitě je vytvořeno přemostění a na desku jsou připojeny svorkovnice, které dále distribuují napájení z baterie do obvodu.



Obrázek 59 – Schéma zapojení komponent robota

Jak lze vypožorovat ze schématu výše, k řízení motorů jsou využity 2 drivery DRV8825, jenž jsou umístěny v adaptérech pro DRV8825 / A4988. Výstup těchto adaptérů je přímo zapojen do krokových motorů, a to způsobem pro řízení obou cívek (proto bipolární krokový motor). Adaptéry usnadňují nastavení krokování od jedné poloviny po jednu šestnáctinu kroku. Jsou napájeny přímo ze zdroje baterie (11.1 V DC) a pro logickou část jsou napájeny z desky Arduino (5V DC). Funkce Step, Direction a Enable je pomocí tří drátů vedena na digitální piny Arduino (8, 6, 4) a pro druhý motor piny (7, 5, 3).

Třiosý gyroskop MPU6050 je napájen pomocí desky Arduino (5 V DC) a to způsobem zapojení přes rozšiřující desku (perfboard), ve které jsou vytvořeny cesty s tímto napájením. piny SCL a SDA jsou propojeny s piny Arduino (A3, A4) a jedná se tak o analogový (v tomto případě PWM) vstup.

Modul Bluetooth HC-05 je také napájen 5 V DC přes rozšiřující desku a jeho signálové piny RXD a TXD jsou propojeny s deskou Arduino a to na pinech digitálních vstupů (1, 2). V tomto případě se zároveň jedná o piny (RXD, TXD), které jsou na tuto funkčnost předem nastaveny.

Zdrojem elektrické energie je Lithium-Polymerová baterie s kapacitou 2200 mAh připojená přes přepínač, kterým se robot zapíná. Deska Arduino Nano je napájena touto baterií (11,1V DC) a to na pin Vin. Uzemnění z baterie je připojeno přes rozšiřující desku k pinu na Arduino (GND).

7.3 3D návrh

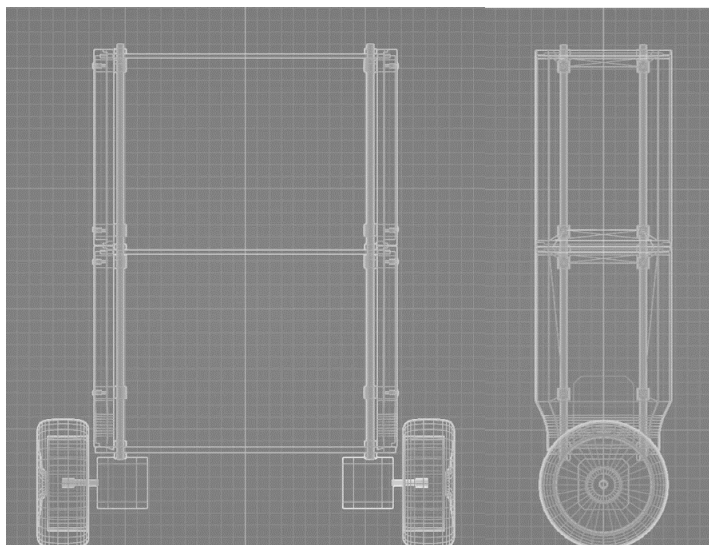
Robot je tedy navržen tak, aby bylo možné použít diferenční typ podvozku s dvěma krokovými motory a k nim připojenými Buggy koly. Další požadavky na konstrukci robota jsou následující:

- dovnitř robota je třeba vhodně umístit veškerou elektroniku, a to včetně baterie, aby se zabránilo vlivu prachu a vlhkosti na součástky. Je tedy potřeba robota řádně zakrytovat.
- aby bylo možné umístění elektroniky a baterie, je nutné složit robota z několika (ze tří) pater. V každém patře bude umístěno několik komponent (první patro – baterie, druhé patro – elektronika s gyroskopem, třetí patro – prostor pro anténu přijímače).

První patro (skelet robota) se skládá z 5 mm tlustého hliníkového plechu, který má vyvrtané díry pro uchycení krokových motorů a díry pro protažení závitových tyčí. Závitové tyče budou čtyři a poslouží jako hlavní šasi robota, na které budou postupně nasunuty jednotlivá patra a zabezpečené maticemi. Mezi jednotlivá patra přijde nasunout díly s ne příliš známým názvem „Variofix“. Funkce dílu je taková, že s ním lze libovolně posouvat po tyči nahoru a dolů a to tak, dokud se nenajde vhodná pozice, do které se šrouby připevní vytištěné kryty.

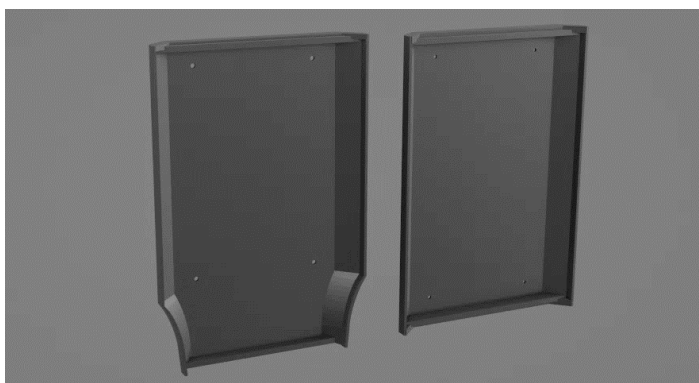
Kryty budou jako 3D model připraveny k tisku a následně celkem šestnácti šrouby připevněny k šasi robotu.

Další kryty budou umístěny zepředu a zezadu, zároveň představují obrovskou zakrytou plochu, skrze kterou půjdou vidět vnitřní komponenty a karoserie robota. Kryty jsou totiž vyrobeny z průhledného polykarbonátu o tloušťce 2mm.



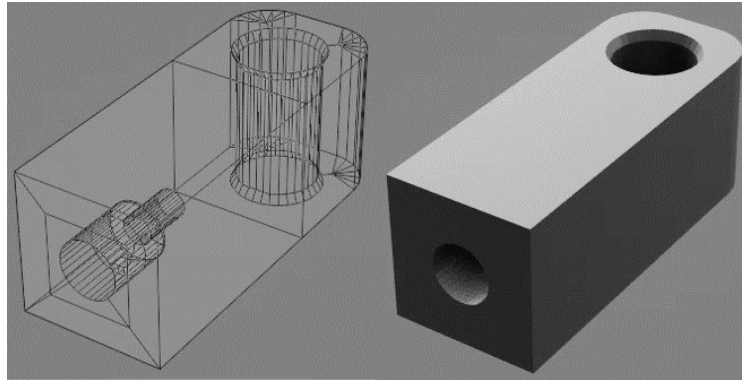
Obrázek 60 – Narys a bokorys 3D návrhu robota

3D návrhy bočních krytů budou vytisknuty z černého PLA filamentu. Horní i dolní kryty vychází z jednoduchého návrhu, tedy rovné plochy. Plocha má zkosené hrany, které zvyšují odolnost vůči pádu robota a vytváří kolejnicový prostor pro uložení předního a zadního krytu. Zakončení nahoře i dole je namodelováno tak, aby mezi něj bylo možné zapustit jednotlivá patra robota. Spodní kryt se od horního liší v tom, že v oblasti napojení ke skeletu robota dochází k zúžení a to tak, aby byl kryt posazen přesně na hraně tohoto skeletu. Každý kryt obsahuje díry pro M3 šroubky, díky nimž se tyto kryty připevní k šasi robota.



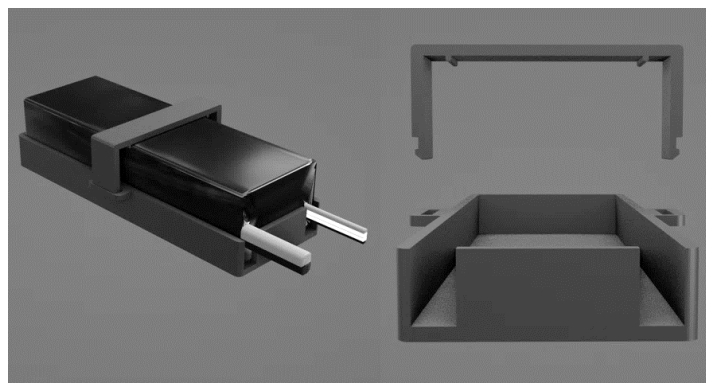
Obrázek 61 – Postranní krytování – 3D návrh

Variofix je díl pro spojení bočních krytů s šasi robota (podrobněji k jednotlivým párům závitových tyčí). Do menší díry se umístí a přilepí vteřinovým lepidlem kovový závit, do kterého pak lze našroubovat M3 šroubek, který tak přichytí boční kryt.



Obrázek 62 – Variofix – 3D návrh

Držák baterie o rozměrech vhodných pro uložení baterie je navržen tak, že se zespodu přilepí oboustrannou páskou k šasi robotu a seshora do něj lze zacvaknout vytisknutelnou zacvakávací úchytku, která bude držet baterii v pozici. Tu lze v případě nedostatečného sevření nahradit páskem suchého zipu.



Obrázek 63 – Držák baterie - 3D návrh

Výsledná představa o designu robota (viz obrázek 64 dále) je pak následující:

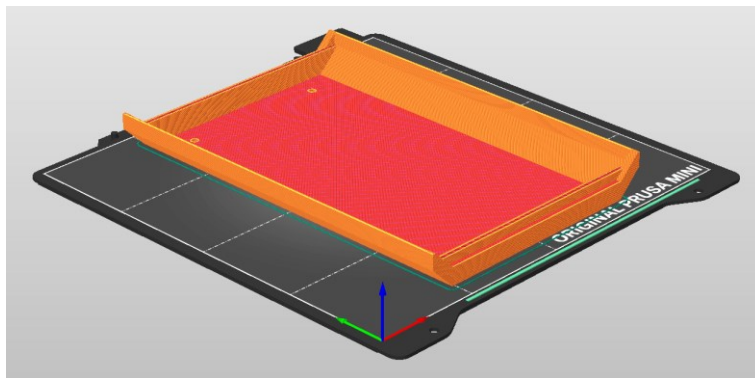
- 3D návrh obsahuje vizualizaci šasi (jednotlivá patra a závitové tyče) a skelet robota.
- Ke skeletu robota jsou přes úhelníky umístěny krokové motory, na kterých jsou připojeny Buggy kola.
- K šasi robotu jsou přichyceny boční kryty.



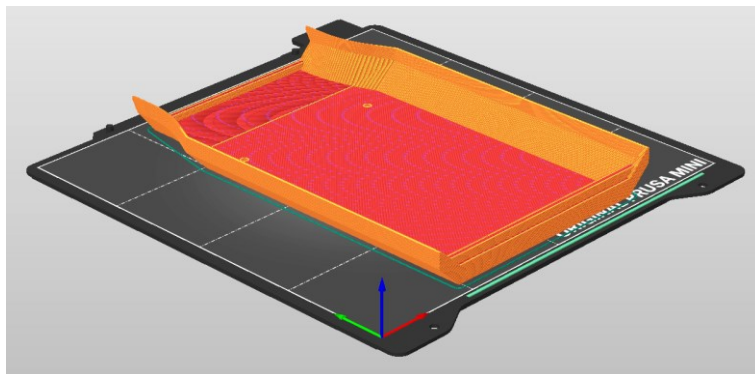
Obrázek 64 – Výsledný design robota – 3D návrh

7.4 3D tisk

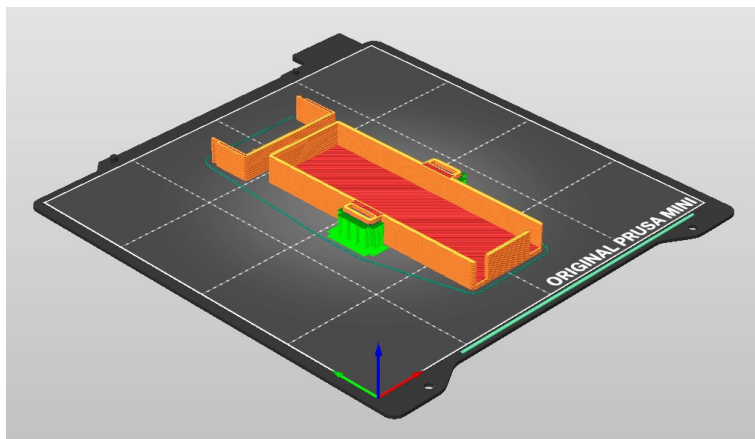
3D tisk dílů je založen na principu aditivní výroby, vrstvy jsou tedy postupně nanášeny na sebe, dokud nevznikne vytištěný model. Pro přípravu k 3D tisku je nejprve potřeba namodelovaný model exportovat do formátu STL. Tento soubor se importuje do programu pro „slicování“, kde dochází ke generaci kódu instrukcí pro NC / CNC stroje (gcode). V tomto případě byl použit program Prusa Slicer, který je volně dostupný a podporuje mnoho 3D tiskáren. Použitou tiskárnou byla Prusa Mini+.



Obrázek 65 – 3D „slicování“ krytování horní část



Obrázek 66 – 3D „slicování“ krytování spodní část



Obrázek 67 – 3D „slicování“ držáku baterie

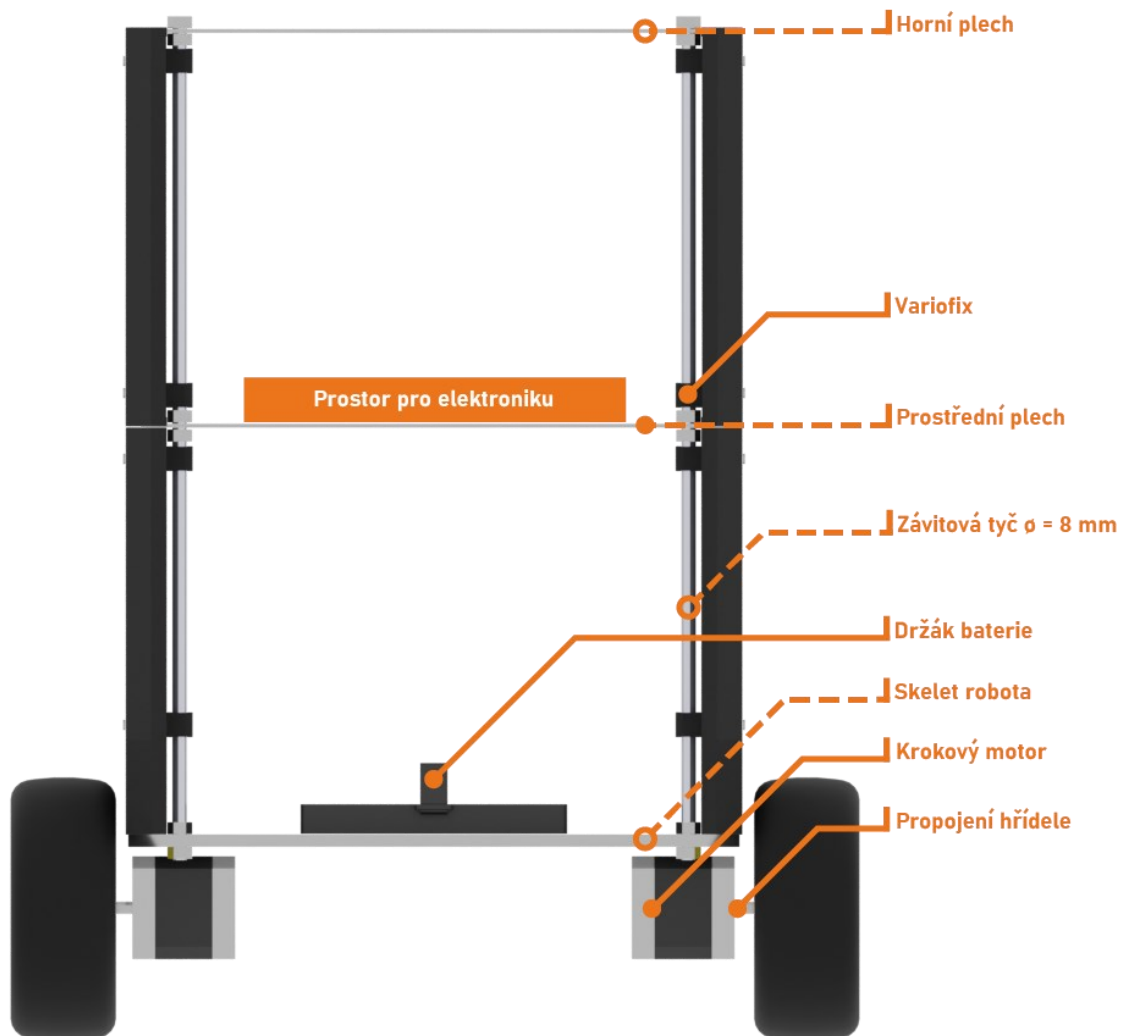


Obrázek 68 – Průběh 3D tisku spodního krytu a držáku baterie

7.5 Popis vlastního sestavení

K popisu umístění jednotlivých komponent bylo potřeba vytvořit 3D model robota, který rozměrově sedí fyzickým rozměrům sestaveného robota. Tato skutečnost správných rozměrů je obzvlášť důležitá při návrhu dílů, které budou později aditivní metodou vytvořeny – jedná se o plastové kryty, variofixy (propojky) k upevnění krytů a držáku baterie.

