

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**NÁVRH A KONSTRUKCE PRŮZKUMNÉHO
ČTYŘNOHÉHO MOBILNÍHO ROBOTY**

Martin Svoboda

Diplomová práce

2024

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Svoboda**
Osobní číslo: **I22195**
Studijní program: **N0714A150005 Automatické řízení**
Téma práce: **Návrh a konstrukce průzkumného čtyřnohého mobilního robota**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a konstrukce průzkumného čtyřnohého mobilního robota, který bude provádět standardní pohybové úkony, bude schopen provádět detekce v okolí a bude schopen provádět pohyb v definovaném prostoru.

V teoretické části diplomové práce bude student zkoumat současné přístupy a technologie v oblasti mobilní robotiky, se zaměřením na čtyřnohé roboty a jejich aplikace v průzkumných misích. Klíčovou pozornost bude věnovat stávajícím kinematickým modelům, mechanismům pohybu a metodám pro autonomní nebo řízenou navigaci. Dále se bude věnovat analýze senzorických systémů používaných pro detekci prostředí, měření vzdálenosti a jejich využití k navigaci. Teoretická část bude také zahrnovat stručné srovnání již existujících průzkumných robotických platforem, identifikaci jejich klíčových vlastností, výhod a omezení.

Praktická část práce se zaměří na konstrukční návrh, volbu vhodných materiálů, komponent a senzorů, a samotnou realizaci konstrukce čtyřnohého robota. Dále se práce bude věnovat vývoji softwarové platformy, která bude řídit pohyb robota, zpracovávat data ze senzorů a implementovat algoritmy pro navigaci a průzkum. Následně student provede experimentální ověření a analýzu schopností robota v různých scénářích. Výsledkem práce bude funkcionality prototypu, jeho testování a technická dokumentace, spolu s diskuzí o dosažených výsledcích a možných směrech budoucího vývoje.

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ONZALEZ, Rafael C. a Richard E. WOODS. *Digital image processing*. Fourth edition. New York: Pearson, [2018]. ISBN 978-013-3356-724.
MAIXNER, Ladislav. *Mechatronika: učebnice*. Brno: Computer Press, [2006]. Učebnice (Computer Press). ISBN 80-251-1299-3.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dominik Štursa**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **8. listopadu 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2024**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji:

Práci s názvem Návrh a konstrukce průzkumného čtyřnohého mobilního robota jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16.5.2024

Bc. Martin Svoboda v. r.

Poděkování

Především bych rád poděkoval své rodině za finanční a psychickou podporu v průběhu celého studia. Dále zasluhuje velký dík firma Hitachi Energy Czech Republic s.r.o., která mi poskytla finanční prostředky pro vytvoření této práce. A na konec bych vyjádřil vděk panu Ing. Dominiku Štursovi. za odborný dohled a rady při vedení mé diplomové práce.

V Pardubicích dne 16. 05. 2024

Bc. Martin Svoboda

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá řešením problému návrhu a konstrukce mobilního robota, který má čtyři nohy. Práce také řeší problematiku kompletního softwarové platformy pro řízení tohoto robota. Je zhotoven funkční model s názvem EQR (Explorer Quadruped Robot), který je osazen kamerou pro zobrazení obrazu prostoru, ve kterém se pohybuje zpět k uživateli a díky své sensorice je schopen se autonomně pohybovat v předem definovaném prostoru a provádět detekce překážek v okolí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Čtyřnohé roboty, design a konstrukce, mobilní roboty, kinematika čtyřnohých robotů, senzory, 3D tisk

TITLE

Design and construction of an exploratory four-legged mobile robot

ANNOTATION

The diploma thesis focuses on the design and construction of a mobile robot with four legs. The thesis also investigates the problem of a complete software platform for controlling this robot. A working model of the robot called EQR (Explorer Quadruped Robot) is made, which is equipped with a camera to display an image of the space in which it moves back to the user and due to its sensors it is able to move autonomously in a predefined space and perform obstacle detection in the environment.

KEYWORDS

Four-legged robots, design and construction, mobile robots, kinematics of four-legged robots, sensors, 3D printing

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ.....	11
SEZNAM ILUSTRACÍ	12
SEZNAM TABULEK.....	15
ÚVOD	16
1 MOBILNÍ ROBOTIKA SE ZAMĚŘENÍM NA ČTYŘNOHÉ ROBOTY	17
2 KINEMATICKÝ MODEL	17
2.1 Základní principy kinematiky	18
2.1.1 Kinematický řetězec.....	18
2.1.2 Transformační matice	18
2.2 Druhy kinematických modelů.....	19
2.2.1 Paralelní	19
2.2.2 Sériové	20
3 MECHANISMY POHYBU	21
3.1 Stejnoseměrné motory	21
3.1.1 Princip činnosti	21
3.1.2 Komutátorové DC motory (Brushed)	21
3.1.3 BLDC motory	22
3.1.4 Servomotor.....	24
3.2 Pneumatické pohony	26
4 NAVIGACE A PLÁNOVÁNÍ CESTY	27
4.1 Řízená Navigace	27
4.1.1 Teleoperace	28
4.2 Autonomní navigace	29
4.2.1 Navigace dle algoritmu	29
4.2.2 Laserová navigace.....	29

4.2.3	vSLAM navigace	30
4.3	Plánování cesty	30
4.3.1	Dijkstrův algoritmus	31
4.3.2	A* algoritmus.....	32
4.3.3	RRT algoritmus.....	33
5	POHYB ROBOTY.....	34
5.1	Chůze	34
5.2	Klus	35
6	SENZORICKÝ SUBSYSTÉM.....	36
6.1	Senzory vzdálenosti	36
6.1.1	IR senzory	36
6.1.2	Sonary	39
6.1.3	LiDAR.....	40
7	ŘÍDICÍ SYSTÉM.....	41
7.1	Řídicí jednotka	41
7.1.1	Arduino	41
7.1.2	Raspberry pi	44
8	EXISTUJÍCÍ PLATFORMY	45
8.1	SPOT.....	45
8.2	ANYmal.....	46
8.3	Unitree GO.....	48
9	NÁVRH KONSTRUKCE.....	50
9.1	Volba vhodného materiálu	50
9.2	Pohon	51
9.3	Klouby.....	53
9.3.1	Servopáky.....	53
10	Konstrukční řešení	57

10.1	Tělo	57
10.2	Zadní část	60
10.3	Přední část	61
10.4	Koncepce nohy	63
10.4.1	Stehenní část	63
10.4.2	Holenní část	64
11	ELEKTRONIKA	67
11.1	Napájení	68
11.2	Servo driver	72
11.3	Řídicí jednotka	74
11.4	Senzor vzdálenosti	75
11.5	Kamera	77
11.6	Osvětlení cesty robota	79
12	SOFTWARE	80
12.1	Chůze	81
12.1.1	Generace trajektorie	82
12.1.2	Inverzní kinematika	85
12.1.3	Převod úhlů na pulsy	88
12.1.4	Detekce v okolí	90
13	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ A ANALÝZA	91
13.1	Ověření inverzní kinematiky	91
13.2	Ověření trajektorie kroku	93
13.3	Ověření detekce	96
14	ZÁVĚR	100
	POUŽITÁ LITERATURA	101

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

<i>DOF</i>	stupeň volnosti
<i>PWM</i>	pulzně šířková modulace
DC	stejnoseměrný
GND	uzemnění
RPM	otáčky za minutu
BLDC	bezkartáčový DC motor
ss	souřadný systém
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
vSLAM	Visual SLAM
PP	pravá přední noha
PZ	pravá zadní noha
LP	levá přední noha
LZ	levá zadní noha
IR	infračervený (infra red)
Uz	Ultrazvukový
AI	Umělá inteligence
USmin	minimální délka impulsu servomotoru v mikrosekundách.
USmax	maximální délka impulsu servomotoru v mikrosekundách.
L1	Délka článku kyčle
L2	Délka článku stehna
L3	Délka článku holeně
K1	Kloub 1 (kyčelní)
K2	Kloub 2 (stehenní)
K3	Kloub3 (holenní)
a1	Úhel kyčelního kloubu
a2	Úhel stehenního kloubu
a3	Úhel holenního kloubu
IK	Inverzní kinematika
FK	Dopředná kinematika

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

A	jednotka elektrického proudu, A
V	jednotka napětí, V
D	Střída PWM, %
f	frekvence, Hz
mm	milimetr
Us	mikrosekunda
m	metr
cm	centimetr
I	elektrický proud
U	Napětí
VCC	Napájecí napětí
V+	Napájení servo motorů
sin	Sinus
cos	Cosinus
tan	Tangent
\tan^{-1}	Arkustangent

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr.2.1 – Kinematický řetězec nohy	18
Obr.2.2 – Paralelní kinematický model	19
Obr.2.3 – Sériový kinematický model	20
Obr.3.1 – Komutátorový DC motor	22
Obr.3.2 – BLDC motor s rozběhem a doběhem	23
Obr.3.3 – Hlavní části BLDC motoru	23
Obr.3.4 – Blokové schéma servomotoru s potenciometrem	25
Obr.3.5 – Vliv šířky PWM na polohu servo motoru.....	26
Obr.3.6 – Zobrazení sil v pneumatickém válci	26
Obr.4.1 – Vpravo LiDAR navigace, vlevo vSLAM	30
Obr. 4.2 – Zobrazení výsledku algoritmu, nejkratší cesta ACEG (Stránský, 2018).....	32
Obr. 4.3 – Plánování cesty pomocí algoritmu A*(Yang,2013)	33
Obr.4.4 – RRT algoritmus od startu do konce (La Valle, Nedatováno)	34
Obr.5.1 – Časování pozice nohy během chůze (Liang, 2013)	35
Obr.5.2 – rozdíl časování mezi chůzí a klusem	36
Obr.6.1 – Princip detekce překážky IR senzorem (Novák, 2005)	37
Obr.6.2 – Princip měření triangulační metodou (Novák, 2005)	38
Obr.6.3 – Senzor GP2Y0A21YK0F (SHARP, 2006).....	38
Obr.6.4 – Sonar HCSR04 (HADEX, nedatováno).....	39
Obr.6.5 – LiDAR senzor DTOF LD19 (DFROBOT, nedatováno)	40
Obr.7.1 – Arduino Uno (Voda, 2017).....	42
Obr.7.2 – Vývojové prostředí Arduino IDE	43
Obr.7.3 – Raspberry pi.....	44
Obr.8.1 – Robot SPOT s termální kamerou na rozvodně VN (Boston Dynamics.....	45
Obr.8.2 – Robot ANYmal od ANYbotics (ANYbotics).....	47
Obr.8.3 – Robot Unitree GO (Unitree)	49
Obr.9.1 – Servomotor CLS3838MED (FLASHHOBBY)	51
Obr.9.2 – Technické specifikace a rozměry servomotoru (FLASHHOBBY)	52
Obr.9.3 – 3D model větší servopáky.....	53
Obr.9.4 – 3D model menší servopáky.....	53
Obr.9.5 – Pouzdro pro servomotor kyčelního kloubu.....	54
Obr.9.6 – Čep pro zajištění kyvné funkce kloubu.....	54

Obr.9.7 – Kluzné ložisko IGUS(IGUS)	55
Obr.9.8 – Sestava 3D modelu kyčelního kloubu	55
Obr.9.9 – Spojení(kloub) s menší servopákou	56
Obr.9.10 – Závitová zatahovací vložka	56
Obr.10.1 – Tělo robota.....	57
Obr.10.2 – Tělo robota zespodu s akumulátorem	58
Obr.10.3 – Tělo robota zespodu s krytem baterie	58
Obr.10.4 – Tělo robota s krytem elektroniky	59
Obr.10.5 – Zadní část robota.....	60
Obr.10.6 – Zadní část z pohledu zepředu.....	60
Obr.10.7 – Přední část robota.....	61
Obr.10.8 – „Hlava“ robota	61
Obr.10.9 -Sestava hlavy robota.....	62
Obr.10.10 – Stehenní část nohy zepředu.....	63
Obr.10.11 – Stehenní část nohy zezadu	64
Obr.10.12 - holenní část nohy	64
Obr.10.13 – 3D model gumového silentbloku.....	65
Obr.10.14 – Celá sestava koncepce nohy	65
Obr.10.15 – 3D model celého robota.....	66
Obr.10.16 – Celková vytištěná a osazená sestava EQR.....	66
Obr.11.1 – Blokové schéma zapojení elektroniky robota.....	67
Obr.11:2 – Li-Pol baterie (BigHobby).....	68
Obr.11.3 – DC/DC převodník RPM 5.0-3.0-CT (RECOM, 2021).....	70
Obr.11.4 – Schéma zapojení převodníku RPM (RECOM, 2021).....	70
Obr.11.5 – Graf účinnosti v závislosti na zatížení (RECOM, 2021)	71
Obr11:6 - závislost úbytku napětí na zátěži výstupu (RECOM,2021)	71
Obr.11.7 – Servo driver Adafruit PCA9685 (ADAFRUIT, nedatováno).....	72
Obr.11.8 – Schéma zapojení modulu a propojení s řídicí jednotkou (ADAFRUIT, nedatováno).....	73
Obr.11.9 – Raspberry pi 4B (RASPBERRYPI, nedatováno)	74
Obr.11.10 – UZ senzor vzdálenosti HCSR04 (ELECTFREAKS, nedatováno).....	75
Obr.11.11 – Časový průběh UZ senzoru HCSR04 (ELECTFREAKS, nedatováno).....	76
Obr.11.12 – RPI camera 3 wide (RASPBERRYPI, 2023)	77
Obr.11.13 – Flex kabel pro připojení kamery (RPISHOP).....	78

Obr.11.14 – Neopixel ring 8 (Dratek).....	79
Obr.12.1 – Základní vývojový diagram softwaru	80
Obr.12.2 – Vývojový diagram algoritmu chůze	81
Obr.12.3 – Počáteční body pro výpočet trajektorie	82
Obr:12.4 – Trajektorie pro jeden krok	84
Obr:12.5 – Kinematický model čtyřnohého robotu EQR	85
Obr.12.6 – Upravený kinematický model pro a3	86
Obr.12.7 – Upravený kinematický model pro a2	87
Obr.12.8 – Vývojový diagram detekce v okolí.....	90
Obr.13.1 – Ověření IK pro souřadnice $x = 20.0$ a $z = -200.0$	92
Obr.13.2 – Ověření FK pro x a z stejné jako na obr.13.1	92
Obr.13.3 – Ověření FK pro $x = -50$ a $z = -200$	92
Obr.13.4 – Ověření IK pro $x = -50$ a $z = -200$	93
Obr.13.5 – Trajektorie kroku s parametry z tab13.1	94
Obr.13.6 – Trajektorie kroku s parametry z tab13.2	95
Obr.13.7 – Snímek z kamery s vyznačenými ROI.....	96
Obr.13.8 – Vstupní obraz převeden na stupně šedi.....	97
Obr.13.9 – Aplikace Gaussova filtru	98
Obr.13.10 – Adaptivní prahování	98
Obr.13.11 – Výsledný snímek z kamery s detekovanými překážkami.....	99

SEZNAM TABULEK

Tab.6.1 – Vliv teploty vzduchu na rychlost šíření zvuku	39
Tab.7.1 – Popis součástek a pinů (Svoboda, 2022)	42
Tab.7.1 – Popis součástek a pinů	43
Tab.8.1 – Technické informace SPOTU	46
Tab.8.2 – Technické specifikace ANYmalu	47
Tab.8.3 – Technické údaje Unitree GO	48
Tab.8.4 – Srovnání všech výše zmíněných robotů.....	49
Tab.9.1 – Vlastnosti ASA	50
Tab.11.1 – Technické parametry Li-Pol baterie (FlashHobby)	68
Tab.11.2 – Technické parametry napěťového převodníku (RECOM, 2021)	71
Tab.11.3 – Technické parametry modulu PCA9685 (ADAFRUIT, nedatováno)	72
Tab.11.4 – Technické parametry Raspberry pi 4B (RASPBERRY,2024)	74
Tab.11.5 – Technické údaje senzoru HCSR04 (ELECTFREAKS, nedatováno).....	75
Tab.11.6 – Technické specifikace RPI cam 3 Wide (RASPBERRYPI, 2023).....	78
Tab.11.7 – Technické specifikace Neopixel ring 8 (ECLIPSE, 2021).....	79
Tab.12.1 – Parametry pro výpočet počátečních bodů.....	82
Tab.12.2 – Parametry nohy	85
Tab.13.1 – Parametry kroku pro obr.13.4.	93
Tab.13.2 – Parametry kroku pro obr.13.6.	95

ÚVOD

Čtyřnohé roboty jsou roboty se čtyřmi koncovými efekty (nohami) používané pro pohyb v terénu. Tento typ robotů je inspirován přírodou, kde žije mnoho čtyřnohých zvířat, jako jsou psi, kočky, koně apod. Čtyřnozí roboti mají oproti jiným typům robotů několik výhod, včetně stability, obratnosti a přizpůsobivosti. Na druhou stranu mají také nevýhody, jako je složitější konstrukce, ovládání, snímání a spotřeba energie.