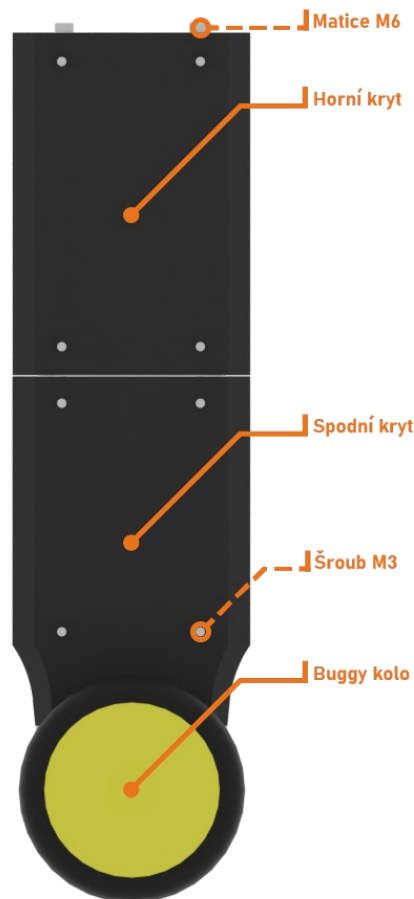
Na prostřední plech je umístěna elektronika a to tak, že pomocí distančních podložek jsou jednotlivé desky připevněny k plechu. Všechny čtyři závitové tyče jsou následně protaženy otvory v prostředním plechu a upevněny maticemi. Na každou stranu tyče jsou nasunuty variofixy a to tak, aby se k nim dal následně přišroubovat horní / spodní vytištěný kryt. Z horní části je pak upevněn tenký horní plech. Celá konstrukce je usazena a upevněna do skeletu robota, který je tvořen tlustým a pevným plechem z hliníku.



Obrázek 69 – Přední pohled a popis konstrukce robota

Skelet se skládá ze samotného tlustého hliníkového plechu pro otvory pro šasi robota a úhelníků sloužící k upevnění krokových motorů. Ke skeletu je dále přilepen oboustrannou páskou držák baterie.

Variofix je díl navržen tak, aby se dal nasunout na závitovou tyč a skrze něj pak připevnit vytištěný boční kryt. Toto připevnění je uskutečněno tak, že ve variofixu je zapuštěný kovový závit, přes který je možno kryt upevnit šroubem M3.



Obrázek 70 – Boční pohled a popis konstrukce robota

K upevnění Buggy kola s hřídelí motoru byla na obráběcím stroji vytvořena propojka s otvorem pro hřídel na jednom konci a s šestihranným tvarem na konci druhém. Upevnění dílu k hřídeli motoru je realizováno „červíkem“ a upevnění ke kolu je realizováno proti-šroubem, mezi který je kolo uchyceno. Na finálně sestaveného robota jsou seshora nasunuty průhledné kryty z plexiskla. To má za následek kompletního uzavření robota a je tak více odolný proti prachu a vlhku.

Základní parametry sestaveného robota jsou přehledně uvedeny v tabulce 3 níže.

Tabulka 3 – Rozměry a hmotnosti prvků robota

	rozměr [mm]	hmotnost [g]	počet [ks]
horní plát	240 x 90 x 2	108	1
prostřední plát	240 x 90 x 2	200	-
krytování	-	772	-
střed celkem	-	972	-
skeletní plát	250 x 90 x 5	243	1
skelet celkem	-	1343	-
závitová tyč M5	5 x 5 x 350	40	4
kolo	110 x 110 x 45	150	2
krokový motor	-	400	2
baterie	105 x 35 x 25	183	1
držák baterie	-	50	1
celková hmotnost robota		= 2675	
celkový maximální rozměr	= 110 x 350 x 420		

Těžiště robota se pak nachází v úrovni prvních šroubů na bočním krytování, tedy 80 mm od osy kol.

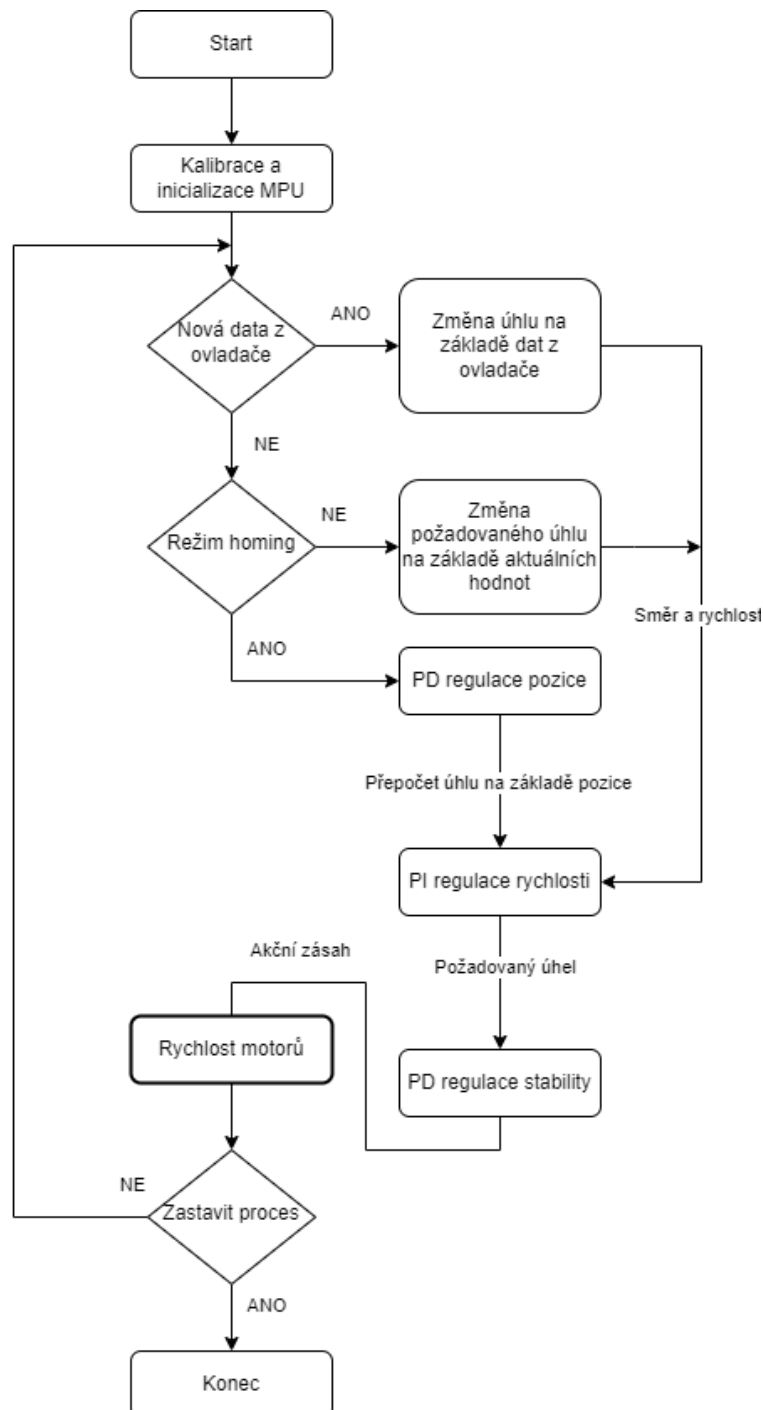


Obrázek 71 – Výsledný vzhled sestaveného robota

7.6 Programová realizace

V této části bude vysvětlen program robota, který je implementován v mikropočítači Arduino a také budou popsány a vysvětleny funkce, které řídí regulaci pozice, rychlosti a stability celého robota.

Rámcový vývojový digram procesu řízení navrženého a realizovaného 2-kolového robota je znázorněn na obrázku 72 níže.



Obrázek 72 – Vývojový diagram procesu řízení robota

Po zapnutí mikropočítače dojde k jeho inicializaci, nastavení proměnných a kalibraci gyroskopu MPU6050. V době kalibrace, která trvá 10 s, se nesmí robot pohnout. Dokončení kalibrace je indikováno krátkou oscilací obou motorů. Robot pak následovně drží vzpřímenou polohu a čeká na příjem nových dat. Aby bylo možno robota dálkově ovládat, je třeba se k němu připojit pomocí vyvinuté mobilní aplikace. V ní se vybere zařízení JDY-33 a robot může přijímat nové data (např. změnou polohy joysticku nebo pomocí přepínačů). Je-li robot v režimu „homing“ (tzv. vrácení do původní polohy a striktnější držení vzpřímené polohy), tak se robot pouze snaží udržet balanc a je připraven i na reakci na externí zásah (např. vliv posunutí robota rukou). Je-li robot v režimu „ovládání“ (není „homing“), je schopen reagovat na dálkové ovládání joystickem přes mobilní aplikaci pohybem vpřed/vzad/zatáčení. V tomto případě se v programu přeskakuje blok PD regulátoru pozice (robot nepočítá ujetou vzdálenost jako regulační odchylku) a robot má plynulejší chování. Následuje výpočet v části PI regulátoru rychlosti a PD regulátoru stability. Tento akční zásah pomocí funkcí generuje pulzy vedoucí do patřičných driverů DRV8825 a ty pak vytváří napětí na cívkách v bipolárním krokovém motoru.

Uvedená architektura řízení byla použita ve dříve uvedené práci B-Robot Evo 2 [3] a jeho vlastní implementace v softwarové podobě nebyla tak složitá.

Ke generaci impulzů se využívá přerušení (funkce *ISR()*) pro ovládání obou motorů v „jednom okamžiku“ (viz. Příloha Arduino kódu).

7.6.1 Realizace řízení

Dle vývojového diagramu je patrné, že pro řízení se využívají 3 různé regulátory a to PD pro řízení pozice, PI pro řízení rychlosti a PD pro řízení stability robota.

Definice funkce PD-regulátoru pro regulaci pozice:

```
P = constrain(Kpp * float(setPointPos - actualPos), -115, 115);  
output = P + Kdp * float(speedM);
```

- na základě vstupu z ovladače (od uživatele přes mobilní zařízení) reguluje zrychlení motorů, které je vstupem do PI regulátoru rychlosti.

Definice funkce PI-regulátoru pro regulaci rychlosti:

```
error = setPoint - input;  
PID_errorSum += constrain(error, -ITERM_MAX_ERROR, ITERM_MAX_ERROR);  
PID_errorSum = constrain(PID_errorSum, -ITERM_MAX, ITERM_MAX);  
output = Kp * error + Ki * PID_errorSum * DT;
```

- vlivem změny požadovaného úhlu nastavuje výstup, který je vstupem PD regulátoru stability a to ve formě žádaného bodu, do kterého se chce robot dostat (setPoint).

Definice funkce PD-regulátoru pro vlastní stabilizaci robota:

```
float Kd_setPoint = constrain((setPoint - setPointOld), -8, 8);  
output = Kp * error + (Kd * Kd_setPoint - Kd * (input - PID_errorOld)) / DT;
```

- slouží pro řízení akční veličiny, tj. povelu řízení motorů v závislosti na požadovaném a měřeném úhlu robota.

V této práci byly parametry regulátoru nastaveny experimentálně, kdy bylo potřeba nastavit vhodné hodnoty regulátoru pro stabilitu a postupně je doladovat tak, dokud nebyla stabilizace robota co nejstriktnější. Při tomto postupném, experimentálním ladění regulátorů bylo použito základních poznatků o vlivu jednotlivých složek P, I, D regulátoru na průběh regulačního pochodu – viz kapitola 6.3 výše.

Při použití PD regulátoru pozice (nastaven na: $Kp = 1,92$; $Kd = 1,28$) se vypočítává proměnná *throttle* (pohyb vpřed a vzad), jenž je vstupem PI regulátoru rychlosti.

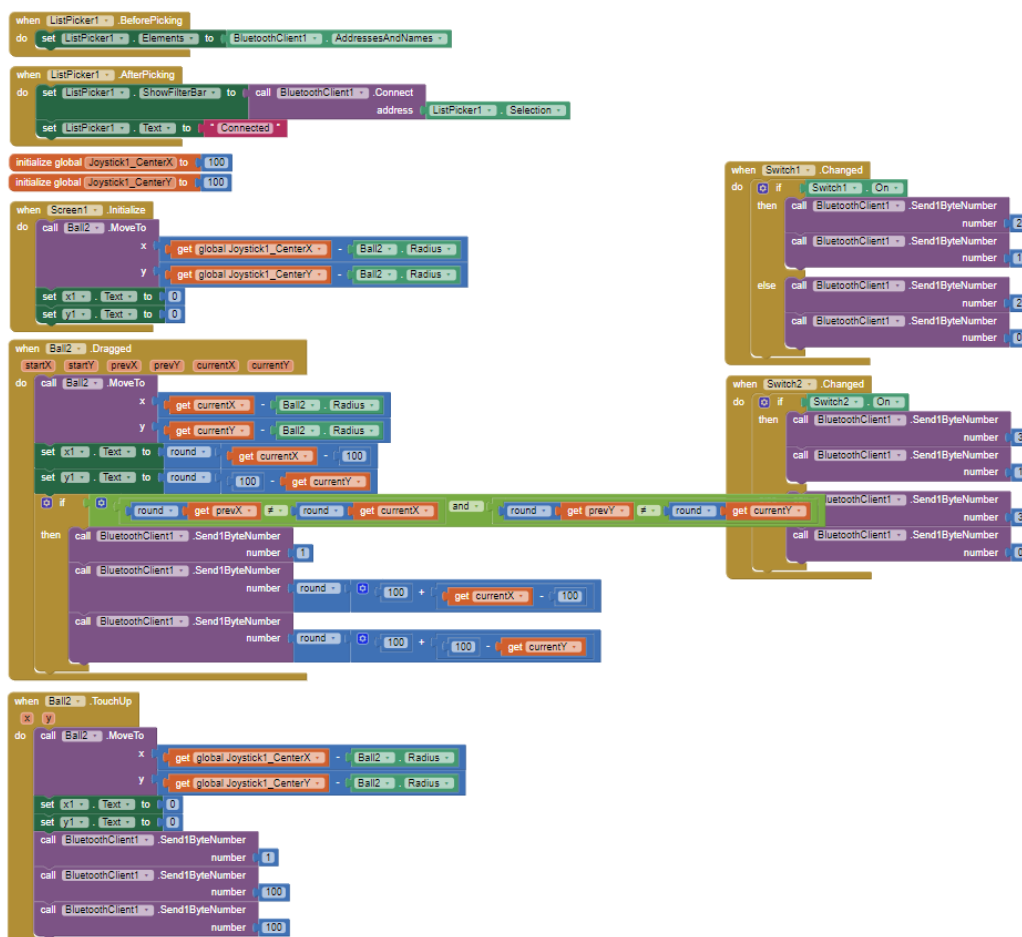
Výstupem PI regulátoru rychlosti (nastaven na: $Kp = 0,08$; $Ki = 0,06$) je nastavování proměnné cílový úhel, jenž je vstupem do PD regulátoru stability (nastaven na: $Kp = 0,48$; $Kd = 0,08$)

7.6.2 Komunikace s mobilním zařízením

Komunikace probíhá skrze Bluetooth driver HC-05, který operuje na verzi Bluetooth 4.0. Implementace v kódu je řešena systémovým přerušením. Toto přerušení slouží k tomu, aby se paralelně vykonávala část programu, která je zodpovědná za přijímání dat z Bluetooth driveru a posílá je k zpracování. Při nastavení baud-rate (počet změn stavu signálu za 1 sekundu) = 115200 bit/s dojde ke správné konfiguraci sériového adaptéru a tím získáme správná data. Tato data jsou ve tvaru OSA+HODNOTA a je tak snadné je roztřídit. Ve vývojovém diagramu výše je uvedeno, kde je tato komunikace zařazena.

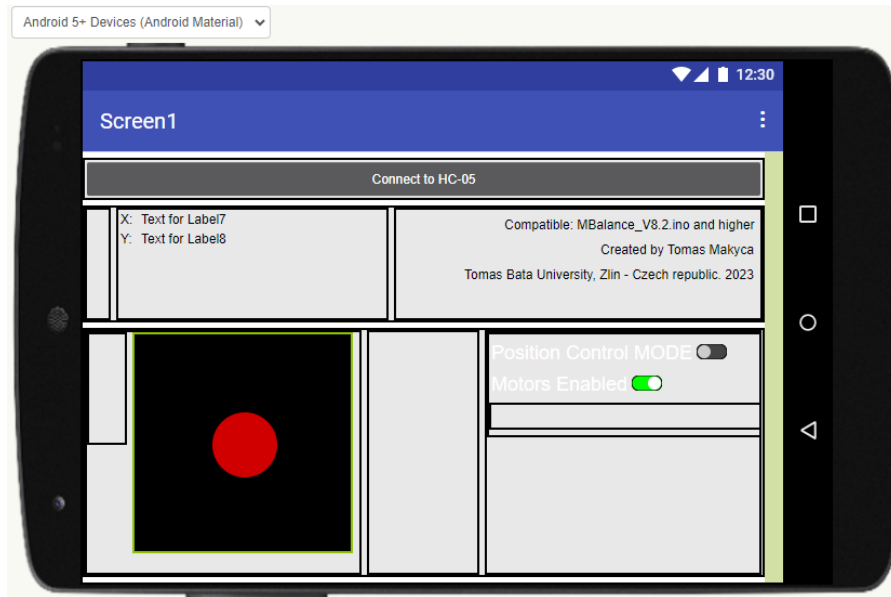
7.6.3 Mobilní aplikace

Aplikace je vyvinuta v online vývojovém prostředí Mit-app-inventor2 – to umožňuje snadný a programátorsky intuitivní návrh aplikace s mnoha zabudovanými funkcemi [76].



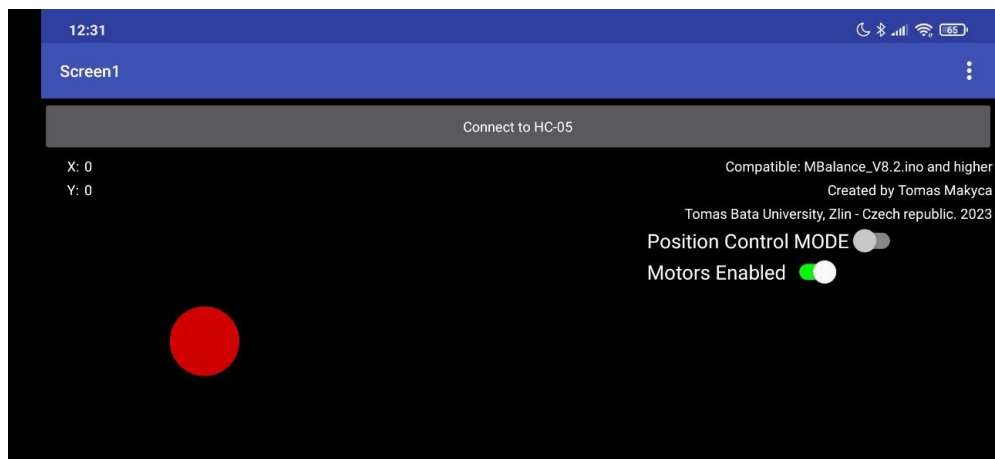
Obrázek 73 – BACKEND mobilní aplikace použité k ovládání robota

Část vytvořeného programu se zaměřuje na ovládání robota joystickem (na obrazovce mobil. zařízení) a další část se pak zaměřuje na posílání dat přes Bluetooth komunikaci (viz. obrázek 73). Nejprve je vytvořena možnost výběru přijímače, se kterým bude zařízení komunikovat. Po tomto spárování se začnou posílat data a to vždy, když dojde ke změně polohy joysticku, nebo při změně stavů na přepínačích.



Obrázek 74 – Návrh designu mobilní aplikace

Joystick pro ovládání robota se nachází vlevo dole, přepínače se nachází na pravé straně (viz. obrázek 74). Jejich funkcí je přepínat stav PCM (Position Control MODE) – ON = ovládání robota zapnuto, OFF = ovládání robota vypnuto. Druhým přepínačem lze deaktivovat motory.



Obrázek 75 – Screenshot mobilní aplikace na mobilním telefonu

Na obrázku 75 je vidět skutečné zobrazení vytvořené mobilní aplikace v mobilním telefonu s OS Android, konkrétně Xiaomi Redmi Note 7 s OS Android 10. Zobrazeny jsou aktuální souřadnice joysticku X , Y a stručný popis, který se vztahuje k této práci.

8 TYPOVÉ ÚLOHY A VYBRANÉ EXPERIMENTY

V této kapitole je zahrnuta demonstrace chování robota při plnění různých typových úloh, určených k vlastnímu otestování robota a získání informací o kvalitě regulace robota.

Odkaz na videa z testování robota a jeho ukázky

Jednotlivé úlohy se přes uvedené QR-kódy odkazují na videa, která zobrazují kombinaci jednotlivých experimentů a úloh jako je windup manévr, stabilizace a reakce na externí zásah (popostrčení rukou).



Odkaz na videa z testování v režimu dálkového ovládání

Dále je zaznamenána reakce na externí zásah v režimu dálkového ovládání, dálkové ovládání vpřed a vzad, otáčení na místě a přepínání mezi oběma režimy.



Před samotným měřením ujeté vzdálenosti je nejprve potřeba spočítat velikost otočení kol v důsledku posílaných signálů z mikropočítače Arduino.

Výpočet ujeté vzdálenosti

Otočení hřídele na 1 krok (udává výrobce krokového motoru):

$$\frac{360}{200} = 1,8 \left[\frac{deg}{step} \right]$$

Počet kroků na 1 otáčku (nastavené mikrokrokování $\frac{1}{16}$):

$$200 * 16 = 3200 \left[\frac{microsteps}{rotation} \right]$$

Obvod kola:

$$o = d * \pi = 110 * \pi = 345 [mm]$$

A konečně vzdálenost ujetá při 1 kroku (pulzu):

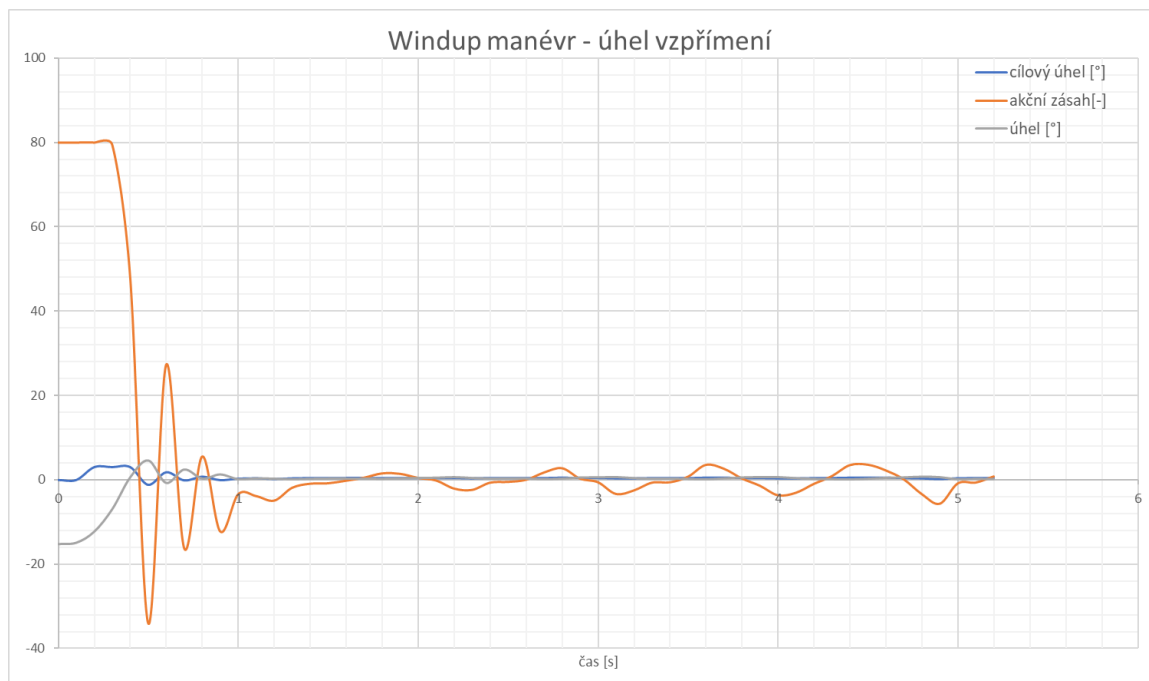
$$\frac{345}{3200} = 0,11 [mm/krok]$$

8.1 Úloha stabilizace

V této části budou testovány jednotlivé úlohy, které demonstrují stabilitu robota a to včetně jejího prvotního dosažení (tzv. windup manévr).

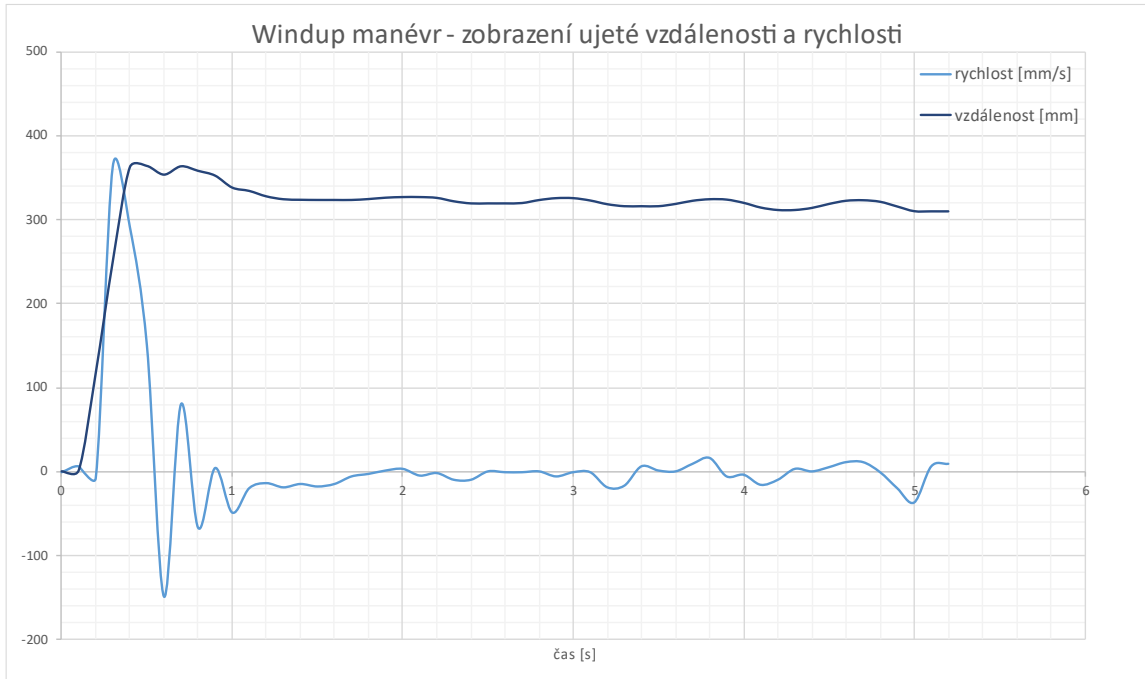
8.1.1 Windup manévr

Windup manévr neboli vzpřímení je akce robota, při které se musí dostat (z nějaké počáteční, nikoliv vzpřímené pozice) do koncové vzpřímené polohy a dále se v ní udržet vlivem vhodného algoritmu řízení.



Obrázek 76 – Průběh wind-up manévru: úhel a akční zásah

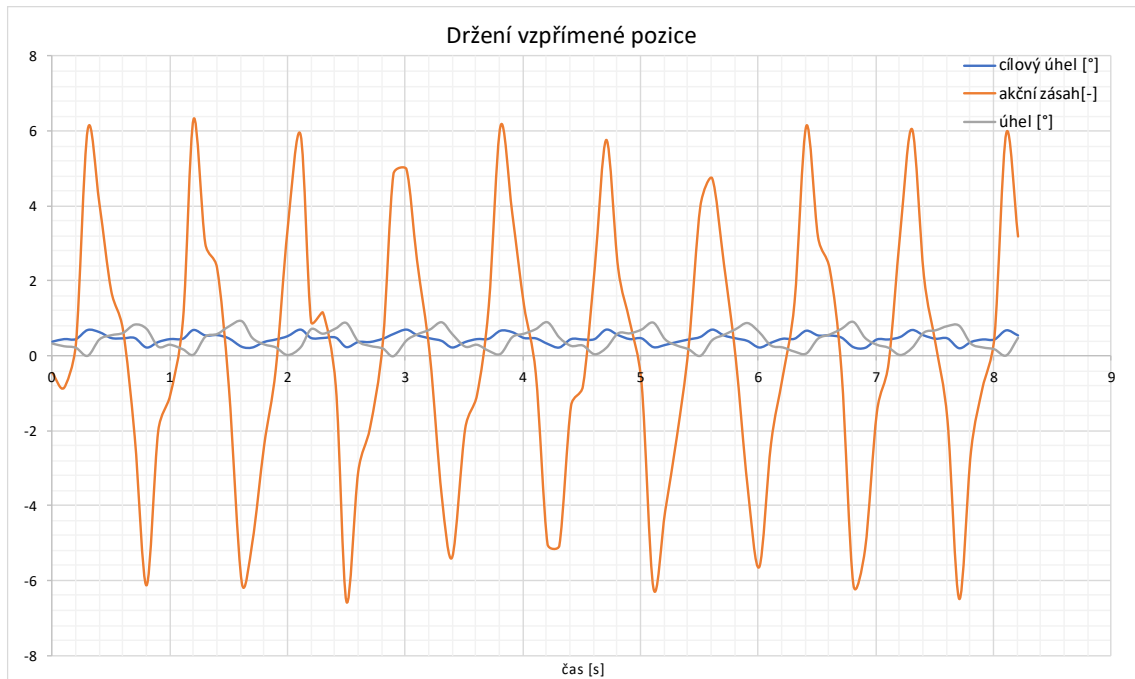
Cílový úhel se mění vlivem PI regulátoru adaptivně tak, aby akční zásah byl co nejrychlejší. Regulátoru se daří stabilizovat robota. Windup manévr, jak jde vidět z grafu níže, není dosažen z vodorovné polohy robota, ale pouze z jeho prvotního naklonění -15° .