Takoví roboti představují fascinující oblast robotiky s velkým potenciálem pro nejrůznější aplikace. Jejich schopnost pohybovat se v obtížném terénu a překonávat překážky je předurčuje k plnění úkolů, které jsou pro člověka obtížné nebo nebezpečné, jako jsou průzkumné mise a záchranné operace.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou návrhu a konstrukce průzkumného čtyřnohého mobilního robota. Cílem této práce je navrhnout konstrukci robota a také jeho softwarovou platformu pro řízení, který bude osazen senzorickými systémy pro detekci a navigaci v předem definovaném prostředí

1 MOBILNÍ ROBOTIKA SE ZAMĚŘENÍM NA ČTYŘNOHÉ ROBOTY

Mobilní robotika je rychle se rozvíjející obor, který se zaměřuje na vývoj robotů schopných samostatného pohybu v neznámém prostředí. V posledních letech se pozornost zaměřuje na čtyřnohé roboty, které se vyznačují stabilitou, flexibilitou a schopností překonávat různé terénní překážky. Čtyřnohé roboty jsou navrhovány na základě jejich schopnosti přizpůsobit se různým terénním podmínkám. Jejich mechanická konstrukce a kinematika jim umožňují pohybovat se v nerovném a obtížném terénu, kde by běžné kolové a bipední roboty mohly selhat. Tato schopnost čtyřnohých robotů je klíčová při průzkumu těžko přístupných oblastí, jako jsou lesy, skalnatý terén nebo oblasti postižené přírodními katastrofami.

Hlavním klíčovým prvkem u těchto robotů je jejich sensorika, která je zapotřebí k autonomnímu pohybu v terénu. Například senzory vzdálenosti, kamery, lidary a další jsou hojně využívány k detekci překážek a mapování okolního prostředí a orientaci robota v reálném čase, aby byl schopen rozhodovat a reagovat zcela autonomně v neznámém prostředí.

Při průzkumu neznámého a nebezpečného prostředí může svou roli hrát také umělá inteligence, na jejímž základě jsou implementovány algoritmy, které se adaptují na různé nepředvídatelné podmínky a situace, které by mohli nastat.

V dnešní době již čtyřnohé roboty mají svou roli v různých oblastech, ať už se jedná o průzkumné aplikace, kde mohou tyto roboty dopravovat materiál do oblastí, které jsou pro člověka nebezpečné nebo nepřístupné, prozkoumávat neznámý terén a mapovat neznámé prostředí nebo například pomoci zachraňovat a vyhledávat osoby v oblastech postižených katastrofou.

2 KINEMATICKÝ MODEL

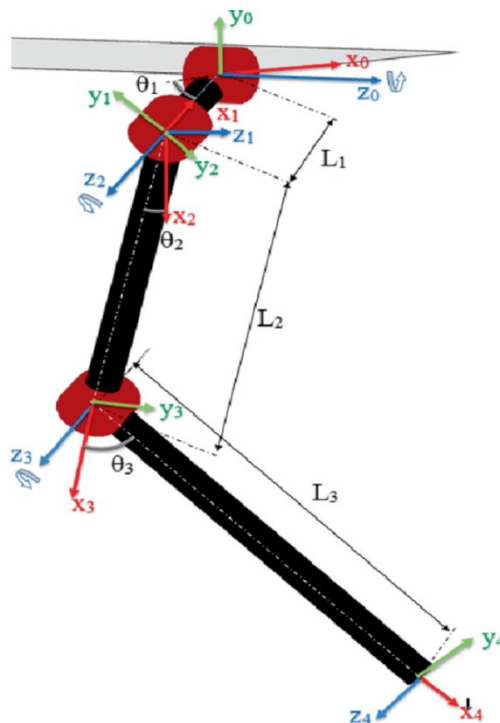
Kinematika čtyřnohých robotů se zabývá studiem pohybu robotových nohou a těla v prostoru. Obecně se jedná o matematický popis pohybu nohou a těla robota v prostoru. Kinematický model závisí na počtu kloubů neboli počtu stupňů volnosti tzv. DOF (degrees of freedom) a jejich uspořádání, které spojují jednotlivé segmenty robota. Kinematické modely jsou důležité pro návrh, konstrukci, řízení a optimalizaci robotů pro různé aplikace a prostředí, například pro výpočet trajektorií nohou, stabilizaci těla nebo vyhýbání se překážkám.

2.1 Základní principy kinematiky

Kinematické modely čtyřnohých robotů jsou založeny na principech kinematiky, což je odvětví mechaniky, které se zabývá pohybem těles bez ohledu na síly, které ho způsobují.

2.1.1 Kinematický řetězec

Čtyřnohý robot lze modelovat jako kinematický řetězec, což je systém vzájemně propojených článků. Každý článek robota představuje článek v kinematickém řetězci a klouby robota představují spoje mezi články. Viz. Obr.2.1, kde červené tvary jsou klouby nohy a černé čáry jsou segmenty nohy.



Obr.2.1 – Kinematický řetězec nohy

2.1.2 Transformační matice

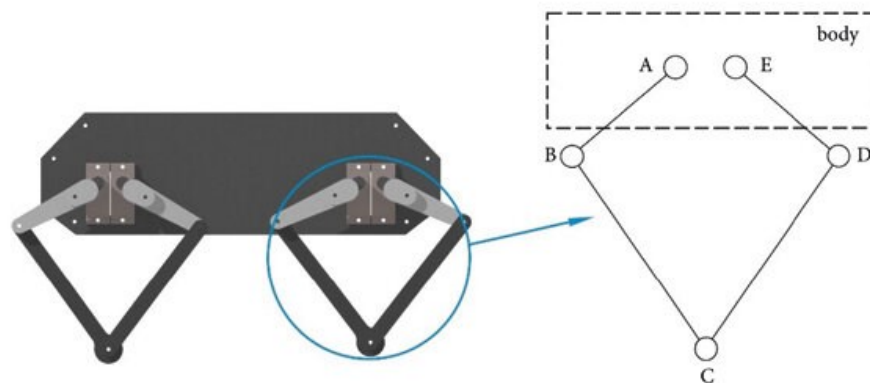
Transformační matice se používají k reprezentaci polohy a orientace článků v kinematickém řetězci. Transformační matici lze použít k výpočtu polohy a orientace libovolného bodu v robotově těle vzhledem k referenčnímu bodu. Transformační matice se skládá z 3x3 matice rotace a trojrozměrného vektoru translace. Matice rotace reprezentuje orientaci objektu v prostoru a vektor translace reprezentuje polohu objektu v prostoru (skládá se ze tří složek x, y, z).

2.2 Druhy kinematických modelů

Kinematické modely lze rozdělit podle několika kritérií jako jsou například druhy kinematiky těchto robotů (paralelní, sériové) nebo způsobu popisu. Kinematické modely těchto robotů lze popisovat dvěma nejčastějšími způsoby, a to geometricky anebo Denavit-Hartenbergovou konvencí. Geometrický model používá geometrické tvary, jako jsou body, čáry a roviny, k popisu kinematiky robota. Je to intuitivnější model než D-H model, ale může být obtížnější ho vypočítat, zatímco D-H parametrický model používá parametry, jako je délka vazby, úhel úhlu a úhel natočení, k popisu kinematiky robota. Je to poměrně jednoduchý model, ale může být obtížné ho použít pro složitější roboty.

2.2.1 Paralelní

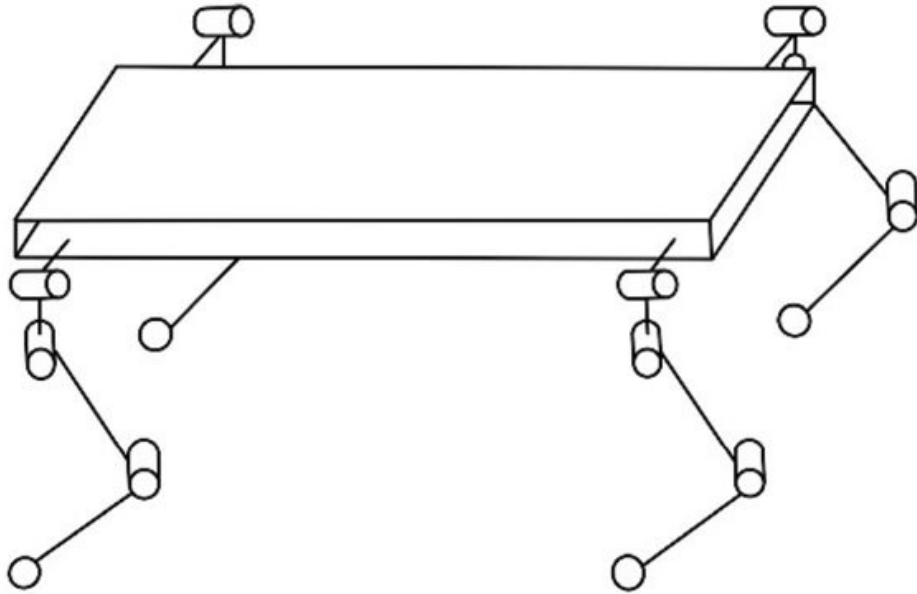
Kinematický model paralelního robota, který je znázorněn na obr.2.2, je založen na principu paralelní kinematiky, kde jsou všechny pohyblivé části robota (obvykle koncový efektor nebo platforma), podporovány a řízeny několika nezávislými kinematickými řetězci. Tento typ robota je známý pro svou vysokou tuhost, přesnost a schopnost vykonávat složité pohyby s vysokou opakovatelností.



Obr.2.2 – Paralelní kinematický model

2.2.2 Sériové

Sériový kinematický model čtyřnohých robotů popisuje uspořádání, kde jsou segmenty a klouby spojeny za sebou v lineární posloupnosti viz. Obr.2.3. Tento model je typický pro většinu robotických ramen, ale lze jej aplikovat i na čtyřnohé roboty, kde každá noha funguje jako samostatný sériový kinematický řetězec.



Obr.2.3 – Sériový kinematický model

3 MECHANISMY POHYBU

Mechanismus pohybu je systém, který umožňuje čtyřnohému robotovi pohybovat se. Skládá se z motoru, převodovky a dalších komponent, které přenášejí sílu z motoru na klouby robota.

3.1 Stejnoseměrné motory

Podle (Novák, 2005). Stejnoseměrný (DC) motor je elektromotor který využívá stejnoseměrný proud k napájení a vytváření rotačního pohybu. V mobilní robotice se využívá kvůli svému příznivému poměru výkon/hmotnost, relativně snadnému řízení otáček a také kvůli své ceně a dostupnosti. Tento motor pracuje na vysokých otáčkách a malém kroutícím momentu což je řešeno převodovkou, která je většinou již součástí motoru.

3.1.1 Princip činnosti

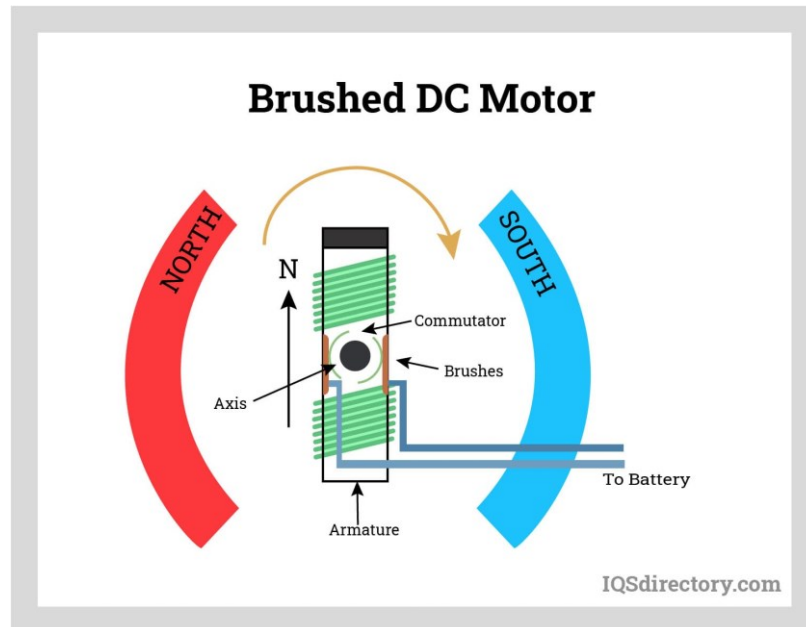
DC motor funguje na principu interakce magnetického pole s proudem protékajícím cívkou. Magnetické pole je generováno permanentním magnetem a cívka je umístěna uvnitř magnetického pole. Když je do cívky přiveden stejnoseměrný proud, vznikne v ní magnetické pole, které interaguje s magnetickým polem permanentního magnetu. Tato interakce vytváří sílu, která působí na cívku a způsobuje její otáčení.

Směr otáčení cívky závisí na směru proudu. Pokud se směr proudu obrátí, cívka se bude otáčet opačným směrem. Rychlost otáčení cívky (otáčky za minutu, RPM) závisí na síle proudu a síle magnetického pole. Stejnoseměrné motory lze dále dělit do několika skupin pro využití v mobilní robotice jsou 2 hlavní, a to bezkartáčové a kartáčové.