Obrázek 77 – Průběh wind-up manévřu: pozice a rychlost.

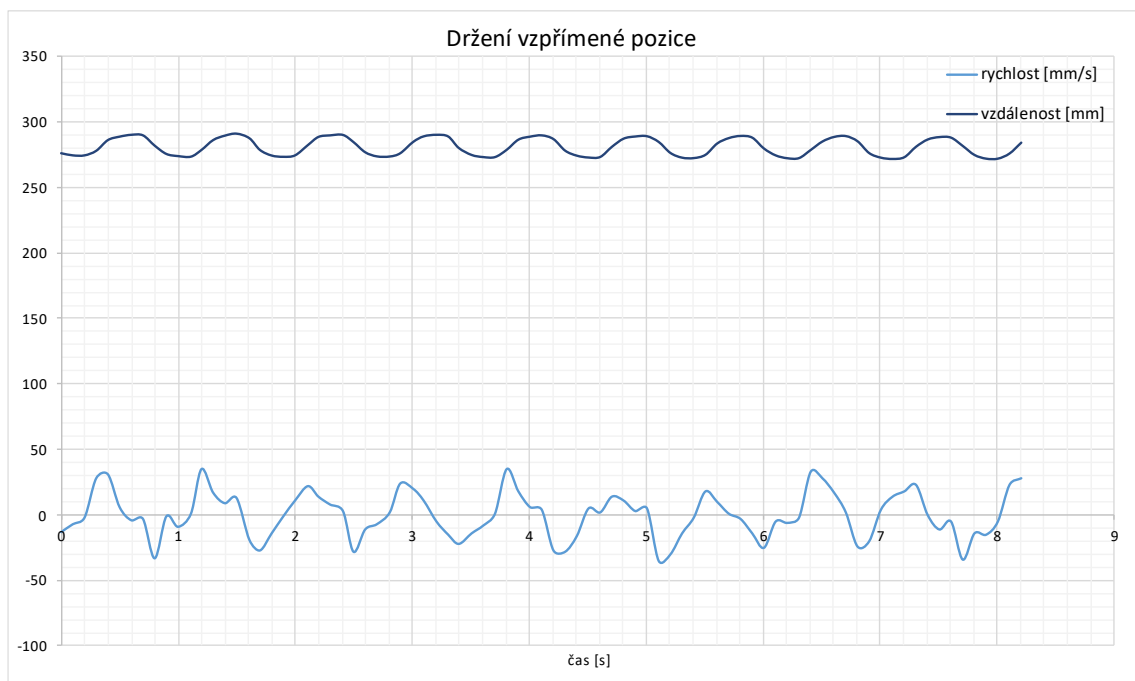
Robot se rychle dostává do vzpřimené polohy a ujede přitom cca 450 mm dráhy. Rychlost je přitom blízko maximu. Póly krokových motorů drží synchronizaci s požadovaným otáčením a nedochází tak ke ztrátě pohonu. Akční zásah nabývá maxima a jakmile je robot v poloze ± 15 stupňů (bezpečnostní limit pro aktivaci motorů v adekvátní poloze), motory se zapnou a robot se stabilizuje. Limit 15° je nastaven z bezpečnostního hlediska, aby se robot při pádu nebo zvednutí operátorem okamžitě zastavil.

8.1.2 Držení pozice – oscilace kolem vzpřímené polohy



Obrázek 78 – Oscilace robota kolem vzpřímené polohy: úhel a akční zásah

Při držení pozice generuje regulátor akční zásah, který má vliv na pohyb robota dopředu a dozadu a tím dochází k jeho vyvažování. To je názorně vidět na dalším grafu:



Obrázek 79 – Oscilaci robota kolem vzpřímené polohy: pozice a rychlost

Uvedená oscilace je způsobena konstrukčním uspořádáním robota – jeho přirozenou nestabilitou a má na ni samozřejmě také vliv aktuální nastavení daných regulátorů. Robot se

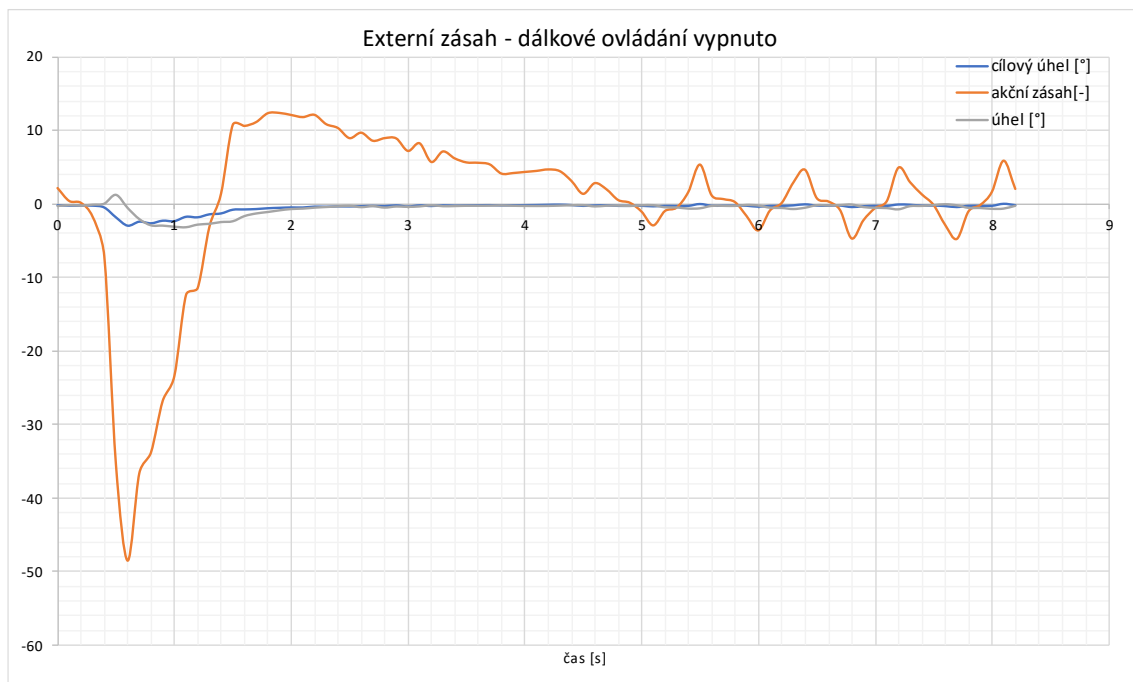
při tomto experimentu pohybuje v rozmezí vzdálenosti cca 15 mm a vyčtením z dat lze změřit přibližnou periodu oscilace kolem vzpřímené polohy $T = 0,85$ s.

8.2 Úloha reakce na externí zásah

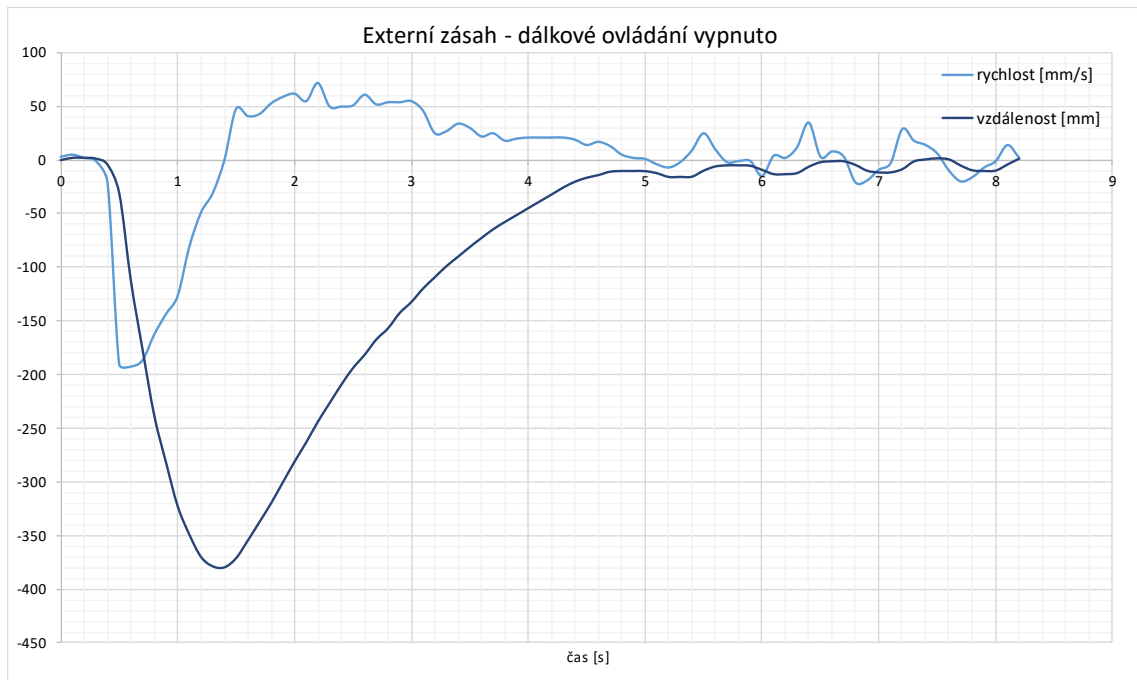
Reakcí na externí zásah se v tomto případě rozumí popostrčení rukou do robota a to takovou silou, že se sám zvládne vrátit do stabilní polohy. K tomu může dojít dvěma způsoby:

- robot je v režimu držení polohy (dálkové ovládání vypnuto) a vrací se vždy do původní polohy, ze které byl poslán;
- robot je v režimu dálkového ovládání a po stabilizaci zůstává tam, kam až dojel.

Režim dálkového ovládání: vypnuto



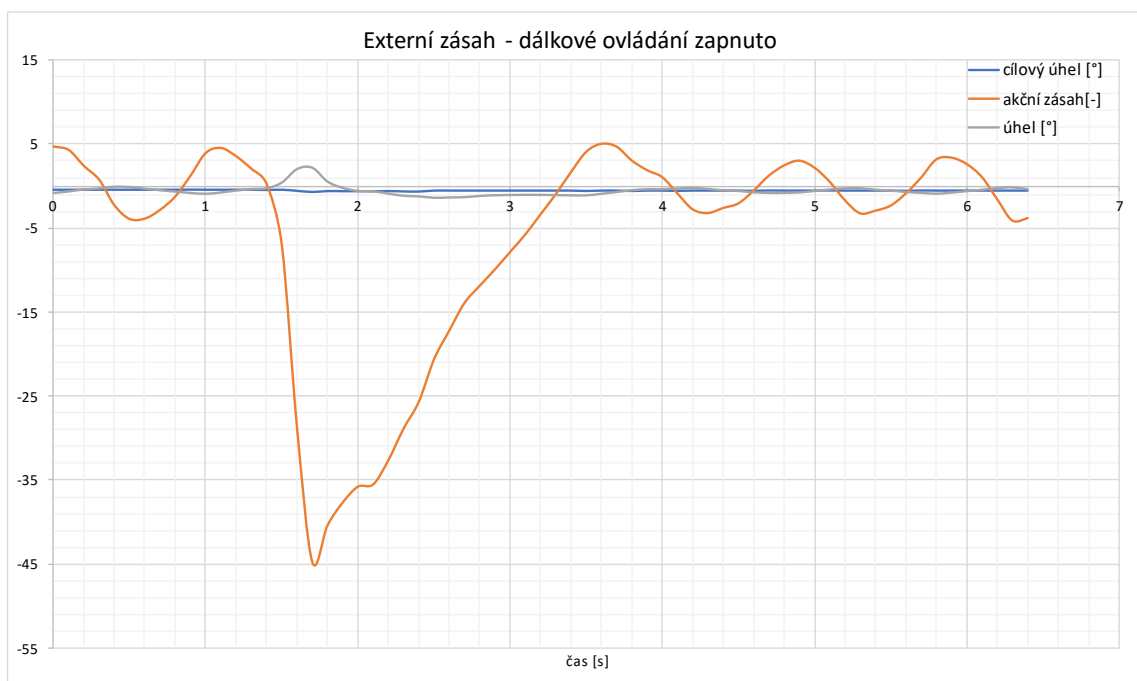
Obrázek 80 – Vliv externího zásahu při vypnutém režimu ovládání: úhel a akční zásah
Při vypnutém dálkovém ovládání pohybu je robot regulován tak, že dochází k striktnějšímu držení vzpřímené polohy a taky k navrácení robota do původní polohy. To je patrné na dalším grafu:



Obrázek 81 – Vliv externího zásahu při vypnutém režimu ovládání: ujetá vzdálenost a rychlost robota.

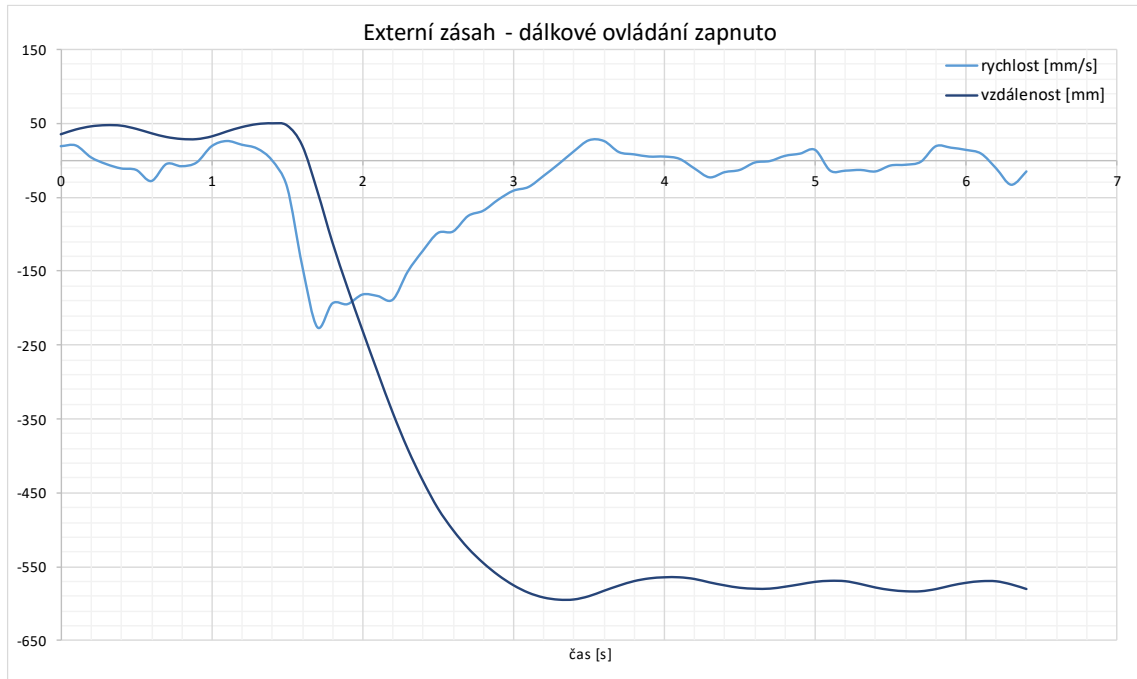
Zde je z předchozího grafu vidět, jak se plynule robot vrací do své původní pozice. To má za následek aktivní stabilizační PD-regulátor, který je pak v režimu zapnutého ovládání přeskakován. Tento regulátor napomáhá k menší oscilaci kolem vzpřímené polohy a návratu do původní pozice.

Režim dálkového ovládání: zapnuto



Obrázek 82 – Vliv externího zásahu při zapnutém režimu ovládání: úhel a akční zásah

Při zapnutém ovládní je robot regulován tak, že dochází k méně striktnímu držení vzpřímené polohy oproti původnímu režimu (dálkové ovládní vypnuto) a tím i k větší ujeté vzdálenosti při následném vyrovnání, což lze vidět na dalším grafu. Externí zásah má patřičný vliv na akční zásah, který způsobuje pohyb motorů vzad.



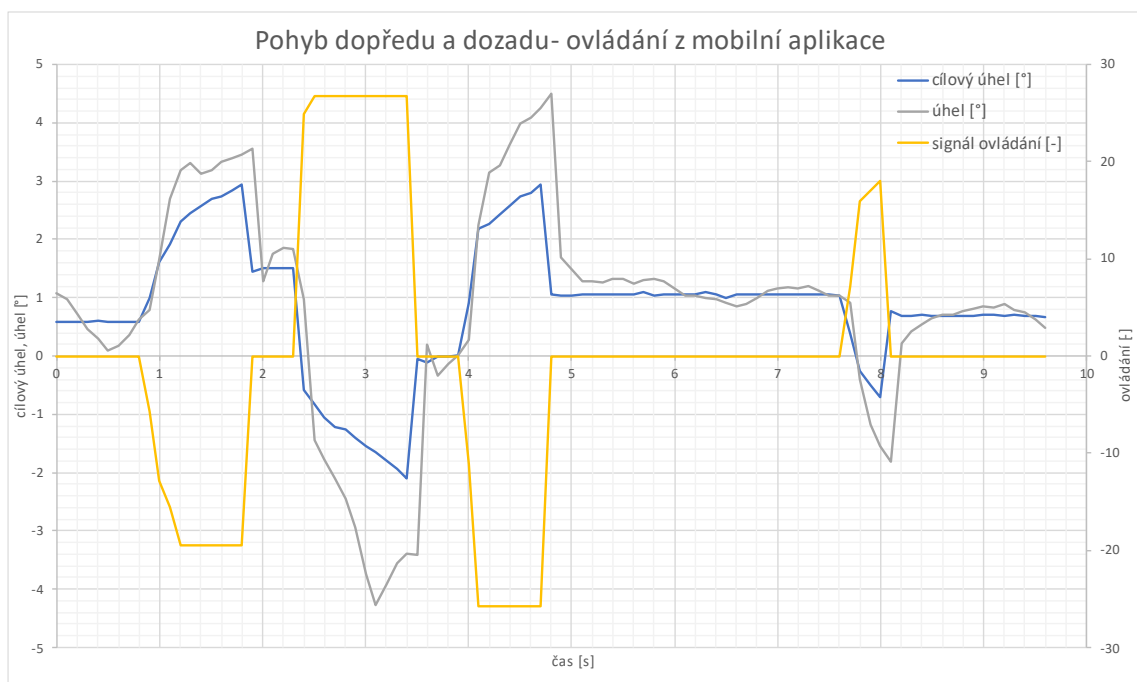
Obrázek 83 – Vliv externího zásahu při zapnutém režimu ovládní: ujetá vzdálenost a rychlost robota.

Robot při externím zásahu v režimu dálkového ovládní ujede podstatně větší vzdálenost než při předchozím zobrazení, kde je dálkové ovládní vypnuto. Robot se taktéž dostane do jiné pozice, ve které následně již zůstává (původní pozice = 0, výsledná pozice = -550 mm).

8.3 Úloha dálkového ovládání pohybu

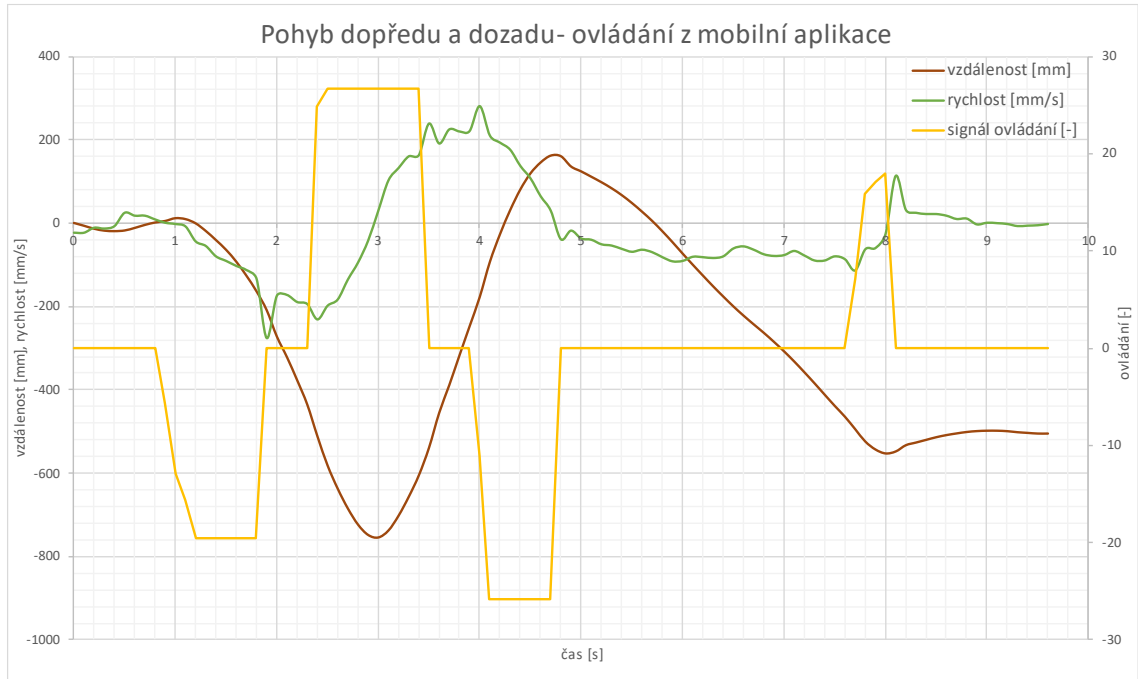
Robot byl umístěn do stabilizované polohy do místnosti tak, aby měl prostor pro testování pohybu vpřed a vzad a také otáčení na místě. Po připojení robota s mobilní aplikací byl režim přepnut na „ovládání“ a pomocí virtuálního joysticku byl robot rozpohybován vpřed a vzad – v grafu níže lze toto vyčíst jako žlutou čáru „signál ovládání“.

Pohyb vpřed a vzad



Obrázek 84 – Vliv řídicího povelu z mobilní aplikace na změnu cílového úhlu

Zde je vidět vliv PI regulátoru na nastavování cílového úhlu, který chceme, aby robot dosáhl. Dále lze z tohoto grafu vidět jistá nedokonalost, kdy se regulátor snaží naklonit robota a přiblížit se cílovému úhlu, to se mu však nedaří úplně dokonale. Tato skutečnost může být vlivem nedokonalého nastavení parametrů tohoto PI regulátoru.

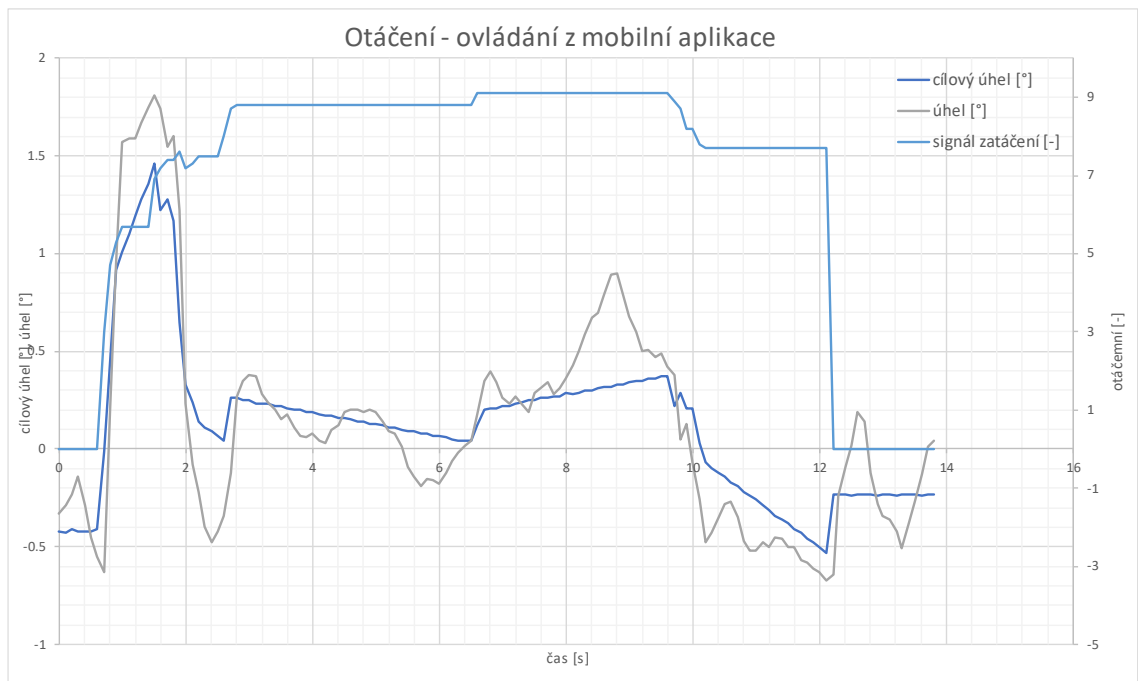


Obrázek 85 – Vliv řídicího povelu z mobilní aplikace na změnu rychlosti a ujeté vzdálenosti

Z předchozího grafu je patrné že se rychlost mění na základě změny cílového úhlu, který je ovlivněn daným řídicím signálem z mobilní aplikace.

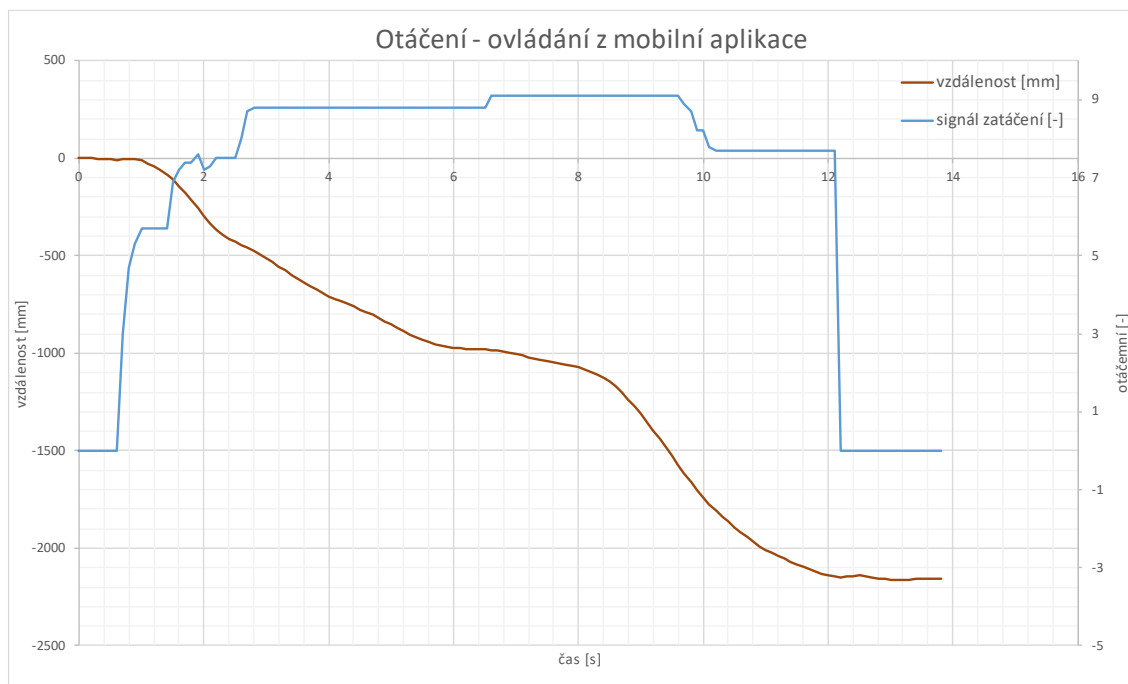
Pohyb otáčení

Při tomto experimentu bylo cílem otáčet robota tak, že jedno kolo stojí a druhé se točí.



Obrázek 86 – Chyba vzniklá při otáčení robota kolem své osy

Zde dochází k nedokonalému otáčení – páčka „joysticku“ robota v mobilní aplikaci nebyla dokonale na levém kraji a tím se robot pohyboval lehce dopředu/dozadu. Otáčení je tedy posunuto mimo osu robota a protiosé motory se neotáčí stejnou rychlostí. Na grafu níže je zobrazena ujetá vzdálenost robota při takto provedeném otáčení.

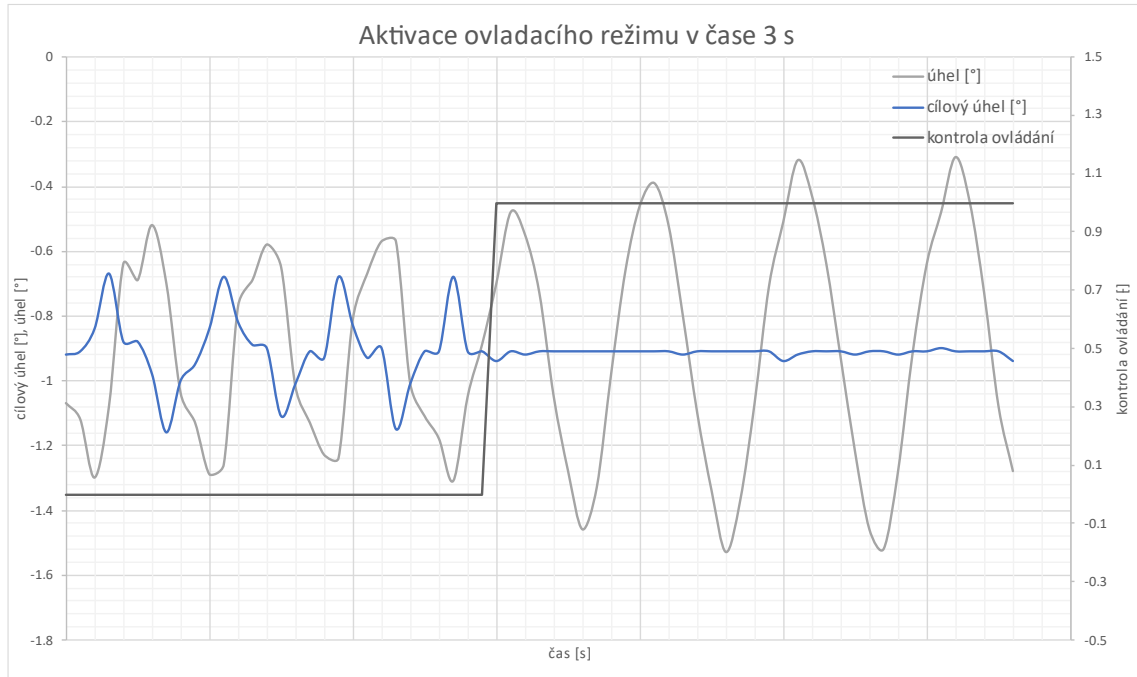


Obrázek 87 – Pohyb robota kolem své osy vlivem dálkového ovládání (zatačení)

Robot se začne téměř lineárně otáčet při příjmu dat z mobilního zařízení, kde je pozice páčky joysticku posunuta do levé strany. Ujetá vzdálenost kola, které se oproti druhému pohybuje, je cca 2,15 m.