3.1.2 Komutátorové DC motory (Brushed)

Funkce komutátorového motoru viz. obr.3.1 je založena na alternaci polarity elektrického proudu, který je přiváděn k rotoru prostřednictvím komutátoru a uhlíkových kartáčů. Rotor, skládající se z několika elektromagnetů navinutých na pólových jádrech, obvykle obsahuje tři elektromagnety pro prevenci zaseknutí. Rychlost otáčení rotoru je regulována pomocí napětí, často s využitím PWM (Pulzně Šířkové Modulace), kde efektivní hodnota napětí je odvozena z frekvence střídání stavů zapnuto/vypnuto. Tento způsob regulace může produkovat elektromagnetický šum, který je třeba eliminovat použitím filtrů nebo vysokých spínacích frekvencí. Pro ochranu cívky před indukovanými špičkami napětí je

zapojena ochranná dioda. Vyšší spínací napětí umožňuje rychlejší nabíjení cívky a tím i větší okamžitý točivý moment. Komutátorové motory jsou však omezeny ve své účinnosti kvůli přítomnosti komutátoru, který limituje maximální proud a napětí, a proto nedosahují účinnosti BLDC nebo AC motorů.



Obr.3.1 – Komutátorový DC motor

3.1.3 BLDC motory

Bezkartáčové stejnosměrné motory jsou synchronní motory s permanentními magnety, které jsou poháněny stejnosměrným proudem a řízeny elektronickým komutačním systémem. Tento systém vytváří točivý moment změnou fázových proudů, což umožňuje motoru pracovat efektivněji a s vyšší přesností. Motory jsou také známé jako synchronní motory s permanentními magnety a jsou oblíbené pro svou vysokou účinnost a dlouhou životnost.

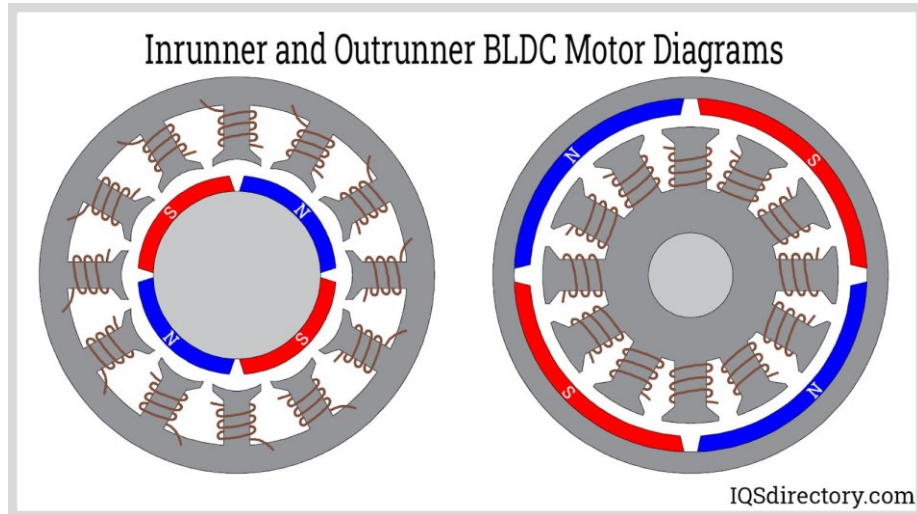
Elektrická komutace motorem BLDC je to, co jej odlišuje od kartáčovaných stejnosměrných motorů, které pracují na základě mechanického kontaktu na rotoru. Motor BLDC obsahuje magnetický rotor a stator se sekvencí cívek. Permanentní magnet se otáčí, zatímco vodiče vedoucí proud jsou pevně umístěny.

Cívky kotvy jsou elektronicky spínány tranzistory ve správné poloze rotoru. Vzniklá síla způsobuje otáčení rotoru. Polohu rotoru snímají Hallovy snímače, které jsou umístěny na statoru. Zpětná vazba polohy rotoru ze snímačů určuje, kdy se má spínat proud kotvy.

Konstrukce bezkartáčových stejnosměrných motorů eliminuje potřebu kartáčů a činí motory BLDC tiššími a spolehlivějšími s účinností 85 až 90 %. Eliminace kartáčů odstraňuje

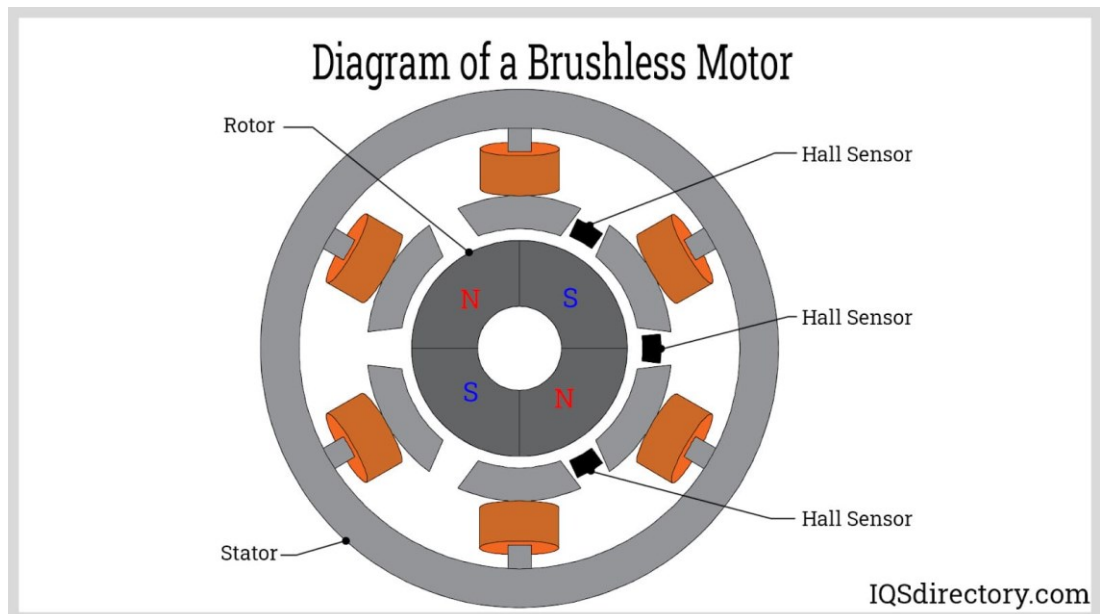
opotřebení, ke kterému dochází u kartáčů, protože rotující magnet produkuje jen velmi málo tepla.

Motory BLDC mohou být bezkartáčové s rozběhem nebo s doběhem, přičemž bezkartáčový motor s rozběhem má permanentní magnety uvnitř elektromagnetů, zatímco motor s doběhem má permanentní magnety mimo elektromagnety což lze vidět na obr.3.2. Princip činnosti je u obou konstrukcí stejný, liší se však konfigurací.



Obr.3.2 – BLDC motor s rozběhem a doběhem

Na obrázku 3.3 lze vidět hlavní části BLDC motoru, které jsou pak popsány níže pod obrázkem.



Obr.3.3 – Hlavní části BLDC motoru

Stator vytváří magnetickou sílu, která způsobuje otáčení rotoru bezkartáčového stejnosměrného motoru. Je buď uvnitř rotoru a je jím obklopen, nebo vně rotoru. Stator se skládá z vrstvených ocelových výlisků poskládaných dohromady a tvořících magnetické jádro. Kolem jádra jsou navinuty cívky drátu, které jsou připojeny k regulátoru.

Kusy oceli statoru mohou být drážkované nebo bez drážkové, přičemž bez drážková jádra jsou schopna vyrábět vysokootáčkové motory díky nízké indukčnosti, přičemž tato konstrukce je dražší, protože vyžaduje více závitů cívek.

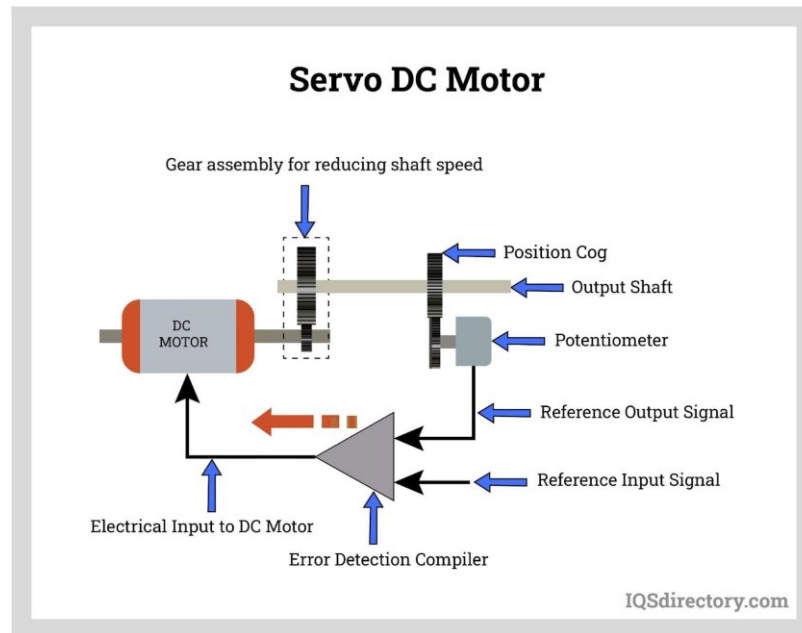
Rotor obsahuje permanentní magnet se dvěma až osmi páry pólů se střídavými jižními a severními póly. Magnetický materiál rotoru se pečlivě vybírá, aby se dosáhlo požadované hustoty magnetického pole. Typy magnetů pro rotor mohou být feritové nebo neodymové.

Různé konfigurace jádra jsou kruhové s permanentními magnety na obvodu nebo kruhové s obdélníkovými magnety.

Hallovy snímače synchronizují buzení kotvy statoru snímáním polohy rotoru. Komutace motorů BLDC je řízena elektronicky, což způsobuje postupné buzení statorového vinutí za účelem otáčení rotoru. Předtím, než je vinutí uvedeno do chodu, identifikuje Hallův snímač polohu rotoru. Většina motorů BLDC má tři Hallovy snímače, které jsou umístěny ve statoru. Každý ze snímačů generuje nízký a vysoký signál, když v jejich blízkosti projdou póly rotoru.

3.1.4 Servomotor

Servomotor je elektromotor s integrovanou zpětnou vazbou, která mu umožňuje otáčet se o přesný úhel nebo dosáhnout specifické polohy. Na rozdíl od běžných motorů, které se otáčejí, dokud nejsou vypnuty nebo nenarazí na odpor, servomotory dokážou udržet požadovanou polohu i po vypnutí napájení. Toho je dosaženo pomocí zpětné vazby, která porovnává aktuální polohu motoru s požadovanou polohou a automaticky upravuje úhel otáčení motoru tak, aby se dosáhlo shody. Skládá ze čtyř částí: stejnosměrného motoru, převodovky, řídicího obvodu a jednotky pro snímání polohy, lze vidět na obr.3.4, u průmyslových servomotorů je snímačem zpětné vazby polohy obvykle vysoce přesný enkodér, zatímco u menších RC nebo hobby serv je snímačem polohy obvykle jednoduchý potenciometr. Převodovka mění vysoké vstupní otáčky na nižší praktické otáčky. Řídicí obvod je zesilovač s detektorem chyb. Poloha hřídele poskytuje zpětnou vazbu řídicímu obvodu a je v uzavřené smyčce. U stejnosměrného servomotoru se v případě nesouladu mezi aktuální polohou hřídele a jeho referenční polohou vyše do zesilovače detekujícího chyby chybový signál.

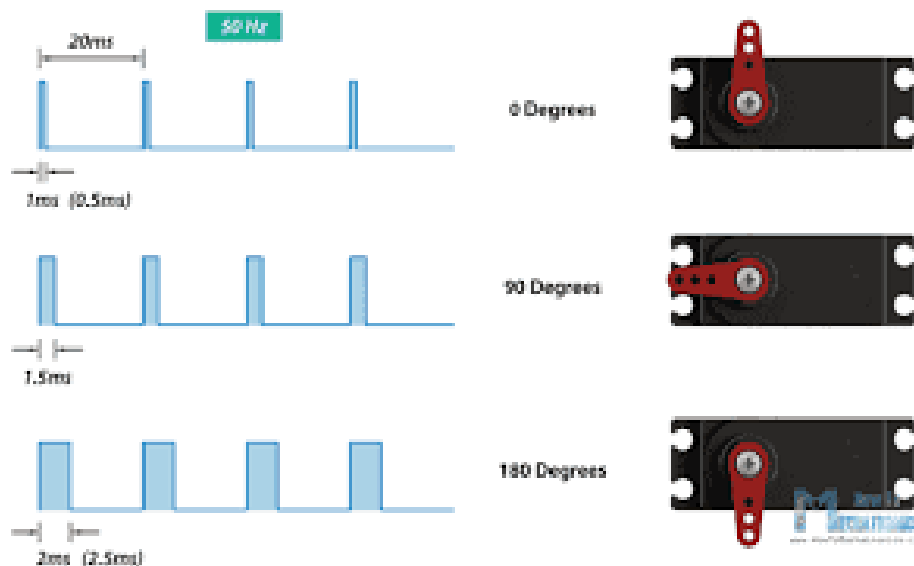


Obr.3.4 – Blokové schéma servomotoru s potenciometrem

Servomotory se dále dělí na analogové a digitální, jak už z názvu je patrné, že rozdílem mezi analogovými a digitálními servomotory je způsob, jakým přijímají a zpracovávají řídicí signály.

Analogové servomotory jsou řízeny pomocí analogového signálu ve formě napětí nebo proudu. Přijímají signál, který určuje rychlost nebo pozici motoru. Využití pro tento typ servomotoru lze nalézt v aplikacích, kde není vyžadována velká přesnost polohy, naopak jsou vhodná pro aplikace, které vyžadují jemné nastavení polohy anebo plynulý pohyb typicky například modelářská letadla a RC modely.

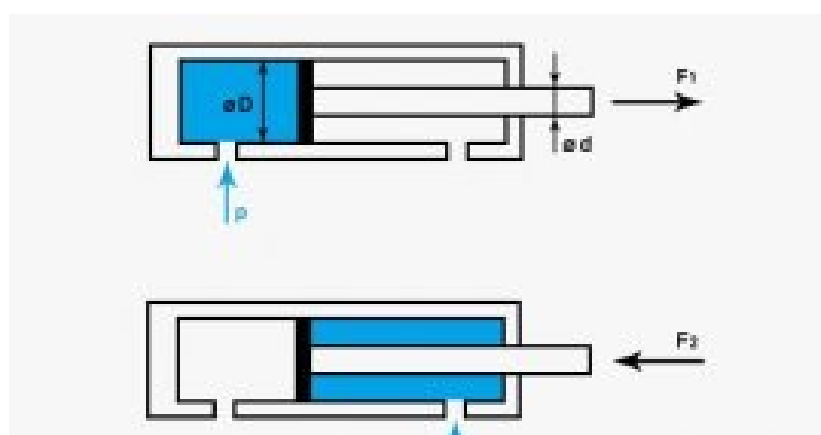
Digitální servomotory jsou řízeny pomocí digitálního signálu často v podobě pulzů PWM (Pulse Width Modulation viz obr.3.5) nebo sériové komunikace. Digitální signály poskytují přesnější a spolehlivější řízení, což umožňuje rychlejší odezvu a vyšší přesnost pozice. Jsou často preferovanou volbou v náročnějších aplikacích, jako jsou CNC stroje, robotika a průmyslová automatizace, kde je klíčové dosáhnout vysoké přesnosti a spolehlivosti.