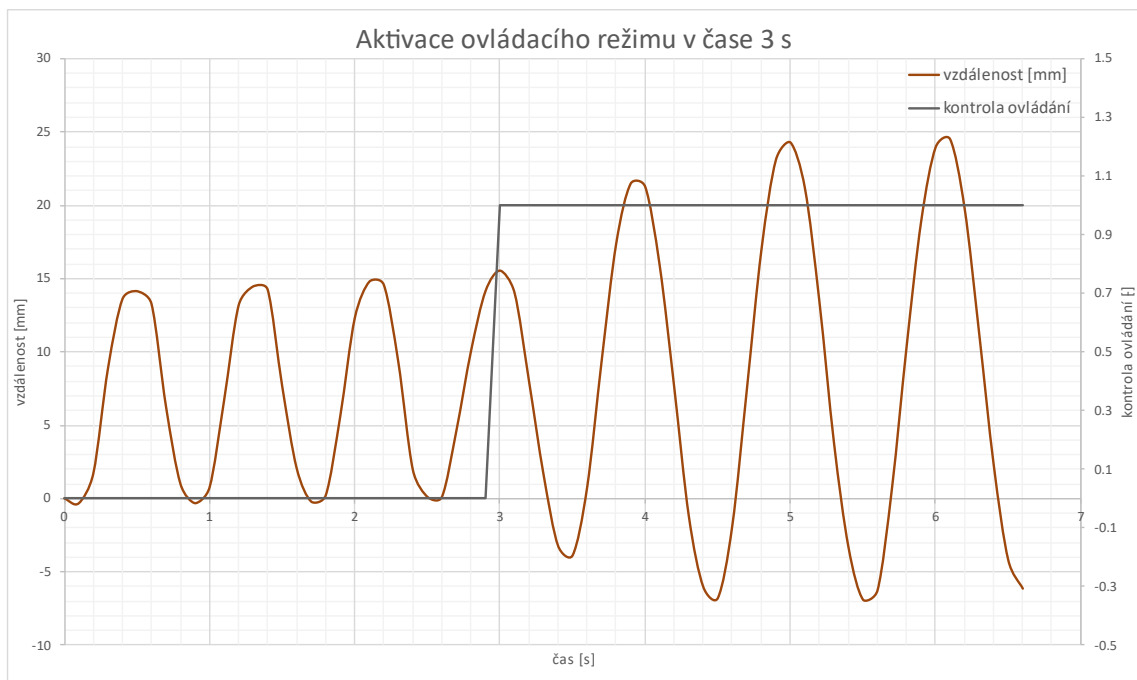
Aktivace dálkového ovládání v definovaném čase

V tomto experimentu je cílem přepnout se z režimu aktivního držení pozice (aktivní PD regulátor pozice) do režimu ovládání, kde je tento PD regulátor pozice přeskokován, jak lze vidět z vývojového diagramu (viz. obrázek 72).



Obrázek 88 – Změna velikosti úhlu vlivem zapnutí ovládacího režimu

Zde dochází k vypnutí první části regulace, a to přesněji přeskočení PD regulátoru pozice, jak již bylo uvedeno dříve. Po zapnutí režimu dálkového ovládání se hodnota pozice přestane upravovat PD regulátorem, která je vstupem následujícího PI regulátoru a dojde tak k volnější oscilaci ve vzprímené poloze.



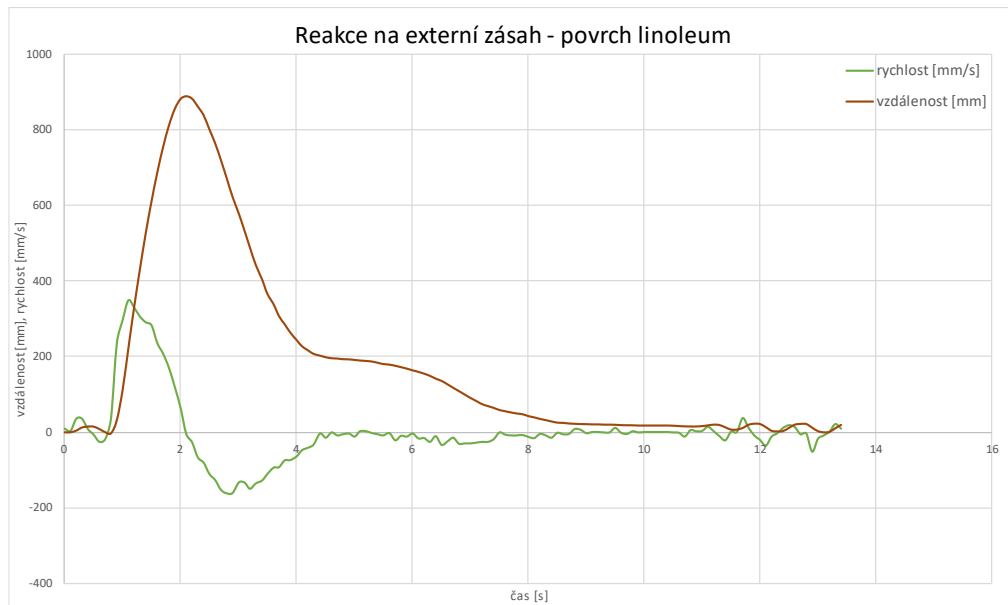
Obrázek 89 – Vliv zapnutí ovládacího režimu na vzdálenost

Robot při přepnutí do režimu dálkového ovládání změní vlastnosti vlivem přeskočení prvního PD pozičního regulátoru. To má za následek větší periodu a amplitudu oscilace.

8.4 Testování stability na různých površích

Robot byl testován na plovoucí podlaze a to z důvodu dostatečného prostoru pro testování a zároveň se jedná o povrch s velmi dobrou přilnavostí. Dále byla stabilita robota otestována např. na linoleu a dlažbě – viz další grafy a odpovídající komentář pod nimi.

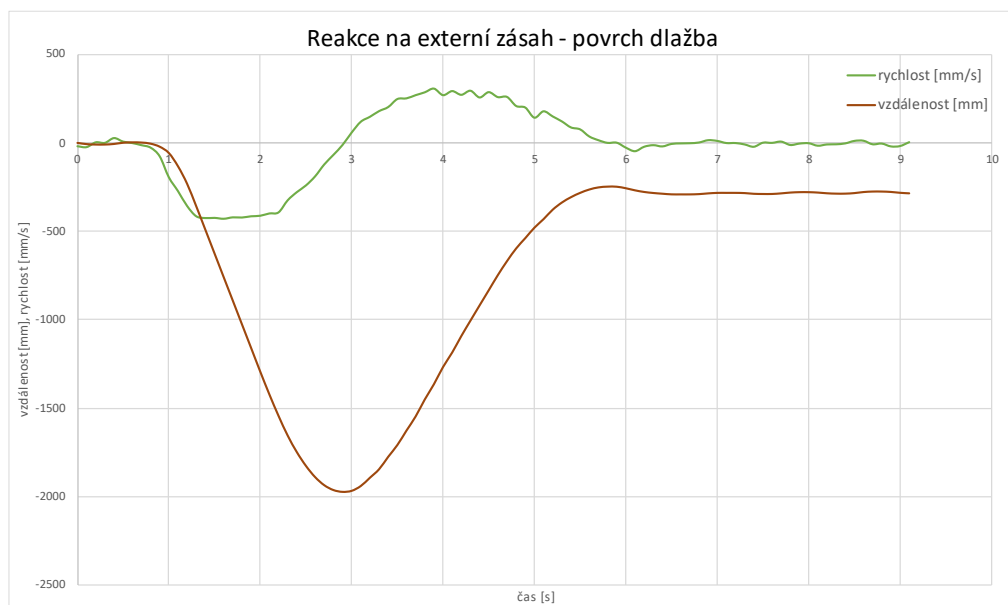
Povrch – linoleum



Obrázek 90 – Přilnavost kol na linoleu

Při externím zásahu se robot vrací do původní polohy a to bez známky jakéhokoliv prokluzu

Povrch – dlažba



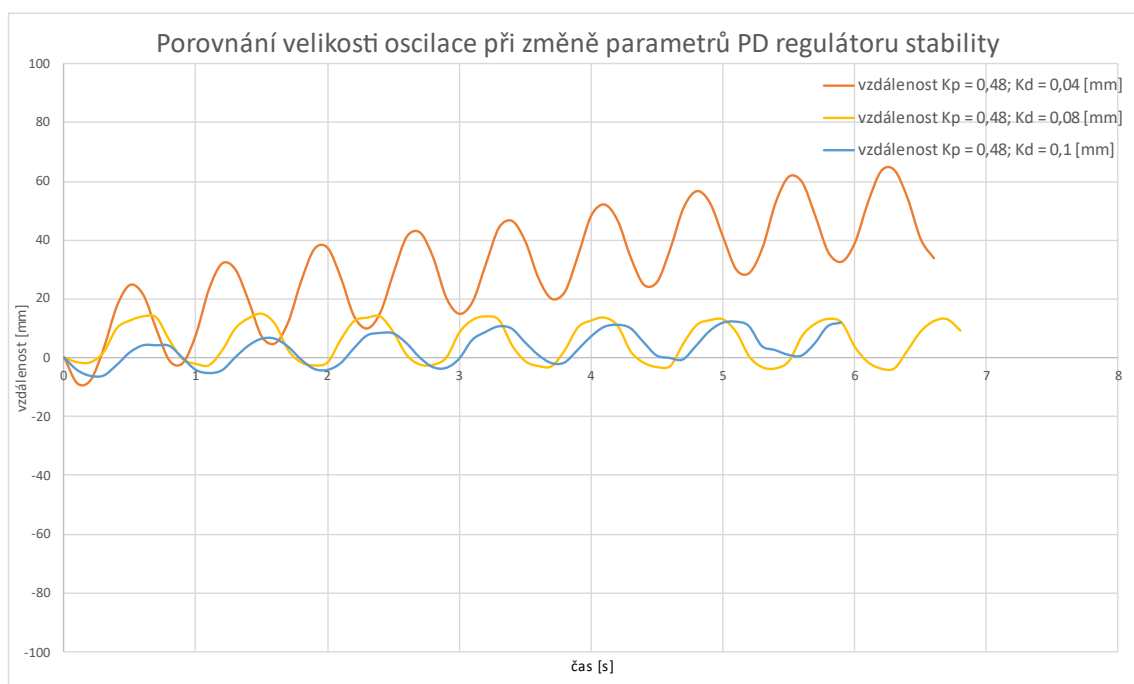
Obrázek 91 – Přilnavost kol na dlažbě

Pokus byl opakován i pro více kluzký povrch – dlažba. Robot se opět bez známky jakéhokoliv prokluzu dostává do původní polohy s tím rozdílem, že dochází k velké změně ujeté vzdálenosti (cca 300 mm) mezi startovací a dosaženou vzdáleností. Tento jev je způsoben tím, když byl externí zásah do robota proveden vždy jedním směrem a když se do něj strčí opačným směrem, vznikne tato odchylka v pozici.

Na obou grafech výše robot vykazuje bezproblémové vlastnosti, co se týče přilnavosti kol. Zároveň robot dosáhl maximální rychlosti pohybu $427 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

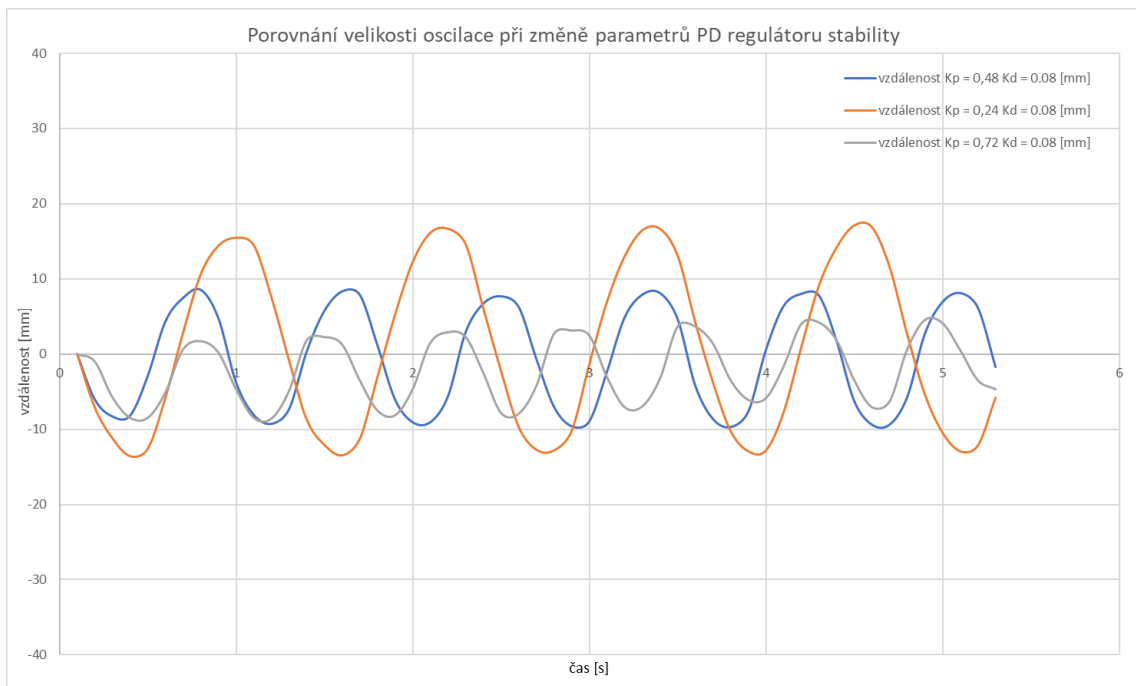
8.5 Vliv změny parametrů regulátoru na stabilizaci robota

V tomto experimentu se snížil parametr Kd , tedy derivační konstanta PD regulátoru stability z původní hodnoty $Kd = 0,08$ na hodnotu $0,04$ – tedy o -50% a také naopak zvýšil na hodnotu $0,1$ – tedy o 25% . Výsledek tohoto experimentu je uveden v grafu níže.



Obrázek 92 – Vliv změny parametru Kd u PD regulátoru stability na chování robota
Lze si všimnout, že při snížení parametru Kd v PD regulátoru stability o 50% ($Kd = 0,04$) se zvýší amplituda oscilace robota téměř dvojnásobně. Perioda oscilace se však snižuje ($T = 0,7$ s oproti původní $T = 0,85$ s). Dalším snížením tohoto parametru by došlo ke ztrátě stability robota. Zvyšující se „offset“, neboli postupný pohyb robota jedním směrem (aktuálně do kladných hodnot) je způsoben chybou, která vzniká při příliš malé hodnotě parametru Kd . Naopak zvýšení parametru Kd o 25% mírně zmenší oscilace na úkor toho, že při jemném externím zásahu dochází ke ztrátě stability.

Podobný experiment byl také proveden pro porovnání vlivu změn parametru K_p , tedy proporcionální zesílení regulátoru, a to o plus/minus 50% vůči svému defaultnímu nastavení.



Obrázek 93 - Vliv změny parametru K_p u PD regulátoru stability na chování robota

Při změně parametru K_p o -50% ($K_p = 0,24$) dochází ke zvětšení amplitudy ujeté vzdálenosti a tím se zvětšuje i perioda kmitání $T = 1,2$ s oproti původní periodě kmitání $T = 0,85$ s. Se zvýšením parametru K_p o +50% ($K_p = 0,72$) má robot sice nižší amplitudu a periodu kmitání $T = 0,7$ s, ale je vysoce citlivý na externí zásah, stejně jako je tomu v předchozím grafu (obrázek 92), kdy vysoká hodnota K_d způsobuje velkou náchylnost na externí zásah a jakoukoliv jinou poruchu.

8.6 Kvalita regulace

Zde je pro ilustraci alespoň rámcově vyhodnocena kvalita regulace na základě naměřených dat z experimentu Windup manévr viz. obrázek 76 a uvedených kritériích pro získání základního přehledu o výsledné kvalitě regulace.

→ Doba ustálení

hodnota δ , která definuje přípustné pásmo kolem požadované hodnoty w , byla pro naše účely zvolena jako 0.2 stupně, což prakticky představuje horní a dolní limity v průběhu oscilace robota kolem jeho vzpřímené polohy:

$$w = 0; \delta = \pm 0,2^\circ$$

$$w - \delta \leq y(t) \leq w + \delta$$

Z grafu (obrázek 76) je pak odečtena přibližná doba ustálení = 1 s

Uvedená doba ustálení je v porovnání s velikostí robota vcelku krátká.