Obr.3.5 – Vliv šířky PWM na polohu servo motoru

3.2 Pneumatické pohony

Pneumatické pohony fungují na principu tlakové energie stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch se z nádrže uvolňuje do pneumatického válce, kde působí na píst a generuje sílu. Tato síla se poté přenáší na klouby robota a způsobuje jeho pohyb. Mezi hlavní části tohoto typu pohonu patří zejména kompresor, který stlačuje vzduch na požadovaný tlak a tento vzduch je dále uchováván v nádrži na stlačený vzduch pro pozdější použití. Dále pak ventil, který řídí průtok stlačeného vzduchu do pneumatického válce, který je zobrazen na obr.3.6, kde se tlak tohoto stlačeného vzduchu přeměňuje na mechanickou sílu.



Obr.3.6 – Zobrazení sil v pneumatickém válci

4 NAVIGACE A PLÁNOVÁNÍ CESTY

Podle (Novák, 2005). Pokud chceme po robotu, byť jen sebemenší autonomní chování, musí být tento robot vybaven navigačním systémem. Tento systém není vhodný pouze pro autonomní navigaci robota, ale také i pro řízenou. Mezi typické úkoly navigace se řadí zejména poskytnutí informací pro přesun z bodu A do bodu B neboli ze startovního bodu do cílového. Úkoly jsou obvykle omezeny několika podmínkami, jejichž hlavním principem je vyhnout se kolizím s překážkami v dráze robota. Další možností by mohlo být dosáhnout cíle v co nejkratší vzdálenosti a co nejrychleji. Pro efektivní pohyb robota a rychlé dosažení cíle je klíčové určení optimální trajektorie. K tomuto účelu se využívají rozličné algoritmické metody, které zohledňují pohyb robota v prostoru a jeho interakci s okolními překážkami. Aby mohl řídicí systém robota navrhnout správnou cestu, je nezbytné, aby obdržel adekvátní informace o umístění a orientaci robota vzhledem ke globálnímu nebo lokálnímu souřadnicovému systému, stejně jako o konfiguraci prostředí, ve kterém se robot nachází. Navigační systém robota se obvykle skládá ze dvou hlavních složek: Globální navigace a Lokální navigace.

Globální navigační systém má za úkol navigovat robota z počátečního bodu A do cílového bodu B, přičemž se zaměřuje na nalezení nejefektivnější cesty. Tento systém není omezen pouze na světový měřítko, ale je navržen tak, aby pokrýval celý pracovní prostor robota, například v rámci jedné místnosti.

Lokální navigace má přednost před globální navigací a její hlavní funkcí je předcházet střetům s objekty v okolí a zvládat situace, kdy dojde ke kolizi. Tento navigační systém obvykle funguje v ss robota a zabývá se detekcí překážek, které jsou od robota vzdáleny jen omezeně. Tato vzdálenost by měla být dostatečná pro to, aby řídicí systém měl dost času na analýzu překážek a na výběr trajektorie, která nebude v konfliktu s okolními objekty, přičemž se musí zohlednit i fyzické schopnosti robota.

4.1 Řízená Navigace

V řízené navigaci je robot ovládán lidským operátorem, který mu dává pokyny k pohybu. Toho lze dosáhnout pomocí dálkového ovladače, joysticku nebo jiného rozhraní. Řízená navigace je užitečná v situacích, kdy je nutná vysoká přesnost a preciznost pohybu, nebo když je prostředí pro robota neznámé a nepředvídatelné. Existuje několik způsobů implementace řízené navigace u čtyřnohých robotů.

4.1.1 Teleoperace

Teleoperace je metoda ovládání robota na dálku pomocí lidského operátora. Operátor obvykle používá kamerový systém a joystick k zobrazení a ovládání pohybů robota v reálném čase. Teleoperace se běžně používá v situacích, kdy je přímý přístup k robotovi obtížný nebo nebezpečný, jako je například při prozkoumání vesmíru nebo při manipulaci s nebezpečnými materiály.

Základní princip teleoperace spočívá v tom, že robot shromažďuje informace o svém okolí pomocí dat ze sensorů jako jsou kamery, senzory vzdálenost, tlaku a tak dále, tato data se pak přenáší do ovládacího panelu operátora, který zároveň může vidět, kde a jak se robot pohybuje a podle toho ho řídit pomocí joysticku nebo jiných ovládacích prvků na kontrolním panelu.

4.2 Autonomní navigace

Autonomní navigace označuje schopnost robota pohybovat se v prostředí bez nutnosti přímého lidského řízení. Robot se autonomně rozhoduje o své trase, vyhýbá se překážkám a reaguje na změny v okolí. Existuje několik typů této navigace od nejjednodušších jako je jednoduchý algoritmus, který dostane robota z bodu A do bodu B až po složitější, kde je ošetřeno vyhýbání se překážkám, plánování optimální trajektorie a další.

4.2.1 Navigace dle algoritmu

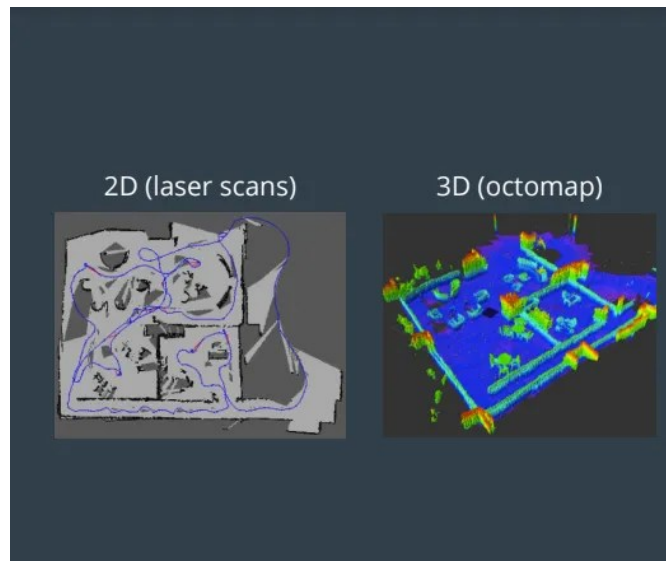
Základní navigace podle algoritmu je nejjednodušší formou autonomní navigace. Robot je naprogramován, aby následoval specifický soubor instrukcí nebo algoritmus, který určuje jeho pohyb od bodu A do bodu B. Tento přístup je často používán v kontrolovaných prostředích, jako jsou továrny nebo laboratoře, kde jsou podmínky stabilní a předvídatelné. Roboti mohou být naprogramováni pro sledování čar na podlaze, reagování na specifické signály nebo vykonávání předem definovaných manévru, aby se vyhnuli překážkám.

4.2.2 Laserová navigace

Laserová navigace je jednou z nejpokročilejších a nejpřesnějších metod autonomní navigace. LiDAR (Light Detection and Ranging) a LDS (Laser Distance Sensor) senzory poskytují detailní 3D mapu prostředí tím, že měří vzdálenost od robota k objektům pomocí odraženého laserového paprsku. Tato technologie umožňuje robotům navigovat s vysokou přesností a je široce využívána v autonomních vozidlech a robotice pro složité úkoly, jako je průzkum neznámých prostředí nebo navigace v proměnlivých podmínkách.

4.2.3 vSLAM navigace

Kamerová navigace (vSLAM) viz obr.4.1 kombinuje data z kamer a dalších senzorů k vytvoření mapy prostředí a k určení polohy robota v něm. Tato metoda je schopna rozpoznávat vizuální značky a orientační body, což robotům umožňuje orientovat se i v komplexních prostředích. Visual SLAM je zvláště užitečný v prostředích, kde tradiční metody mohou selhat, jako jsou zalesněné oblasti nebo městské prostředí s vysokou hustotou objektů.



Obr.4.1 – Vpravo LiDAR navigace, vlevo vSLAM

4.3 Plánování cesty

Plánování cesty (Path planning) je klíčová součást autonomní navigace čtyřnohých robotů. Jedná se o proces, který umožňuje robotovi najít optimální trasu z bodu A do bodu B v daném prostředí s ohledem na překážky, vzdálenost, bezpečnost a další faktory. Jakmile robot zná svoji polohu a cíl, může naplánovat optimální trasu k cíli. To se provádí pomocí různých algoritmů plánování cesty. Algoritmy pro plánování cesty lze zhruba rozdělit do tří kategorií:

První kategorie: Tradiční algoritmy plánování cesty založené na mapě. Patří sem například Dijkstrův algoritmus, A* algoritmus a další. Tyto algoritmy pracují s předem známou mapou prostředí.

Druhá kategorie: Inteligentní algoritmy plánování cesty založené na bionice. Sem spadají například algoritmus PSO (Particle Swarm Optimization – optimalizace rojem částic), genetický algoritmus a metody posilujícího učení. Tyto algoritmy se inspiřují přírodními procesy a dokážou se adaptovat na neznámé prostředí.

Třetí kategorie: Algoritmy plánování cesty založené na vzorkování. Typickým zástupcem je algoritmus RRT (Rapidly-exploring Random Tree – rychle se rozvíjející náhodný strom). Tyto algoritmy pracují s neúplnou znalostí prostředí a postupně jej mapují pomocí náhodného odběru vzorků.

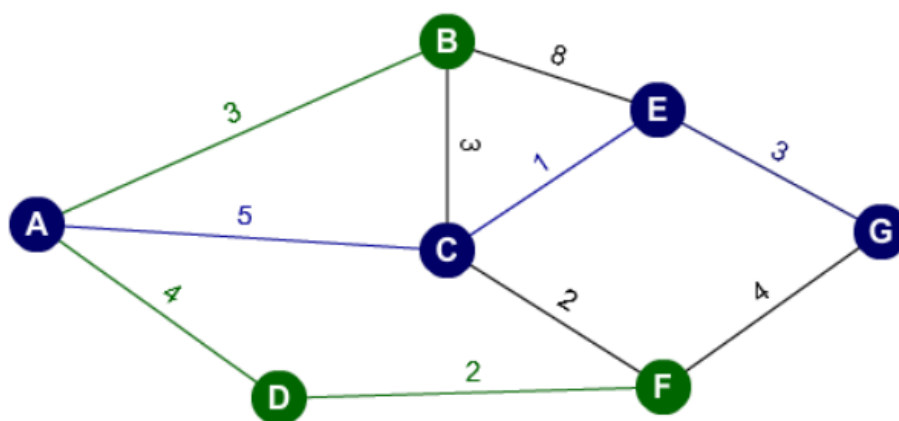
4.3.1 Dijkstrův algoritmus

Je považován za nejefektivnější metodu pro určení nejkratších tras od konkrétního bodu k ostatním bodům v síti bez hran s negativní hodnotou.

Dijkstrův algoritmus lze chápat jako speciální případ prohledávání grafu, kde rozšiřování není řízeno počtem hran vedoucích od počátečního bodu, ale celkovou vzdáleností od tohoto bodu. Vrcholy, pro které byla již určena nejkratší trasa, jsou ponechány beze změny. Algoritmus využívá prioritní frontu, v níž jsou vrcholy seřazeny podle jejich vzdálenosti od počátečního bodu. V úvodní fázi je vzdálenost počátečního bodu nastavena na nulu, zatímco všechny ostatní vrcholy jsou označeny jako nekonečno. Algoritmus pak vybírá z fronty vrchol s nejvyšší prioritou, tedy s nejnižší vzdáleností, a přesouvá ho do skupiny zpracovaných vrcholů. Následně jsou prozkoumávány všichni sousední vrcholy, kteří ještě nebyli zpracováni, a jsou přidáváni do fronty, pokud už v ní nejsou, a kontroluje se, zda se nenacházejí blíže k počátečnímu bodu než předtím. To znamená, že pro všechny sousedy (potomky) platí 4.1.

$$vzdálenost_{zpracovávaný} + délkaHrany_{zpracovávaný,potomek} < vzdálenost_{potomek} \quad (4.1)$$

Pokud je splněna podmínka nerovnosti, přiřadí se nově zjištěná menší vzdálenost k danému potomkovi a jako jeho rodič se označí aktuálně zpracovávaný vrchol. Po zkontrolování všech následníků algoritmus vybírá další vrchol s nejnižší vzdáleností z prioritní fronty a tento proces se opakuje. Algoritmus končí, když byly všechny vrcholy zpracovány, což znamená, že prioritní fronta je prázdná. Konečná cesta je na obr.4.2.



Obr. 4.2 – Zobrazení výsledku algoritmu, nejkratší cesta ACEG (Stránský, 2018)

4.3.2 A* algoritmus

A* algoritmus je heuristický vyhledávací algoritmus, který představuje vylepšení Dijkstrova algoritmu. Do procesu hledání Dijkstrova algoritmu se přidává heuristická funkce. Lze říct, že A* algoritmus je mezi heuristickými vyhledávacími algoritmy nejvýznamnějším. Heuristické vyhledávání využívá speciální pravidla, která pomáhají odhadnout, jak daleko je aktuální pozice od cíle. Díky těmto pravidlům se vyhledávání efektivněji soustředí na směřování k cíli.

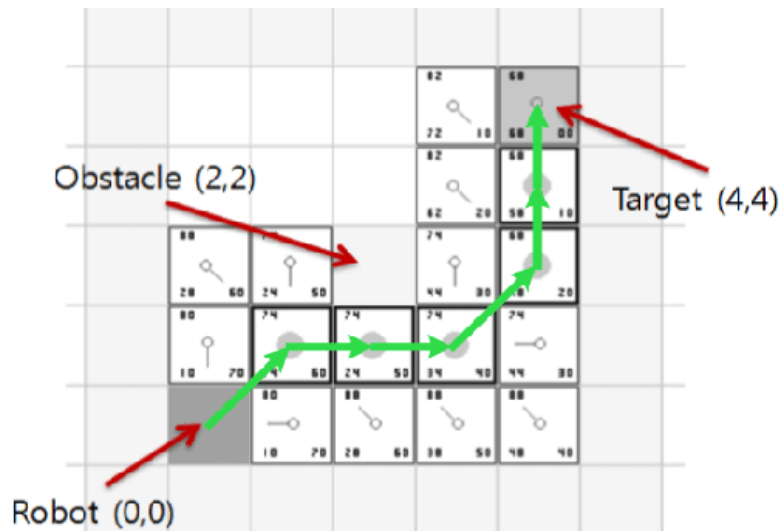
Základní myšlenka A* algoritmu spočívá v zavedení funkce odhadu $f(x)$ pro aktuální uzel x . Funkce odhadu je definována dle 4.2.

$$f(x) = g(x) + h(x) \tag{4.2}$$

Kde $g(x)$ – vzdálenost od počátečního bodu k aktuálnímu uzlu x

$h(x)$ – odhadovaná minimální vzdálenost od uzlu x ke koncovému bodu ($h(x)$ může být například Euklidovská nebo Manhattanská vzdálenost).

A* algoritmus oproti Dijkstrovu algoritmu přidává především vyhodnocovací funkci. Výhodou A* algoritmu je právě zavedení heuristické funkce při zkoumání dalšího uzlu. Díky tomu se výrazně snižuje počet kroků hledání a samotná rychlost hledání se dále zlepšuje. A* algoritmus je proto efektivnější a je široce používán. Plánování cesty pomocí A* algoritmu je k vidění na obr.4.3.



Obr. 4.3 – Plánování cesty pomocí algoritmu A*(Yang,2013)

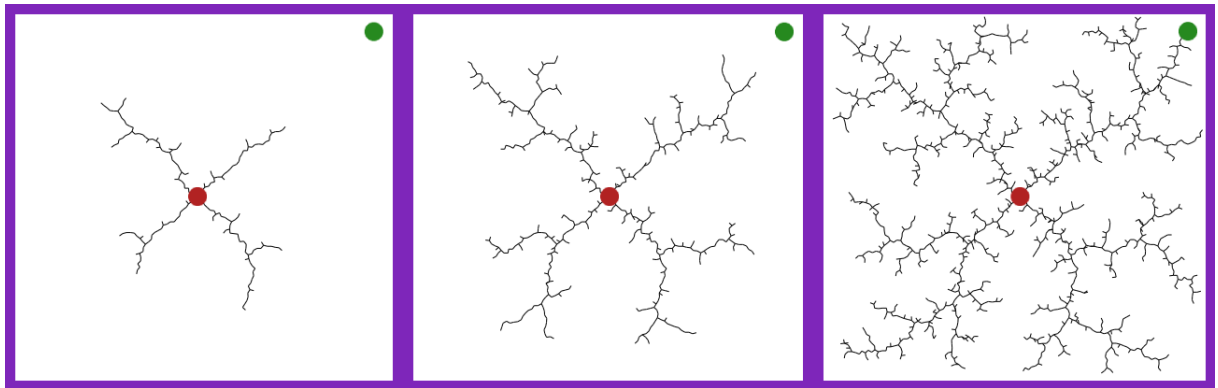
4.3.3 RRT algoritmus

Algoritmus RRT neboli Rapidly-exploring Random Tree, je metoda pro rychlé prozkoumávání prostoru, která generuje stromovou strukturu s výchozím bodem v počátečním nastavení viz obr.4.4. Tento algoritmus používá náhodné body z prostoru, který chce prozkoumat, a snaží se je připojit k nejbližšímu již existujícímu bodu ve stromě. Pokud je možné bod připojit bez porušení pravidel a omezení, je bod přidán do stromu.

Strom se rozrůstá s větší pravděpodobností do oblastí, které jsou nejvíce vzdálené od již prozkoumaných, což odpovídá místům s největší Voronoiovou oblastí. To znamená, že algoritmus má tendenci expandovat do oblastí, které ještě nebyly prozkoumány.

Maximální délka spojení mezi stávajícím bodem ve stromě a novým bodem je omezena takzvaným růstovým faktorem. Pokud je náhodný bod příliš daleko, je místo něj vybrán bod, který je od stromu na maximální povolené vzdálenosti ve směru k náhodnému bodu. Tímto způsobem náhodné body určují směr, kterým strom roste, zatímco růstový faktor omezuje rychlost růstu. Díky tomu algoritmus udržuje svou schopnost vyplňovat prostor, ale zároveň omezuje velikost přírůstku.

Pro zvýšení efektivity algoritmu RRT lze upravit pravděpodobnost výběru bodů z preferovaných oblastí. To se často využívá v praktických aplikacích, kde je potřeba směřovat hledání k cílovým bodům plánovacího problému. Toho lze dosáhnout zahrnutím malé pravděpodobnosti výběru cílového bodu do procesu výběru náhodných bodů. Vyšší pravděpodobnost výběru cílového bodu pak vede k rychlejšímu růstu stromu směrem k cíli.



Obr.4.4 – RRT algoritmus od startu do konce (La Valle, Nedatováno)

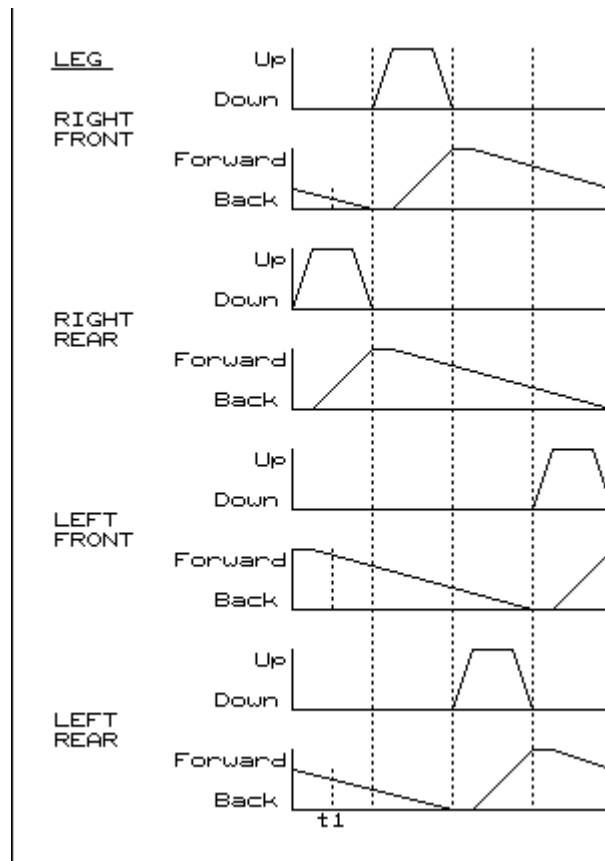
5 POHYB ROBOTA

Pohyb čtyřnohého robota, známý také jako lokomoce robota, zahrnuje sérii složitých procesů, které umožňují robotovi pohybovat se po svém prostředí. Na rozdíl od bipedních robotů, kteří se pohybují na dvou nohách, čtyřnozí roboti využívají čtyři končetiny pro stabilitu a flexibilitu. Pro pohyb robota jsou důležité již výše zmíněné kapitoly, jako je kinematika robota, pohon, řízení, plánování cesty(trajektorie), navigace a další. Pro popis chůze robota se používají dvě základní fáze, a to fáze opory, kdy je noha v kontaktu se zemí a fáze švihu, kdy je noha ve vzduchu. Pohyb čtyřnohých robotů je inspirován přírodou konkrétněji pak pohybem savců, jako jsou psi, koně, šelmy a mnoho dalších

5.1 Chůze

Chůze je nejpomalejší a zároveň nejspornější způsob pohybu. U čtyřnohých živočichů probíhá chůze čtyřtáctem, kdy se každá noha dotýká země v mírně odlišných okamžicích. Při chůzi má zvíře vždy tři nohy v kontaktu se zemí, které udržují statickou stabilitu, zatímco jedna noha je ve vzduchu a vykonává pohyb.

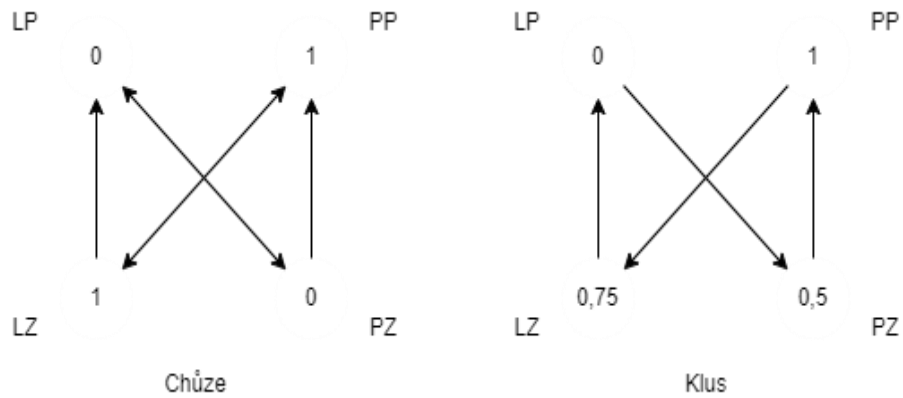
Chůze pracuje se čtyřdobým časováním, dle obr.5.1. Jedna noha po druhé, počínaje pravou zadní, se během jednoho taktu zvedne a pohybuje se dopředu a dolů a poté se během dalších 3 taktů pomalu pohybuje dozadu. Během 2. taktu prochází stejným pohybem přední noha na téže straně. Během 3. taktu provede totéž zadní noha na opačné straně. Nakonec přední noha na opačné straně provede obdobný pohyb, a to během 4. taktu. Cyklus se opakuje a pohyb vpřed pokračuje.



Obr.5.1 – Časování pozice nohy během chůze (Liang, 2013)

5.2 Klus

Klus je střídavý diagonální chod s dynamickou stabilitou. Někdy se nazývá také amble. Dvě diagonálně protilehlé nohy se pohybují vpřed, zatímco zbývající dvě nohy podírají tělo a pohybují se vzad (jako by se tělo posouvalo vpřed). Jedná se o jeden z nejrychlejších pohybů, protože ve stejnou dobu se zvednou dvě nohy, ačkoli není energeticky příliš úsporný. Stabilita těla souvisí s frekvencí zvedání a kladení nohou. Čím rychleji se nohy zvedají a kladou, tím méně je pohyb kymácvý. Samozřejmě také záleží na tvaru plošek nohou. Pokud mají chodidla velkou plochu styku se zemí, bude robot stabilnější, když se zvednou zbývající dvě nohy. Na obr.5.2 lze vidět rozdíl v časování jednoho kroku chůze a klusu.



Obr.5.2 – rozdíl časování mezi chůzí a klusem

6 SENZORICKÝ SUBSYSTEM

Senzorický subsystém robota je jeho smyslový orgán, díky kterému robot vnímá okolní prostředí. Funguje podobně jako naše vlastní smysly (zrak, sluch, hmat atd.), ale využívá k tomu různé senzory a technologie. Hlavní úlohou sensorického subsystému je shromažďovat informace o okolí robota a poskytovat je řídicímu systému, který na jejich základě rozhoduje o pohybu a činnostech robota. Senzory robota neustále snímají okolní prostředí a detekují překážky, cíle, změny terénu a další důležité informace.

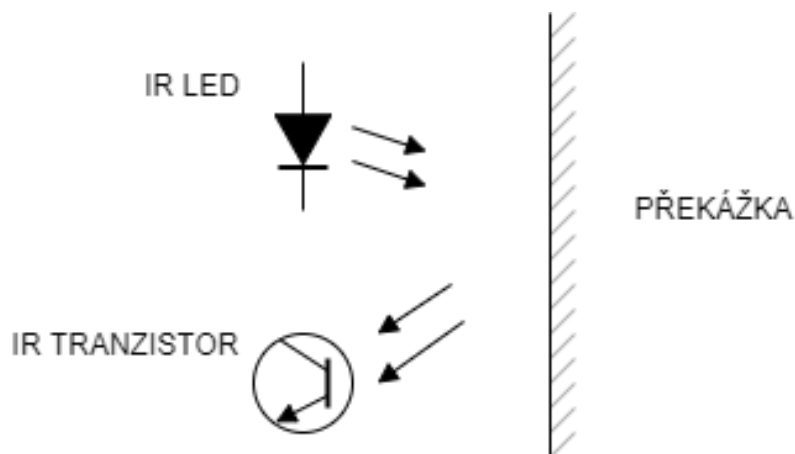
6.1 Senzory vzdálenosti

Senzory vzdálenosti hrají v robotice klíčovou roli, jelikož robotovi umožňují vnímat a mapovat okolní prostředí, detekovat překážky a cíle, navigovat se a koordinovat své pohyby. Existuje mnoho druhů senzorů vzdálenosti, které se liší principem fungování, dosahem, přesností a dalšími vlastnostmi.

6.1.1 IR senzory

Infračervené senzory používají k zjišťování přítomnosti překážek v těsné blízkosti. Jsou vhodné pro měření vzdáleností v řádu několika desítek centimetrů a najdou uplatnění zejména v robotice pro detekci blízkých objektů. Tyto senzory jsou citlivé na vlnové délky kratší, než je viditelné světlo, typicky okolo 880 nm. Fungují na principu vysílání infračerveného světla z diody, jehož odraz od objektu je zachycen detektorem, jako je IR citlivý fototranzistor nebo fotodiody. Infračervený senzor generuje digitální signál, který určuje, zda došlo k detekci odraženého signálu, což naznačuje, jestli se v cestě nachází objekt. Jedním z omezení těchto

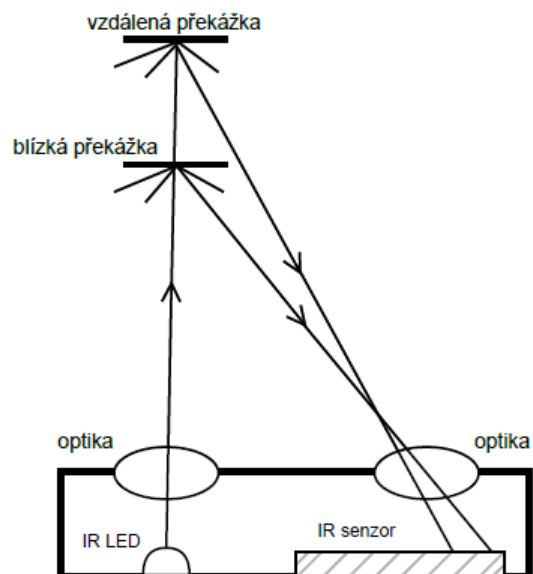
zařízení je variabilita množství odraženého IR světla, která se mění podle typu a barvy povrchu objektu. Pro minimalizaci ovlivnění vnějším osvětlením se často používá infračervený fototranzistor spolu s demodulačním přijímačem, příkladem může být typ Siemens SFH506. Vizualizace fungování tohoto principu je zobrazena na obrázku 6.1.



Obr.6.1 – Princip detekce překážky IR senzorem (Novák, 2005)

Jak popisuje Novák (2005), například GP2D02 jsou senzory využívající triangulační metodu, měří vzdálenost pomocí infračerveného záření. Na jednom konci senzoru je umístěna IR LED dioda, která vysílá světelný paprsek, a na opačném konci je IR dioda, která detekuje intenzitu světla dopadajícího na ni. Když IR LED dioda emituje světlo, odražené zpět od předmětu, IR přijímač toto světlo detekuje skrze optickou čočku. Jak je znázorněno na obrázku 6.2, poloha, kam světlo dopadne na fotodetektor, určuje vzdálenost k danému objektu.

Primární výhodou těchto senzorů je jejich schopnost poskytovat přesné měření vzdálenosti k objektu, což je pokročilejší než pouhá detekce přítomnosti objektu. Mezi hlavní nevýhody patří prodloužená doba odezvy, která může být delší než 70 ms, a nelinearita ve vzdálenostních měřeních. Senzory se odlišují v mnoha aspektech, z nichž nejdůležitější je rozsah měření. Dalším klíčovým rozlišovacím prvkem je typ výstupního signálu. Například senzor GP2Y0A02YK s měřicím rozsahem 20 až 150 cm poskytuje analogový signál (3 vodiče), zatímco model GP2D02 s rozsahem 10 až 80 cm vydává digitální signál (4 vodiče), přičemž dva z nich jsou připojeny k mikroprocesoru, který iniciuje měření a sériově čte data o vzdálenosti prostřednictvím druhého vodiče. Vizualizace IR senzoru je uvedena na obrázku 6.3.



Obr.6.2 – Princip měření triangulační metodou
(Novák, 2005)



Obr.6.3 – Senzor GP2Y0A21YK0F (SHARP, 2006)

6.1.2 Sonary

Sonarové systémy, známé také jako ultrazvukové detektory, využívají princip měření časového intervalu mezi vysláním a zachycením echo signálu. Tyto zařízení typicky operují na frekvencích vyšších než 40 kHz. Díky relativně pomalé rychlosti zvuku v atmosféře lze s těmito senzory dosáhnout velmi přesných výsledků měření. To je způsobeno tím, že časová prodleva mezi odesláním signálu a jeho přijetím je dostatečně dlouhá na to, aby byla rozpoznatelná, což je výhoda oproti infračerveným sensorům.