→ Koeficient tlumení ξ :

$$A_1 = 4; A_2 = 0,2$$

$$\xi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{4 - 0,2}{4} = 0,95$$

Koeficient tlumení je 0,95, což znamená velmi vysokou hodnotu tlumení a tím lepší výsledek regulace. To je potvrzeno i předchozím vyjádřením doby ustálení. Výpočet opět vycházel z experimentu Windup manévr viz. obrázek 76. Celkově bylo provedeno více experimentů, závěry uvedené výše ilustrují typické výsledky dosažené během těchto experimentů.

9 CENOVÁ NÁROČNOST

V následující tabulce jsem se snažil alespoň přibližně odhadnout cenovou náročnost výroby představeného prototypu 2-kolového robota, a to bez započítání odpracovaných hodin, kterých bylo hrubým odhadem určitě přes 200.

Tabulka 4 – Přehled komponent robota a jeho cenová náročnost

komponent	popis	počet [ks]	cena [Kč]	poznámka
Arduino Nano	řídící jednotka	1	300	+ příslušenství
Driver	DRV8825	2	150	+ příslušenství
3osý gyroskop	MPU6050	1	200	
Bluetooth modul	HC-05	1	150	
krokový motor	NEMA 17 17HS4401 0,4 Nm	2	350	+ příslušenství
baterie	BH Power 2200 mAh 25 C 3 S	1	1.300	+ příslušenství
kola	1/8 Off Road Buggy, TRACER	2	300	
hliníkové pláty	500 g (horní, prostřední, skeletní)	1	200	
akrylátové sklo A2		1	130	
závitová tyč	M5 1000 mm	2	40	
spojovací materiál		-	500	
elektro-montáž		-	500	
filament	Filament-PM PLA+	-	200	
cena celkem			= 5.160	200+ hodin

ZÁVĚR

Vyvinutý prototyp 2-kolového robota (jenž byl jako projekt pojmenován „Mbalance“) je schopen stabilizace ve vzpřímené poloze na vodorovné plošině. Řízení robota bezdrátovým ovládáním je provedeno komunikací přes Bluetooth. Toto řízení plně zaručuje pohyb robota ve všech směrech – dopředu / dozadu, natočení doprava / doleva a to kombinovaně, takže pro zatočení není potřeba nastavit robota do vzpřímené polohy jako u jiných, podobných prací, ze kterých byly čerpány některé informace.

Vylepšení robota by mohlo obsahovat změnu typu pohonu kol. Použitý krokový motor sice splňuje požadavky na kvalitu regulace i na jeho řízení, každopádně má svá omezení a lépe by robot zvládal maximální nastavitelnou rychlost a plynulejší řízení nahrazením za stejnosměrný motor, který by také mohl mít vyšší točivý moment. To by však vyžadovalo změnu komponent jako je driver DRV8825 se změnou řídicího napětí, nebo po hardwarové stránce jinou hřídel pro připojení kol a pro uchycení motoru ke skeletu robota. Dalším vylepšením by bylo snížení celkové váhy a výšky robota, a to za účelem snazšího držení vzpřímené polohy. To zároveň znamená lépe zvolené těžiště, které je již ve správné nízké poloze. To má za následek snížení úhlové rychlosti robota a má tak pozitivní vliv na jeho celkovou stabilitu.

Po praktické stránce by bylo vhodné robota vybavit baterií s vyšší kapacitou pro delší výdrž napájecího napětí a do softwarové části doplnit bezpečnostní sledování hladiny napětí, aby se předešlo jejímu podpětí při vybití. Dalším vylepšením by mohlo být změna použitého způsobu komunikace. Bluetooth, který je aktuálně použit má svá omezení. Často dochází k chybám v přenosu, kde přijímač ztrácí některé bity přenesené informace a celkově přidávání dalších funkcí spojených s mobilní aplikací do software robota není moc intuitivní pro vývojáře. Mobilní aplikace je vytvořena ve vývojovém prostředí, které již obsahuje knihovnu pro jednoduchou komunikaci mezi vysílačem (mobilním zařízením) a přijímačem (HC-05 Bluetooth receiver). Z tohoto důvodu byl zvolen tento způsob komunikace. Mobilní aplikace by z edukačních účelů mohla být doplněna o posuvníky, každý nastavující jednotlivé parametry regulátorů K_p , K_i a K_d . Implementace v aplikaci by znamenala rozšíření bufferu pro posílání dat a na straně Arduina tyto data zpracovat a v reálném čase přenastavit vybraný regulátor. Použití Wi-Fi modulu nebo RC vysílačkou by byl robot kvalitněji ovládán vzdáleně, jelikož se jedná o přenos s kontrolou přijmutí signálu na druhé straně. Dále by se přes Wi-Fi modul mohlo vytvořit snadno webové rozhraní, ve kterém by se daly zobrazovat různá data a statistiky robota v reálném čase. To samé jde samozřejmě

udělat i s použitím aktuálního způsobu komunikace, avšak vysílání dat z robota v programu zatím neexistuje a bylo by to vhodné téma na budoucí vylepšení robota.

Další vylepšení by se mohlo týkat využití některého z pokročilejších algoritmů regulace, jako je např. prediktivní řízení.

K práci byl také vytvořen rámcový, zjednodušený model v simulačním prostředí MATLAB/Simulink, který je součástí přílohy. V této simulaci je do zpětné vazby připojen PID regulátor, který lze na základě vestavěných funkcí prostředí MATLAB/Simulink automaticky naladit dle definovaných požadavků. Z důvodu celkové složitosti a časové náročnosti sestavení tohoto detailního modelu a některým chybějícím komponentům, jako jsou např. krokové motory, nebyla uvedena, zatím jen rozpracovaná verze simulačního modelu zahrnutá v textu této diplomové práce a může být vhodným tématem další, navazující závěrečné práce.

Co se týče cenové náročnosti, tak celková cena sestavení robota byla odhadnuta na 5160,- a čas strávený vývojem, návrhem, konstrukcí a laděním byl cca 200+ hodin. Největším vlivem na tuto výslednou cenu byla hodnota baterie, dvou krokových motorů, mikrokontroléru a kol. Uvedená cena je poměrně nízká, kdy se tato práce snažila najít optimální řešení pro vytvoření prototypu s dostatečně dobrou kvalitou konstrukčního zpracování. K výsledné hodnotě prototypu ale není připočten čas strávený člověkem, který se pohyboval přes 200 hodin, spotřeba elektrické energie 3D tiskárny a její samotná cena.

Robot dostatečně dobře drží vzpřímenou polohu a to při testování několika různými typovými úlohami, a to včetně reakce na poruchu – externí zásah. Přílnavost kol byla otestována na různých površích a tam, kde se očekávala nejmenší přílnavost – dlažba, bylo chování kol bez prokluzu. Zároveň při testování na povrchu dlažby bylo dosaženo maximální rychlosti robota a to $427 \text{ mm} * \text{s}^{-1}$.

Celkově vzato, vyvinutý 2-kolový robot se jeví jako vhodný jak pro propagační, tak i didaktické účely a to z důvodu snadného pochopení konstrukce a programově snadno upravitelného kódu řízení (viz příloha), kde lze měnit nastavení regulátorů změnou hodnot definovaných konstant. Mobilní aplikaci lze taktéž zdarma modifikovat a to s pomocí poskytovaného souboru (viz příloha), který lze otevřít v online editoru MIT App Inventor.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BELFORTE, Guido. International Journal of Mechanics and Control. Online. Torino - Italy, 2008. ISBN ISSN 1590-8844. Dostupné z: <http://www.jomac.it/FILES%20RIVISTA/JoMaC08B/JoMaC08B.pdf>. [cit. 2024-03-18].
- [2] LQR-BalanceBot. Online. In: S RAO, Akshay. Github. Dostupné z: <https://github.com/iamAkshayrao/LQR-BalanceBot>. [cit. 2024-03-18].
- [3] B-ROBOT EVO 2.: Much more than a self balancing robot. Online. In: . Scotland, UK. Dostupné z: <https://jjrobots.com/much-more-than-a-self-balancing-robot/>. [cit. 2024-03-18].
- [4] ZHANG, Wanying. A Two-Wheeled Self-Balancing Robot with the Fuzzy PD Control Method. Online. In: . Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/469491>. [cit. 2024-03-19].
- [5] About Balanduino. Online. In: TKJ ELECTRONICS. Dostupné z: <https://balanduino.tkjelectronics.dk/about-balanduino>. [cit. 2024-03-19].
- [6] History of the Segway PT (Personal Transporter). Online. In: . Dostupné z: <https://www.isegway.cz/prague-segway-article/history-of-the-segway-pt>. [cit. 2024-03-19].
- [7] P. ANDERSON, David. NBot Revision 6. Online. In: . Dostupné z: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/nbot6.html>. [cit. 2024-03-19].
- [8] YASAR, Kinza. Robotics. Online. In: . Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/robotics>. [cit. 2024-05-02].
- [9] HARRIS, Tom a POLLETTE, Chris. How Robots Work. Online. In: . Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/robot4.htm>. [cit. 2024-03-19].
- [10] HOOPER, Rich. Robots In Space: Learn About Robots. Online. In: . Dostupné z: <https://www.learnaboutrobots.com/space.htm>. [cit. 2024-03-19].
- [11] Robot. Online. In: . Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/robot>. [cit. 2024-03-19].
- [12] Prusa Mini+ Printer Specifications. Online. In: . Dostupné z: <https://simplyprint.io/compatibility/prusa-mini-plus>. [cit. 2024-03-21].

- [13] FRYČ, Martin. OVLÁDÁNÍ ROBOTY S ACKERMANNOVÝM PODVOZKEM. Online, DIPLOMOVÁ PRÁCE, vedoucí Ing. ROZMAN JAROSLAV, Ph.D. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, 2017. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=158546. [cit. 2024-03-19].
- [14] The Inverted Pendulum System. Online. In: . Dostupné z: https://web.mit.edu/klund/www/papers/UNP_pendulum.pdf. [cit. 2024-03-19].
- [15] The Charge - USB Type C. Online. In: . Dostupné z: <https://www.mockett.com/images/blog/2022/usb-typec-2.jpeg>. [cit. 2024-03-21].
- [16] KLUSÁČEK, Ondřej. MODELOVÁNÍ, IDENTIFIKACE A ŘÍZENÍ ROTAČNÍHO KYVADLA. Online, DIPLOMOVÁ PRÁCE, vedoucí Ing. ROBERT GREPL, Ph.D. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2009. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18652. [cit. 2024-03-19].
- [17] MOLINEUX, Aimee. What are the Principles of PID Controllers? Online. In: . Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=22851>. [cit. 2024-03-18].
- [18] FIEDLER, Felix. Basics of model predictive control. Online. In: . Dostupné z: https://www.do-mpc.com/en/latest/theory_mpc.html. [cit. 2024-03-18].
- [19] Microcontroller and its Types. Online. In: . Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/microcontroller-and-its-types/>. [cit. 2024-03-18].
- [20] LVEISHEIPLOVA. Architektura von Neumann. Online. In: . Dostupné z: http://wiki.sps-pi.cz/index.php/Architektura_von_Neumann. [cit. 2024-03-18].
- [21] LVEISHEIPLOVA. Harvardská architektura. Online. In: . Dostupné z: http://wiki.sps-pi.cz/index.php/Harvardsk%C3%A1_architektura. [cit. 2024-03-18].
- [22] What is an Arduino? Online. In: . Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino/the-arduino-family>. [cit. 2024-03-18].

- [23] SZCZEPANIAK, Aleksandra. Raspberry Pi or Arduino: when to choose which? Online. In: . Dostupné z: <https://www.leorover.tech/post/raspberry-pi-or-arduino-when-to-choose-which>. [cit. 2024-03-18].
- [24] Introduction to the Harvard Architecture: Computer Architecture and Organization. Online. In: . CS 341 – Lab 2. Dostupné z: <https://www.cs.umb.edu/cs341/Lab02/index.html>. [cit. 2024-03-18].
- [25] ALJUNDI, Liam. Using the Arduino Software (IDE). Online. In: . Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/the-arduino-software-ide/>. [cit. 2024-03-18].
- [26] CAVALLO, Christian. Stepper Motors vs. DC Motors: What's the Difference? Online. In: . Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/stepper-motors-vs-dc-motors/>. [cit. 2024-03-18].
- [27] Brushless Motors: NIDEC's Technical Capabilities. Online. In: . Dostupné z: <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless>. [cit. 2024-03-18].
- [28] Some differences between bipolar and unipolar stepper motor. Online. In: . Dostupné z: <https://www.oyostepper.com/article-1076-Some-differences-between-bipolar-and-unipolar-stepper-motor.html>. [cit. 2024-03-18].
- [29] Types of Motor Controllers and Drives. Online. In: Thomasnet. 2024. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/types-of-motor-controllers-and-drives>. [cit. 2024-05-03].
- [30] What is a stepper motor. Online. In: . Dostupné z: <https://eu.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/017>. [cit. 2024-03-18].
- [31] ŠŤASTNÝ, František. 15 Senzory. Online. In: . Dostupné z: https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html. [cit. 2024-03-18].
- [32] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. Online. In: . Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>. [cit. 2024-03-18].
- [33] ČÍŽEK, Jakub. Pojdme programovat elektroniku: Jak vlastně funguje akcelerometr a gyroskop nejen ve vašem telefonu. Online. In: . Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/pojdme-programovat-elektroniku-jak-vlastne-funguje-akcelerometr-a-gyroskop-nejen-ve-vasem-telefonu/sc-3-a-194858/default.aspx#articleStart>. [cit. 2024-03-18].

- [34] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. Online. In: . Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>. [cit. 2024-03-18].
- [35] Snímače náklonu - inklinometry. Online. In: . Dostupné z: <https://www.megatron.cz/kategorie/senzorika/snimace-uhlu-natoceni/snimace-naklonu>. [cit. 2024-03-18].
- [36] Sériový port RS232. Online. In: . Dostupné z: <https://papouch.com/seriovy-port-rs232-p3740>. [cit. 2024-03-18].
- [37] The CAN Bus Protocol Tutorial. Online. In: . Dostupné z: <https://www.kvaser.com/can-protocol-tutorial>. [cit. 2024-03-18].
- [38] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Komunikační protokol universální sériové sběrnice. Online. In: . Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikacni-protokol-universalni-seriove-sbernice>. [cit. 2024-03-18].
- [39] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Externí sériové sběrnice SPI a I²C. Online. In: . Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c>. [cit. 2024-03-18].
- [40] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Komunikace po sériové sběrnici I2C. Online. In: . Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikace-po-seriove-sbernici-i2c>. [cit. 2024-03-18].
- [41] WHAT IS RADIO FREQUENCY (RF). Online. In: . Dostupné z: <https://www.rfglobalsolutions.co.uk/what-is-radio-frequency-rf>. [cit. 2024-03-18].
- [42] Technologie ZigBee. Co to je, jaké má výhody a jak s ní začít? Online. In: . Redakce TESLA. Dostupné z: <https://www.teslasmart.com/cz/technologie-zigbee-co-to-je-jake-ma-vyhody-a-jak-s-ni-zacit>. [cit. 2024-03-18].
- [43] Bluetooth Low Energy není jen nová verze standardu Bluetooth. Online. In: . Ústí nad Labem: Automa – časopis pro automatizační techniku, s. r. o. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/bluetoothlow-energy-neni-jen-nova-verze-standardu-bluetooth-2013_12_0_10907. [cit. 2024-03-18].
- [44] Rozdělení RC akumulátorů. Online. In: . Dostupné z: https://www.rc-zivot.cz/clanek/rozdeleni-rc-akumulatoru_1. [cit. 2024-03-18].
- [45] 3D tisk v kostce. Online. In: . Brno. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>. [cit. 2024-03-18].
- [46] PEKAŘ, Libor. Spojité řízení: Přednášky studijního programu Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci specializace Inteligentní systémy s roboty.