Přesnost měření ultrazvukových sensorů může ovlivnit řada faktorů, včetně rozptylu signálu, který znemožňuje určení úhlové polohy objektu. Při současném používání více sensorů je důležité zajistit, aby se navzájem nerušily, což by mohlo vést k chybnému měření vzdálenosti kvůli tzv. křížovému odrazu signálu od jiného senzoru. Také teplota vzduchu hraje roli, neboť ovlivňuje rychlost šíření zvuku, což je třeba brát v úvahu při interpretaci výsledků měření, jak je uvedeno v tabulce 6.1 podle Nováka (2005). Ilustrace sonaru, konkrétně běžně používaného HCSR04 je na obr.6.4.

Tab.6.1 – Vliv teploty vzduchu na rychlost šíření zvuku

t = 0 °C	v = 331 m/s
t = 25 °C	v = 343 m/s



Obr.6.4 – Sonar HCSR04 (HADEX, nedatováno)

6.1.3 LiDAR

LiDAR viz obr.6.5 je zařízení, které využívá laserové technologie k mapování okolí. Principem jeho fungování je vysílání krátkých pulzů laserového světla, které se pomocí rotujícího zrcadla rozptylují do okolí. Když laserový paprsek narazí na objekt, je odražen zpět k senzoru. LiDAR poté měří čas, který trvalo světelnému paprsku k odrazu od objektu a návratu zpět k senzoru. S využitím známé rychlosti světla je možné vypočítat vzdálenost k objektu podle 6.1.

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (6.1)$$

Kde d – vzdálenost mezi detektorem a objektem

c – rychlost světla

t – doba mezi vysláním laserovým světlem a jeho opětovným vrácením zpět

Díky rotačnímu zrcadlu dokáže LiDAR systematicky skenovat prostor kolem sebe a shromažďovat data o vzdálenosti objektů z různých úhlů. Tato data jsou následně zpracována do 3D bodového mraku, což je podrobná digitální reprezentace okolního prostoru. Každý bod v tomto mraku představuje specifickou polohu a vzdálenost objektu ve 3D prostoru. Využitím těchto dat může robot vytvořit detailní mapy svého okolí, identifikovat a vyhýbat se překážkám, určit svou polohu v prostoru a plánovat optimální trasu k dosažení cíle. Tato technologie je klíčová pro autonomní navigaci v různých aplikacích, od samoříděných vozidel po robotické průzkumné mise.



Obr.6.5 – LiDAR senzor DTOF LD19 (DFROBOT, nedatováno)

7 ŘÍDICÍ SYSTÉM

Řídicí systém robota je komplexní systém, který zahrnuje řadu komponent, které spolupracují na koordinaci pohybu robota a zajištění jeho stability a funkčnosti. Základní komponenty řídicího systému zahrnuje senzorický subsystém, akční členy, a řídicí jednotka. Funkce tohoto systému jsou například plánování pohybu, stabilizace robota, koordinace pohybu, reakce na kolize a nečekané změny.

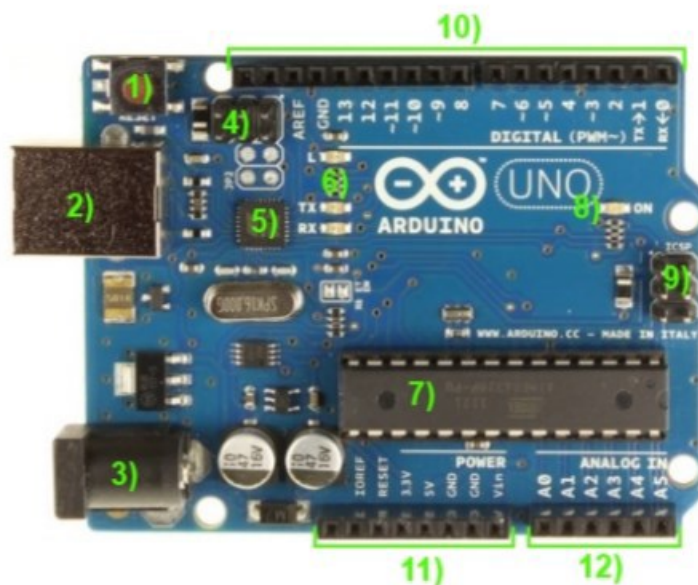
7.1 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka robota, nazývaná také řídicí systém nebo „mozek“, je klíčovou součástí robota, která řídí jeho pohyb a chování. Slouží jako centrální nervový systém robota a koordinuje všechny jeho funkce. Řídicí jednotka přijímá data ze senzorů, zpracovává je a na základě nich odesílá řídicí signály do akčních členů robota, čímž ovlivňuje jeho pohyb a interakci s okolím.

7.1.1 Arduino

Podle zdroje (Voda, 2017), se Arduino těší velké oblibě jako vývojová platforma na celém světě. Nabízí širokou škálu modelů, od jednoduchých až po komplexní systémy s USB, HDMI, Ethernetem a audio porty. Základem každého Arduina je mikrokontroler od společnosti Atmel. Všechny modely jsou vizuálně podobné s dominující modrou barvou. Na oficiálním webu a v internetových obchodech lze nalézt verze označené jako R3 nebo Rev3, což signalizuje specifickou verzi, ale tyto označení obvykle neznamenají zásadní změny v designu nebo funkčnosti. Většina desek obsahuje kromě hlavního čipu také konvertor pro sériovou komunikaci s PC přes USB.

Model Arduino Uno viz obr.7.1, je nejčastěji využívanou verzí této platformy. Mikrokontroler ATmega328P je umístěn na desce, kde funguje s maximální frekvencí 16 MHz. Nabízí 32 kB prostoru ve flash paměti pro programy, 2 kB SRAM pro pracovní data a 1 kB EEPROM, která slouží pro speciální účely a není přístupná přímo. Tento čip je osazen dvěma 8bitovými a jedním 16bitovým čítačem/časovačem, má USART interface pro nastavitelnou sériovou komunikaci a analogový komparátor s možností nastavení referenčního vstupu. Dále je vybaven 14 digitálními I/O piny, z nichž šest podporuje tvorbu PWM signálů, a šesti analogovými vstupy (Arduino,2022). Podrobnosti o rozložení komponent a pinů jsou uvedeny na obrázku 7.1 a v tabulce 7.1.



Obr.7.1 – Arduino Uno (Voda, 2017)

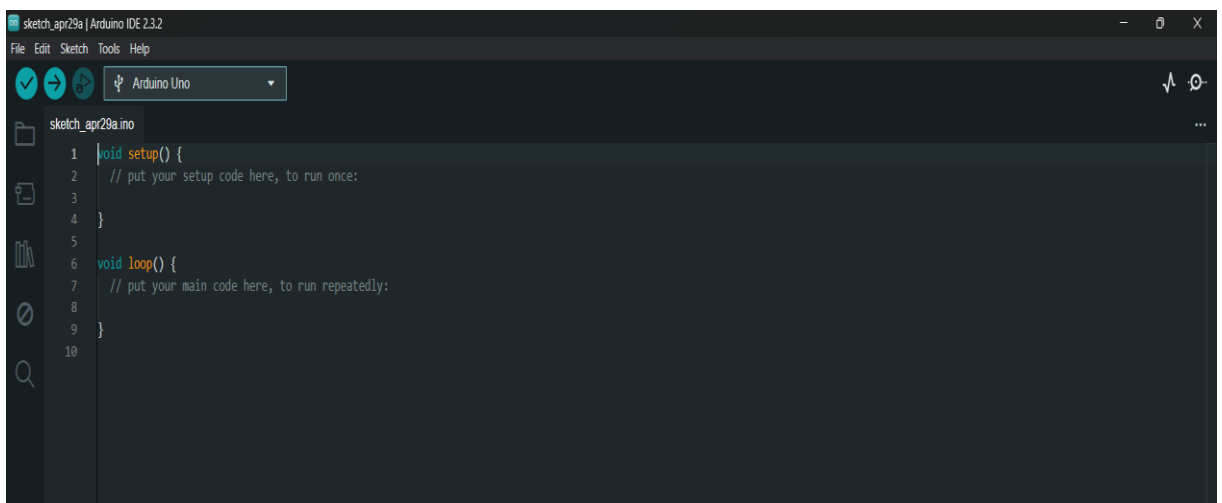
Tab.7.1 – Popis součástek a pinů (Svoboda, 2022)

Označení na obrázku (číslo)	Součástka/pin
1	Tlačítko RESET používá se pro spuštění programu od začátku
2	USB konektor typu B (napájení a připojení k PC)
3	Napájecí konektor využívá se, když nenapájíme Arduino z USB
4	ICSP hlavice pro externí programování USB-seriál převodníku
5	USB-seriál převodník (stará se o komunikaci mezi PC a procesorem)
6	Indikační LED diody L, Rx, Tx. L je připojena k výstupnímu pinu 13 a proto se může využívat jako klasická LED dioda. Rx a Tx blikají, pokud probíhá sériová komunikace
7	Procesor desky (ATmega328P)
8	Indikační LED dioda ON svítí, když je připojené napájení.
9	ICSP hlavice pro programování hlavního čipu.

Tab.7.1 – Popis součástek a pinů

10	Digitální vstupně/výstupní piny (piny označené vlnovkou podporují PWM)
11	Převážně napájecí výstupy
12	Analogové vstupy

Arduino IDE viz. obr7.2. představuje programovací prostředí pro platformu Arduino. Instalační soubory jsou dostupné na oficiálním webu Arduina, kde si uživatelé mohou vybrat požadovanou verzi a operační systém, který používají, a poté software stáhnout a nainstalovat do svého počítače.



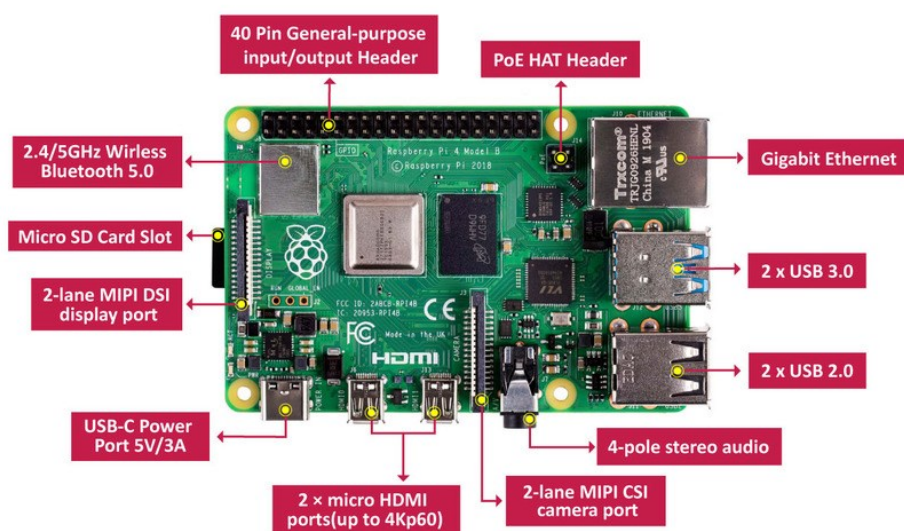
Obr.7.2 – Vývojové prostředí Arduino IDE

V rámci vývojového prostředí Arduino IDE se v horní části nachází panel s nástroji, který obsahuje rozbalovací menu pro nastavení spojení s deskou a její programování. Na druhém řádku panelu jsou umístěny ikony s různými funkcemi. Zleva první ikona slouží k ověření kódu a jeho kompilaci, druhá ikona umožňuje nahrání ověřeného programu do Arduina. Další ikona je pro debugging programu, avšak tato funkce není dostupná pro všechny modely Arduina.

Funkce void setup() v Arduino kódu je určena pro sekci, která se spustí jednorázově při startu programu. Naopak, funkce void loop() obsahuje kód, který se neustále opakuje, dokud je Arduino připojeno k napájení. Tento cyklus umožňuje Arduino reagovat na změny v reálném čase a provádět opakované úkony.

7.1.2 Raspberry pi

Raspberry Pi je kompaktní jednodeskový počítač, který byl původně navržen pro vzdělávací účely, ale díky své flexibilitě a nízké ceně si našel uplatnění v mnoha dalších oblastech. představuje revoluci v oblasti miniaturních počítačů. Tento jednodeskový systém, vyvinutý s cílem demokratizovat přístup k počítačovému vzdělání, se rychle stal fenoménem díky své univerzálnosti a cenové dostupnosti. Srdcem tohoto zařízení je procesor ARM, který spolu s integrovanou grafickou jednotkou a podporou pro různé operační systémy umožňuje uživatelům realizovat širokou škálu projektů od jednoduchých vzdělávacích aplikací až po složité automatizační systémy. Vyznačuje svou modularitou a otevřeností, což umožňuje snadné připojení periferních zařízení a rozšiřování jeho funkcí. Díky tomu se stal oblíbeným nástrojem pro hobby elektroniky, vývojáře softwaru, učitelé i studenty. Jeho schopnost být srdcem robotů, meteorologických stanic nebo domácích mediálních center dokazuje jeho neuvěřitelnou adaptabilitu.



Obr.7.3 – Raspberry pi

Na obr.7.3 je nová generace jednodeskového počítače přichází s procesorem ARM Cortex A-72 a nabízí výběr mezi 1 GB, 2 GB a 4 GB RAM. Zařízení je vybaveno dvěma USB 3.1 porty, dvěma USB 2.0 porty, 3.5mm audio jackem, kompletním gigabitovým ethernetem a 40 GPIO piny. Dále obsahuje dvojici mini HDMI portů podporujících rozlišení až 4K a moderní USB-C pro napájení. Součástí rozsáhlé výbavy je i Wi-Fi 802.11.b/g/n/ac kompatibilní s

2.4GHz i 5GHz pásmem, Bluetooth 5.0, připravené konektory pro připojení kamery či displeje a širokých možnostech dalšího rozšíření.

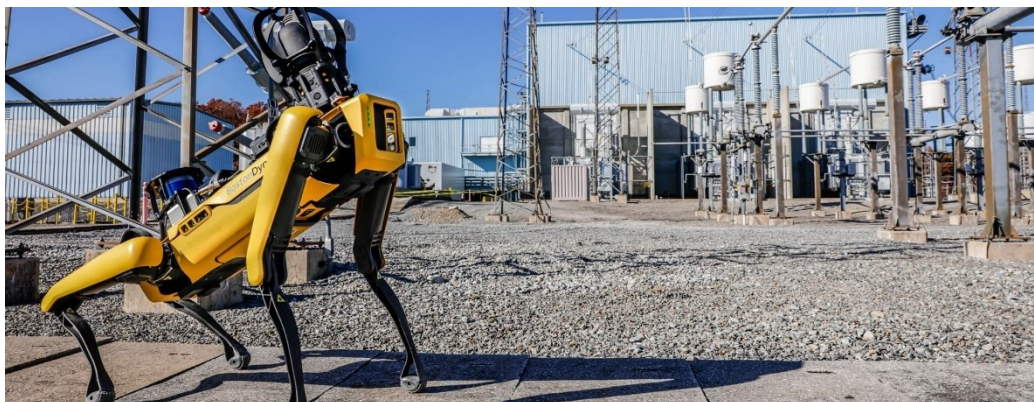
8 EXISTUJÍCÍ PLATFORMY

Na trhu je spousta již existujících čtyřnohých robotů pro různé účely. Zde budou uvedeny pouze ty nejznámější od velkých společností jako jsou Boston Dynamics, Unitree, Anybotics. Porovnání výhod a nevýhod těchto platforem je v tab.8.4.

8.1 SPOT

Robot Spot, vyvinutý společností Boston Dynamics, jehož obrázek je na obr.8.1 je příkladem inovativní robotiky, která napodobuje pohyby zvířat pro zajištění vysoké úrovně obratnosti a stability. Jeho schopnost autonomního pohybu v různých prostředích, od kancelářských prostor po stavební plochy a drsné terény, je podpořena širokou škálou senzorů, včetně lidarů a stereo kamer. Tyto senzory umožňují Spotu vnímat své okolí a navigovat s minimálním rizikem kolize.

Spot může být ovládán dálkově pomocí tabletu nebo může provádět předem naprogramované úkoly autonomně, což z něj činí flexibilního pomocníka pro různé účely. Díky své nosnosti až 14 kg je Spot schopen nést další vybavení, což rozšiřuje jeho možnosti využití v průmyslových aplikacích. Jeho odolnost proti vodě a prachu zajišťuje, že může pracovat v náročných pracovních podmínkách bez poškození. Technické specifikace viz. tab.8.1.



Obr.8.1 – Robot SPOT s termální kamerou na rozvodně VN (Boston Dynamics)

Tab.8.1 – Technické informace SPOTU

Specifikace	Hodnota
Délka	1100 mm
Šířka	500 mm
Výška při chůzi	610 mm
Hmotnost	32,7 kg (s baterkou)
Stupně volnosti	12
Maximální rychlost	1.6 m/s
Maximální sklon	±30°
Ochrana proti vodě	IP54
Provozní teplota	-20 °C až 45 °C
Baterie	564 Wh
Typická doba běhu	90 minut
Doba nabíjení	Přibližně 50 minut pro 80%
Kamery	5 optických kamer
Připojení	Wi-Fi (2,4/5GHz), Ethernet

8.2 ANYmal

Robot ANYmal, vyvinutý společností ANYbotics, který je vyobrazen na obr.8.2, je předním příkladem pokroku v oblasti autonomních robotických systémů společnost ANYbotics uvádí, že je ideální pro inspekci. Tento čtyřnohý robot je navržen tak, aby se pohyboval s obratností a adaptabilitou podobnou zvířatům, což mu umožňuje operovat v náročných průmyslových prostředích. ANYmal je vybaven špičkovými senzory, včetně vizuálních a termálních kamer, ultrazvukového mikrofónu, výkonného LED reflektoru a lidarů, které mu umožňují provádět inspekce a monitorování zařízení s vysokou mírou přesnosti a efektivity.

Díky svým AI schopnostem je ANYmal schopen autonomního pohybu a navigace v komplexních prostředích, jako jsou chemické závody, těžební operace a ropné plošiny. Jeho schopnost integrace do stávajících operačních systémů a adaptace na specifické inspekční úkoly činí z ANYmalu ideálního kandidáta pro automatizaci rutinních a nebezpečných úkolů, které by jinak vyžadovaly lidskou přítomnost.

ANYmal X, speciální verze robota určená pro výbušné prostředí, je navíc certifikována podle ATEX/IECEx, což znamená, že může bezpečně operovat v prostředích s rizikem výbuchu. Tato verze robota je vybavena podobnými senzory a systémy jako standardní model, ale s přidáním ochrany a bezpečnostními funkcemi pro práci v potenciálně nebezpečných zónách. Technické specifikace tohoto robota jsou uvedeny v tab.8.2.



Obr.8.2 – Robot ANYmal od ANYbotics (ANYbotics)

Tab.8.2 – Technické specifikace ANYmalu

Specifikace	Hodnota
Délka	930 mm
Šířka	530 mm
Výška při chůzi	890 mm
Hmotnost	50 kg (s baterkou)
Stupně volnosti	12
Maximální rychlost	1.3 m/s
Maximální sklon	±30°
Ochrana proti vodě	IP67
Provozní teplota	-10 °C až 50 °C
Baterie	932,4 Wh
Typická doba běhu	90–120 minut
Doba nabíjení	Přibližně 100 minut pro 70 %
Dosah chůze	2 km na jedno nabití
Připojení	Wi-Fi (2,4/5GHz), 5G/LTE

8.3 Unitree GO

Robot Unitree GO2, známý také pod názvem GO, je inovativním příspěvkem společnosti Unitree Robotics v oblasti čtyřnohých robotů. Tento robot je navržen s důrazem na všestrannost a adaptabilitu, což mu umožňuje pohybovat se s obratností a efektivitou v různorodých prostředích. Jeho schopnost autonomního pohybu je podpořena pokročilými senzory a algoritmy, které mu umožňují navigovat s vysokou mírou přesnosti a bezpečnosti.

GO2 viz. obr.8.4, je vybaven 4D LIDAREM L1 od Unitree, který poskytuje 360°x90° hemisférické ultra široké rozpoznávání s minimální slepou skvrnou a minimální detekční vzdáleností pouhých 0,05 m. Tato technologie umožňuje robotu rozpoznávat terén ve všech směrech a přizpůsobovat se mu v reálném čase, což je klíčové pro operace v komplexních a dynamických prostředích. Je také vybaven novými bezdrátovými vektorovými polohovacími a ovládacími technologiemi, které zvyšují přesnost polohování o 50 % a umožňují dálkové ovládání na vzdálenost přes 30 m. Díky optimalizované strategii vyhýbání se překážkám může robot lépe překonávat složitý terén a efektivně plnit úkoly.

S maximální běžeckou rychlostí přibližně 5 m/s a špičkovým točivým momentem kloubů přibližně 45 N.m. je GO2 schopen rychlé a agilní reakce. Jeho výdrž baterie, která se pohybuje mezi 2 až 4 hodinami, zajišťuje dlouhodobou operativnost bez potřeby častého dobíjení. Robot je také vybaven inteligentním systémem následování ISS 2.0 a poskytuje interaktivní zážitek s vysokou zábavností prostřednictvím aplikace, HD kvality obrazu a stabilního real-time přenosu. Další technické údaje jsou uvedeny v tab.8.3.

Tab.8.3 – Technické údaje Unitree GO

Specifikace	Hodnota
Délka	400 mm
Šířka	310 mm
Výška při chůzi	700 mm
Hmotnost	15 kg
Stupně volnosti	12
Maximální rychlost	3,5 m/s
Maximální sklon	±40°
Ochrana proti vodě	IP67
Provozní teplota	-10 °C až 50 °C
Baterie	932,4 Wh
Typická doba běhu	2-4 h
Materiál	Slitina hliníku a inženýrský plast
Zátěž	7 kg max 10 kg



Obr.8.3 – Robot Unitree GO (Unitree)

Tab.8.4 – Srovnání všech výše zmíněných robotů

Vlastnost	Spot	ANYmal	Unitree Go
Výrobce	Boston Dynamics	Anybotics	Unitree Robotics
Cena	cca 1,6 M	cca 17,5 M	cca 300 000
Hmotnost	32,7 kg	50 kg	15 kg
Nosnost	14 kg	10 kg	10 kg
Rozměry (vxšxd)	610x500x1100 mm	890x530x930 mm	700x310x400 mm
Rychlost	1,6 m/s	1,3 m/s	3,5 m/s
Doba chodu na jedno nabití	90 minut	90–120 minut	2–4 hodiny
Terénní dostupnost	Náročný terén	Velmi náročný terén	Středně náročný terén
Stupeň autonomie	Vysoký	Velmi vysoký	Střední
Možnosti vybavení	Velmi široké	Velmi široké	Široké
Aplikace	Inspekce, záchrana, stavebnictví	Inspekce, záchrana, průzkum, věda	Inspekce, záchrana, logistika
Výhody	Stabilita a odolnost Vysoká nosnost Modulární design Autonomie	Agilita a rychlost Adaptibilita na terén Robustnost Schopnost učení	Poměr ceny a výkonu Různě výkonné verze Dlouhá výdrž baterie
Nevýhody	Vysoká cena Omezená mobilita a rychlost Vysoká závislost na softwaru	Velmi vysoká cena Omezená nosnost	Nízká nosnost Menší mobilita Menší odolnost

9 NÁVRH KONSTRUKCE

Při návrhu konstrukce čtyřnohého robota je třeba brát v úvahu mnoho aspektů, které ovlivní jeho výkon, funkčnost a spolehlivost jako je například volba vhodného materiálu, typ pohonu nebo vlastnosti a typ kloubů a v neposlední řadě hraje také velkou roli rozpočet.

9.1 Volba vhodného materiálu

Při volbě vhodného materiálu je třeba zohlednit v jakém prostředí bude robot převážně nasazen, dále také hmotnost celkové konstrukce, flexibilita, finanční možnosti a dostupnost na trhu. Na stavbu tohoto robota byl z důvodu malé hmotnosti vybrán 3D tisk, který je i velmi cenově přijatelný.

Po přezkoumání různých materiálů 3D tisku byli vybrány 2 hlavní, a to ABS a ASA, prvotní prototyp byl vytisknut z materiálu ABS, kde bylo zjištěno, že tento plast je příliš měkký a nevhodný pro venkovní použití, a tudíž pro výrobu celé konstrukce robota byl zvolen materiál ASA, kde jeho vlastnosti jsou ideální pro venkovní použití díky vysoké odolnosti vůči teplotám a díky vysoké UV odolnosti. ASA je sice o něco dražší než ABS, ale je zase o to kvalitnější, což bylo u této konstrukce vyžadováno, aby se plast nekroutil, nebyl měkký a byl odolný vůči nárazům. Vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tab.9.1.

Tab.9.1 – Vlastnosti ASA

Vlastnost	Hodnota
Cena	cca 650/kg
Teplota tisku	240-260 °C
Teplota tiskové podložky	90-110 °C
Adheze k tiskové podložce	Velmi dobrá
Pevnost v tahu	25-35 MPa (Velmi dobrá)
Tvrdost	Shore D70-80 (Pevný a odolný)
Teplotní odolnost	Vysoká (do 90 °C)
UV odolnost	Vysoká, vhodný pro venkovní použití, bez ztráty barvy
Odolnost proti chemikáliím	Vysoká
Vzhled	Matný
Zápach při tisku	Silnější
Vhodný pro:	Pokročilé uživatele, venkovní modely, funkční díly

9.2 Pohon

Při výběru pohonu robotu byla brána v úvahu hlavně cena, protože pohony jsou velice drahé komponenty z tohoto důvodu byl pro pohon robotu zvolen servomotor, který již obsahuje vše potřebné a nemusí se dodělavat nějaká zpětná vazba nebo přidávat další komponenty, jako například u bldc motoru, kde by bylo potřeba dokupovat ještě nějaký enkodér pro určování polohy a řešit ještě spoustu věcí navíc. Dále se taky muselo být počítáno s celkovou hmotností robotu a podle toho zvolit sílu servomotoru. Důraz se byl také kladen na přesnost odchylky, a proto byl zvolen servomotor, který pro určování polohy nepoužívá potenciometr, ale 14bitový magnetický enkodér, který je přesnější než obyčejný potenciometr. V neposlední řadě byla uvažována odolnost proti prachu a vodě, jelikož robot bude používán převážně ve venkovním prostředí.

Pro výše zmíněné vlastnosti a účely byl vybrán servomotor od společnosti Flash Hobby, a to konkrétně typ CLS3838MED, který je zobrazen na obr.9.1. Jedná se o bezjádrový (coreless – CLS) servomotor, který disponuje odolností vůči prachu a vodě, konkrétně IP67, napájen je napětím od 6 do 8,4VDC a zátěží od 29 kg/cm do 38 kg/cm závisí to na hodnotě napájecího napětí, stejně tak jako rychlost otáčení a protékající proud. Další technické specifikace a rozměry jsou uvedeny na obr.9.2.



Obr.9.1 – Servomotor CLS3838MED (FLASHHOBBY)

CLS3838MED			
Control System	PWM Control (1500usec in the central point)		
Operation Voltage Range	DC6.0-8.4V		
Operation Temperature Range	-20C°~ +70C°		
Pulse Width	500 to 2500 uSec		
Circle	>one million times without load		
Operation Travel	<input checked="" type="checkbox"/> 180°± 5°	<input type="checkbox"/> 270°± 5°	<input type="checkbox"/> 360°± 5°
Programmable angle	<input checked="" type="checkbox"/> YES	<input type="checkbox"/> NO	
Direction	<input checked="" type="checkbox"/> CW	<input type="checkbox"/> CCW	
Diver type	Mos Drive		
Motor Type	<input type="checkbox"/> Brushless	<input checked="" type="checkbox"/> Coreless	
Angle Sensor	<input type="checkbox"/> Potentiometer	<input checked="" type="checkbox"/> 14Bit Magnetic Encoder	
Single Type	Digital Control		
Soft Start Function	<input checked="" type="radio"/> Included	<input type="radio"/> Without	
Mode Compatible	<input checked="" type="checkbox"/> Sanwa SSR	<input checked="" type="checkbox"/> NB4	<input checked="" type="checkbox"/> Futeba
Waterproof Level	IP67		
Dimension	40x20x38mm		
Weight	80g		
Test Voltage	At 6.0V	At 7.4V	At 8.4V
Standing Torque	29kg-cm	34kg-cm	38kg-cm
Speed	0.12sec/60°	0.10sec/60°	0.09sec/60°
Running Current	2600mA	3000mA	3700mA
Dead band width	2uSec	2uSec	2uSec
Ball Bearing	2BB		
Case Material	Full Aluminum CNC		
Connector Wire Length	22AWG 260mm JR		
Wire Info (Black)	Negative		
Wire Info (Black)	Positive		
Wire Info (White)	S Single		
Manufactory: www.flashhobby.com		Email: sales@flashhobby.com	

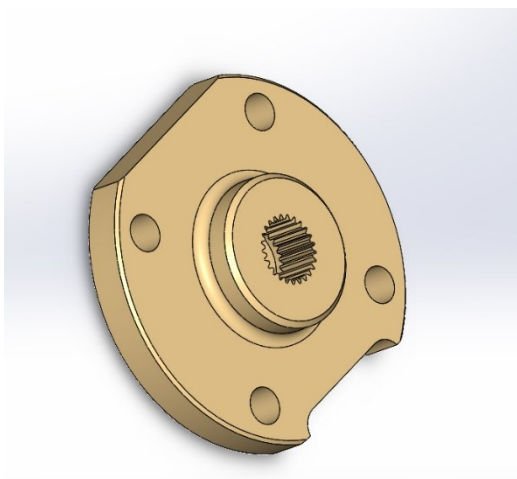
Obr.9.2 – Technické specifikace a rozměry servomotoru

9.3 Klouby

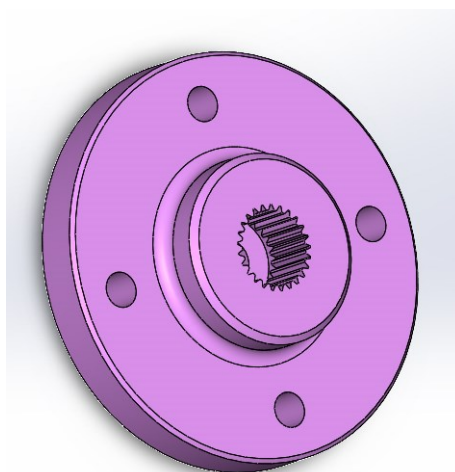
V návrhu je uvažováno se 12 stupni volnosti což znamená, že konstrukce obsahuje 12 servomotorů z toho vždy tři servomotory na každou nohu, z toho vyplívá 12 kloubů a 3 klouby na každou nohu. Klouby jsou zvoleny pouze rotační vždy pro pohyb pouze v jedné ose. Jeden kloub je vždy tvořen servomotorem a servopákou neboli spíše kruhem, který je vždy připevněn šrouby ke konstrukci a následně je tato páka nasazena na tisícíhran servomotoru, který je už upevněn v konstrukci čtyřmi šrouby M3 a dále je tato páka z vrchu „za aretována“ šroubem o velikosti M2.