- Online. In: UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. Utb. Dostupné z: https://moodle.utb.cz/pluginfile.php/737817/mod_resource/content/10/Spojite_rizeni_v2.96.pdf. [cit. 2023-11-05].
- [47] Proporcionální regulátor. Online. In: . Dostupné z: http://skola.hellebrand.cz/text1213/au-s/Regulace_2-P-regulator.pdf. [cit. 2024-03-18].
- [48] Integrační regulátor. Online. In: . Dostupné z: http://skola.hellebrand.cz/text1213/au-s/Regulace_3-I-regulator.pdf. [cit. 2024-03-18].
- [49] ZHUGE, Scott. PID Control Theory. Online. Dostupné z: <https://www.crystalinstruments.com/blog/2020/8/23/pid-control-theory>. [cit. 2024-03-18].
- [50] PID Control Theory. Online. CRYSTAL INSTRUMENTS. Crystalinstruments. 2023. Dostupné z: <https://www.crystalinstruments.com/blog/2020/8/23/pid-control-theory>. [cit. 2023-11-05].
- [51] DEHNER, Bill. Optimizing to the tune of a PID equation. Online. In: . Dostupné z: <https://www.isa.org/intech-home/2017/may-june/features/optimizing-to-the-tune-of-a-pid-equation>. [cit. 2024-03-21].
- [52] CHAROUS, Zdeněk. Modelování a řízení 2-kolového nestabilního transportéru Inteco. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2021, 106 s. (98 466 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/46331>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky, Ústav automatizace a řídicí techniky. Vedoucí práce Gazdoš, František. [cit. 2023-11-05].
- [53] LINEAR QUADRATIC REGULATOR. Online. In: Ocw.mit.edu. Dostupné z: https://ocw.mit.edu/courses/2-154-maneuvering-and-control-of-surface-and-underwater-vehicles-13-49-fall-2004/2d5318503b8f97d5a5255596fcf2e3f1_lec19.pdf. [cit. 2023-11-05].
- [54] MODRLÁK, Osvald. FUZZY ŘÍZENÍ A REGULACE. Online. In: TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Tul. 2002. Dostupné z: <https://www.uiam.sk/~bakosova/wwwRTP/tar2fuz.pdf>. [cit. 2023-11-05].
- [55] GORINEVSKY. Model Predictive Control: Part 1: The Concept. Online. In: STANFORD UNIVERSITY. Web.stanford.edu. Dostupné z:

https://web.stanford.edu/class/archive/ee/ee392m/ee392m.1056/Lecture14_MPC.pdf. [cit. 2023-11-05].

- [56] KNAPIK, D.; KOLEK, K.; ROSOL, M. a TURNAU, A. Autonomous, reconfigurable mobile vehicle with rapid control prototyping functionality. Online. IFAC-PapersOnLine. 2019, roč. 52, č. 8, s. 13-18. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.041>. [cit. 2023-11-09].
- [57] JIMÉNEZ, A.; JIMÉNEZ, F. a RUGE, I. Modeling and Control of a Two Wheeled Self-Balancing Robot. Online, 2020. ISBN 9789585207141. Dostupné z: <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.556>. [cit. 2023-11-09].
- [58] HESS, L. Návrh dvoukolového autonomního robota. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [59] KADLEC, T. Konstrukce a řízení nestabilního podvozku mobilního robota. Pardubice, 2014. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [60] BALÁTĚ, J. Automatické řízení. Praha: BEN, 2004. ISBN 978-80-7300-148-3.
- [61] SKOGESTAD, S. a POSTLETHWAITE, I. Multivariable feedback control: analysis and design. Chichester: Wiley, 2008. ISBN 0-470-01168-8.
- [62] Arduino Bluetooth modul HC-05. Online. In: . Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/navody-k-produktum/arduino-bluetooth-modul-hc-05.html>. [cit. 2024-03-21].
- [63] DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier. Online. In: . Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2982/specs>. [cit. 2024-03-21].
- [64] Big Hobby. Online. In: . Dostupné z: <https://www.bighobby.cz/>. [cit. 2024-03-21].
- [65] ADDICTIVE V2 BUGGY C3 (MEDIUM). Online. In: . Dostupné z: <https://profimodel.cz/cs/kompletni-kola/306564-addictive-v2-buggy-c3-medium-nalepene-gumy-zlute-disky-2-ks-8435127313641.html>. [cit. 2024-03-21].
- [66] Krokový motor 17HS4401 Nema 17. Online. In: . Dostupné z: https://www.3dfun.cz/krokovy-motor-17hs4401-nema-17/?gad_source=1. [cit. 2024-03-21].
- [67] MAKYČA, Tomáš. Robotická ruka na platformě Arduino. Vedoucí Zátopek, Jiří. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky, Ústav

- automatizace a řídicí techniky, 2022. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/50507>.
- [68] KERR ROBERGE, James. The mechanical seal. Online. Massachusetts institute of technology, 1960. Dostupné z: <https://web.mit.edu/klund/www/papers/Roberge1960.pdf>. [cit. 2024-04-20].
- [69] CHAKRABORTY, Sudipta. An Experimental study for Stabilization of Inverted Pendulum. Online, vedoucí Prof. Bidyadhar Subudhi, 2014. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/53190046.pdf>. [cit. 2024-04-20].
- [70] JOHNSON, Devin a KIRCH, Zach. Inverted Pendulum. Online, vedoucí Kevin Luna. Dostupné z: https://www.math.arizona.edu/~gabitov/teaching/201/math_485/Midterm_Reports/Inverted_Pendulum_Midterm_report.pdf. [cit. 2024-04-20].
- [71] KAFETZIS, Ioannis a MOYSIS, Lazaros. Inverted Pendulum: A system with innumerable applications. Online. School of Mathematical Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 2017. Dostupné z: <https://ikee.lib.auth.gr/record/288541/files/Inverted%20pendulum%20-%20A%20system%20with%20innumerable%20applications.pdf>. [cit. 2024-04-20].
- [72] Doktorandi z FEL ČVUT budou učit robota skákat do schodů. Online. In: . Dostupné z: <https://cz.ict-nn.com/doktorandi-z-fel-cvut-budou-ucit-robota-skakat-do-schodu/>. [cit. 2024-05-02].
- [73] VÍTEČKOVÁ, Miluše a VÍTEČEK, Antonín. Vybrané metody seřizování regulátorů. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2503-8.
- [74] ÅSTRÖM, Karl J. a HÄGGLUND, Tore. PID controllers: theory, design, and tuning. Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. ISBN 1556175167
- [75] GAZDOŠ, František. Řízení technologických procesů [PowerPoint prezentace]. Strategický projekt UTB ve Zlíně CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002204, 2018 [cit. 2024-05-17].
- [76] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. MIT App Inventor. Online. 2024. Dostupné z: <https://appinventor.mit.edu/>. [cit. 2024-05-16].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PWM	Pulse Width Modulation
RPM	Rotates per minute
RT	Real Time
SMC	Sliding Mode Control
USB	Universal Serial Bus
SPI	Serial Peripheral Interface
Wi-Fi	Wireless Fidelity
DSP	Digital Signal Processor
PCB	Printed Circuit Board
FPGA	Field-programmable gate array
DoF	Degree of Freedom
LQR	Linear-quadratic regulator
RHC	Receding Horizon Control
MCU	Micro Control Unit
CPU	Central Processing Unit
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
ALU	Arithmetic-logic Unit
IDE	Integrated Development Environment
DRG	Disc Resonator Gyroscope
CAN	Controlled Area Network
I2C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
STL	Standard Triangle Language

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Inverzní kyvadlo pohybující se na vozíku s pásovým pohonem [70].....	13
Obrázek 2 – První realizace dvoukolového balančního robota na světě [1].....	14
Obrázek 3 – B-Robot Evo 2 [3]	15
Obrázek 4 – Robot Balanduino [5]	15
Obrázek 5 – nBot [7]	16
Obrázek 6 – Dvoukolový robot Iteco [52].....	16
Obrázek 7 - UnTrans Device Driver použitý v práci studenta Z. Charouse 2021 [52]	17
Obrázek 8 – Dvoukolový balanční robot autora T. Kadlece z r. 2014 [59].....	17
Obrázek 9 – Vzhled robota – T. Hess, 2013 [58]	17
Obrázek 10 – Inverzní kyvadlo na vozíku [59]	22
Obrázek 11 – Náklon robota	24
Obrázek 12 – Ilustrační schéma regulační smyčky využívající principu LQR [16].....	25
Obrázek 13 – Schématické zobrazení základní regulační smyčky využívající PID regulaci [17].....	26
Obrázek 14 – Schématické znázornění použití Fuzzy regulátoru k řízení pozice robota [4]	27
Obrázek 15 – Princip MPC řízení – posouvání horizontu do blízké budoucnosti [18]	27
Obrázek 16 - SK80 Skatego [72].....	29
Obrázek 17 – Schématické znázornění architektury von Neumann [20]	31
Obrázek 18 – Schématické znázornění Harvardské architektury [21]	32
Obrázek 19 – Mikrokontrolér Arduino Uno [22]	33
Obrázek 20 – Arduino a Raspberry Pi na jedné fotografii [23].....	33
Obrázek 21 – Arduino IDE [25]	34
Obrázek 22 – Rozložený kartáčový DC motor [26]	35
Obrázek 23 – Způsob zapojení vnitřního vinutí unipolárního a bipolárního krokového motoru [28]	36
Obrázek 24 – Hierarchické zobrazení ovládaní krokového motoru pomocí driveru [29] ...	38
Obrázek 25 – Profil konstantní rychlosti [30]	39
Obrázek 26 – Blokové schéma principu piezoelektrického akcelerometru [33]	41
Obrázek 27 – Rozdělení os tříosého gyroskopu [34].....	42
Obrázek 28 – Stromová topologie univerzální sériové sběrnice [38].....	43
Obrázek 29 – Struktura propojovacího kabelu – USB [38].....	44
Obrázek 30 –Typy USB [15].....	44
Obrázek 31 – Rozdělení akumulátorů [44].....	47
Obrázek 32 – 3D tiskárna Prusa Mini+ [12].....	50

Obrázek 33 – Program pro tvorbu 3D modelů a animací – Blender	50
Obrázek 34 – Program pro přípravu modelu k tisku – PrusaSlicer	51
Obrázek 35 – Základní zpětnovazební regulační obvod [46]	53
Obrázek 36 – Reakce P-regulátoru (u) na regulační odchylku (e) [46].....	54
Obrázek 37 – Ilustrace vlivu změny K_p na průběh řízení P-regulátorem [49]	54
Obrázek 38 – Reakce I-regulátoru (u) na změnu regulační odchylky (e) [48].....	55
Obrázek 39 – Vybraná přechodová charakteristika P, I složek a jejich kombinace [75]	56
Obrázek 40 – Vybraná přechodová charakteristika P, D složek a jejich kombinace [75]...	56
Obrázek 41 – Vybraná přechodová charakteristika P, I, D složek a jejich kombinace [75]	57
Obrázek 42 – Vybraná přechodová charakteristika P, I složek a jejich kombinace s filtrací D-složky (reálný PID) [75]	58
Obrázek 43 – Přechodová odezva regulace zobrazující maximální přeregulování [75]	61
Obrázek 44 – Přechodová odezva regulace ilustrující dobu regulace [75].....	61
Obrázek 45 – Mikropočítač Arduino Nano [25].....	64
Obrázek 46 – Schéma a popis pinů Arduino Nano.....	64
Obrázek 47 – Bluetooth přijímač HC-05 [62]	65
Obrázek 48 – Driver DRV8825 [63]	66
Obrázek 49 - Zjednodušené schéma zapojení ovladače DRV8825 do obvodu s mikrokontrolérem a krokovým motorem. [63]	66
Obrázek 50 – Adaptér pro driver DRV8825.....	67
Obrázek 51 – Li-Po baterie BH Power 11,1V 3 S [64]	68
Obrázek 52 – Nabíječka G.T. Power A3 [64].....	68
Obrázek 53 – Krokový motor NEMA 17 [66].....	68
Obrázek 54 – Rozměry a schéma zapojení motoru NEMA 17 [66].....	69
Obrázek 55 – Buggy kolo [65]	69
Obrázek 56 – princip otáčení doprava/doleva a pohyb dopředu/dozadu.....	70
Obrázek 57 – princip pohybu dopředu se zatáčením.....	70
Obrázek 58 – Schéma zapojení komponent robota v Breadboard zobrazení	71
Obrázek 59 – Schéma zapojení komponent robota	72
Obrázek 60 – Návys a bokorys 3D návrhu robota	74
Obrázek 61 – Postranní krytování – 3D návrh	74
Obrázek 62 – Variofix – 3D návrh	75
Obrázek 63 – Držák baterie - 3D návrh.....	75
Obrázek 64 – Výsledný design robota – 3D návrh.....	76
Obrázek 65 – 3D „slicování“ krytování horní část	77
Obrázek 66 – 3D „slicování“ krytování spodní část.....	77

Obrázek 67 – 3D „slicování“ držáku baterie	77
Obrázek 68 – Průběh 3D tisku spodního krytu a držáku baterie	78
Obrázek 69 – Přední pohled a popis konstrukce robota	79
Obrázek 70 – Boční pohled a popis konstrukce robota	80
Obrázek 71 – Výsledný vzhled sestaveného robota	81
Obrázek 72 – Vývojový diagram procesu řízení robota	82
Obrázek 73 – BACKEND mobilní aplikace použité k ovládní robotu.....	85
Obrázek 74 – Návrh designu mobilní aplikace.....	86
Obrázek 75 – Screenshot mobilní aplikace na mobilním telefonu	86
Obrázek 76 – Průběh wind-up manévru: úhel a akční zásah	88
Obrázek 77 – Průběh wind-up manévru: pozice a rychlost.	89
Obrázek 78 – Oscilace robota kolem vzpřímené polohy: úhel a akční zásah.....	90
Obrázek 79 – Oscilaci robota kolem vzpřímené polohy: pozice a rychlost	90
Obrázek 80 – Vliv externího zásahu při vypnutém režimu ovládní: úhel a akční zásah ...	91
Obrázek 81 – Vliv externího zásahu při vypnutém režimu ovládní: ujetá vzdálenost a rychlost robota.	92
Obrázek 82 – Vliv externího zásahu při zapnutém režimu ovládní: úhel a akční zásah....	92
Obrázek 83 – Vliv externího zásahu při zapnutém režimu ovládní: ujetá vzdálenost a rychlost robota.	93
Obrázek 84 – Vliv řídicího povelu z mobilní aplikace na změnu cílového úhlu.....	94
Obrázek 85 – Vliv řídicího povelu z mobilní aplikace na změnu rychlosti a ujeté vzdálenosti	95
Obrázek 86 – Chyba vzniklá při otáčení robota kolem své osy.....	95
Obrázek 87 – Pohyb robota kolem své osy vlivem dálkového ovládní (zatačení)	96
Obrázek 88 – Změna velikosti úhlu vlivem zapnutí ovládacího režimu	97
Obrázek 89 – Vliv zapnutí ovládacího režimu na vzdálenost	97
Obrázek 90 – Přílnavost kol na linoleu.....	98
Obrázek 91 – Přílnavost kol na dlažbě	98
Obrázek 92 – Vliv změny parametru Kd u PD regulátoru stability na chování robota	99
Obrázek 93 - Vliv změny parametru Kp u PD regulátoru stability na chování robota.....	100

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Fyzikální veličiny a parametry výše vyobrazeného robota	23
Tabulka 2 – Statické a dynamické parametry snímačů [31]	40
Tabulka 3 – Rozměry a hmotnosti prvků robota	81
Tabulka 4 – Přehled komponent robota a jeho cenová náročnost	102

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Program Arduino Nano – MBalance_V8_5.ino a knihovna MPU6050

Příloha P II: Soubory mobilní aplikace – složka Aplikace (.apk, .aia)

Příloha P III: Soubory modelů – složka 3D (STL souborů a renderovaných obrázků)

Příloha P IV: Soubory grafiky – schémata zapojení, grafika (.png, .ai)

Příloha P V: Soubory simulace – schémata zapojení simulace

Příloha P VI: Naměřená data – soubor Data.xlsx