9.3.1 Servopáky

Pro konstrukci jsou vytvořeny dva typy servopák jedna je větší viz. obr9.3.a jedna je menší obr.9.4 z důvodu umístění v konstrukci



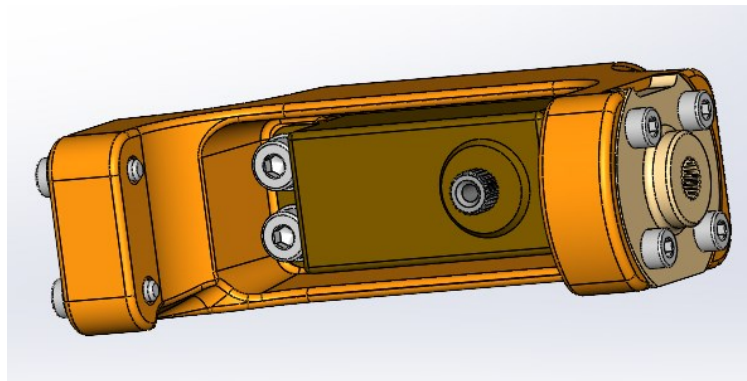
Obr.9.3 – 3D model větší servopáky



Obr.9.4 – 3D model menší servopáky

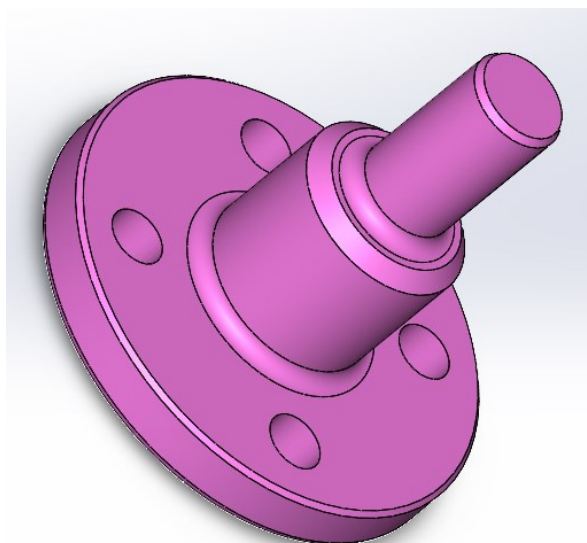
Tyto servopáky jsou vyrobeny na zakázku z hliníku, aby se zachovala nízká hmotnost, a i požadovaná pevnost, protože. původní, co byli v balení nebyli přesně vyrobené, a tudíž neseseděli dobře na tisícíhranu, a hlavně nebyli dostatečně pevné pro tyto účely.

Součástí kyčelního kloubu, který je tvořen větší servopákou, dále pak pouzdem pro servomotor viz. obr9.5.



Obr.9.5 – Pouzdro pro servomotor kyčelního kloubu

A čepem viz. obr.9.6, u kterého byla potřeba větší tvrdost a odolnost, a proto je vyroben taktéž z vysoce kvalitního hliníku, aby byli zachovány tyto vlastnosti a také malá hmotnost. Tento čep je zasazen do kluzného přírubového ložiska EFSM06 od výrobce IGUS, které je na obr.9.7 a v konstrukci zajišťuje, aby tisícíhran servomotoru, který je umístěn v kolébkovém pouzdru byl v jedné ose s čepem a tisícíhranem servomotoru, který zajišťuje pohyb celého pouzdra.

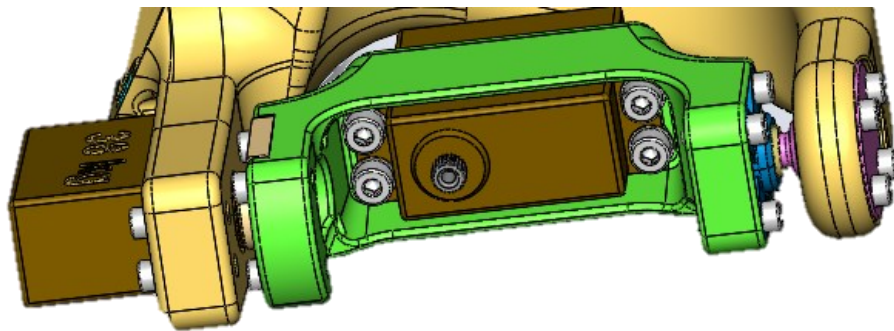


Obr.9.6 – Čep pro zajištění kyvné funkce kloubu



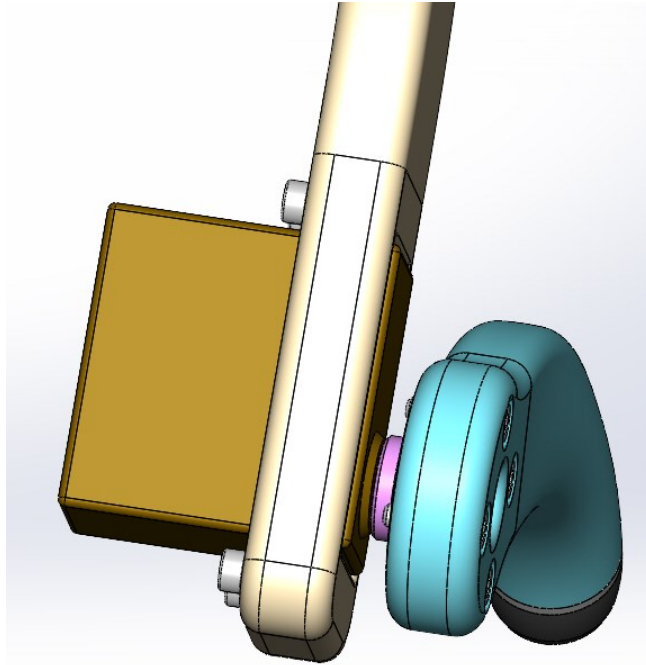
Obr.9.7 – Kluzné ložisko IGUS(IGUS)

Výsledná konstrukce kyčelního kloubu je zobrazena na obr.9.8, kde je vidět, že zleva je upevněn ke konstrukci těla servomotor, který zajišťuje celý pohyb kyčelního kloubu, dále je tento servomotor připojen skrze tisícíhran na větší servopáku, která je i zkosená, jak je vidět kvůli konstrukci. Na pravé straně je vidět čep, který je spojen s konstrukcí těla čtyřmi šrouby, který je zasazen do kluzného ložiska. Jak lze dále z obrázku vidět v pouzdře je zasazen servomotor, na který jsou dále pojeny ostatní části nohy.



Obr.9.8 – Sestava 3D modelu kyčelního kloubu

Druhý kloub, ve kterém se používá menší servopáka je realizován pouze spojením této páky a servomotoru. Tento kloub slouží pro spojení stehenní a holení části nohy. Tento kloub je zobrazen na obr.9.9.



Obr.9.9 – Spojení(kloub) s menší servopákou

Veškerá spojení s konstrukcí jsou realizována pomocí zatavovacích závitů viz. obr.9.10, které se pouze nahřejí a do konstrukce se zataví a následně po zatuhnutí se do nich dají šroubovat šrouby.



Obr.9.10 – Závitová zatavovací vložka

10 Konstrukční řešení

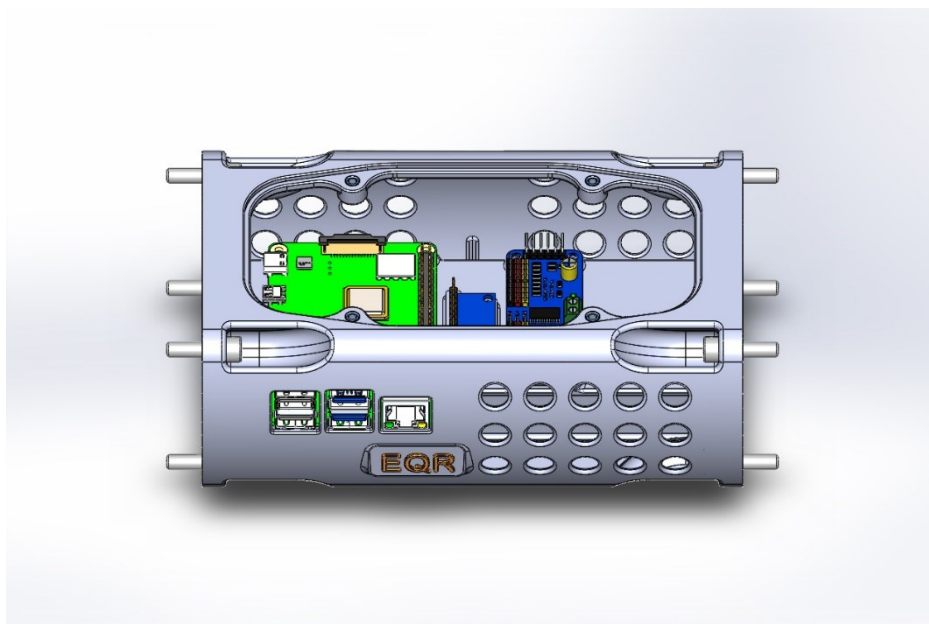
Konstrukční řešení zahrnuje návrh všech komponent robota, včetně těla, kloubů, motorů, senzorů a elektroniky. Důkladný návrh a konstrukce jsou nezbytné pro dosažení požadované funkce, výkonu a spolehlivosti robota.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole celková konstrukce robota až na pár maličkostí je vytištěn na 3D tiskárně konkrétně na Voron 2.4 R2, která má tiskovou plochu o velikosti 350x350x350 mm, z materiálu ASA, černé a zelené barvy.

Pro konstrukci robota bylo vytvořeno více návrhů, avšak nikoli, které by uspokojovali očekávání na nosnost, funkcionalitu a mnoho dalších aspektů, atak zde v této kapitole budou zmíněny jen finální návrhy konstrukce, která již splňuje požadavky. Veškeré 3D modely byli navrhovány v softwaru Solidworks 2020.

10.1 Tělo

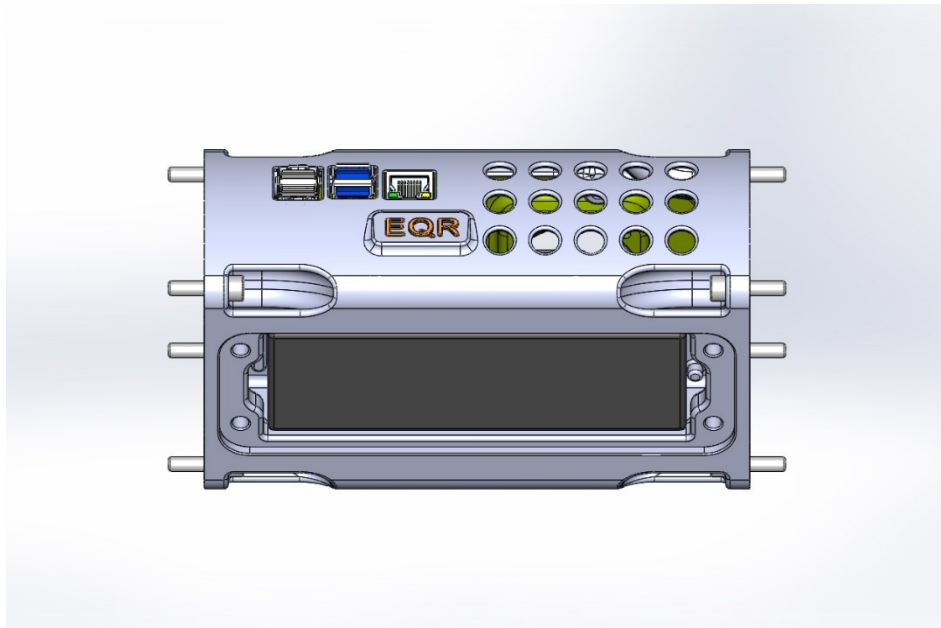
Tělo robota viz. obr.10.1 bylo řešeno s ohledem na hmotnost, kvůli tomu má „dírkovaný“ design a také s ohledem na prostor uvnitř pro veškerou elektroniku, dále pak také, aby mělo co nejmenší možné rozměry.



Obr.10.1 – Tělo robota

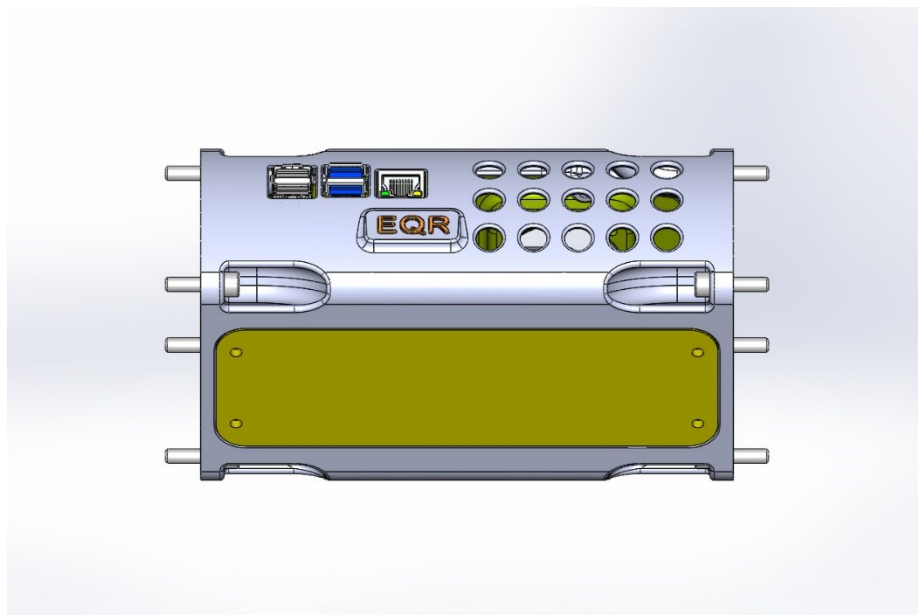
Na obr.10.1 je k vidění válcové tělo robota z pohledu ze shora, také je vidět otvor skrz který se vkládá dovnitř veškerá elektronika jako je řídicí jednotka, senzor natočení a zrychlení,

servo driver a další. Také je z obrázku zřejmé, že prohlubně na vršku a spodu těla jsou pro šrouby, konkrétně M5, které slouží pro spojení těla s dalšími částmi robota.

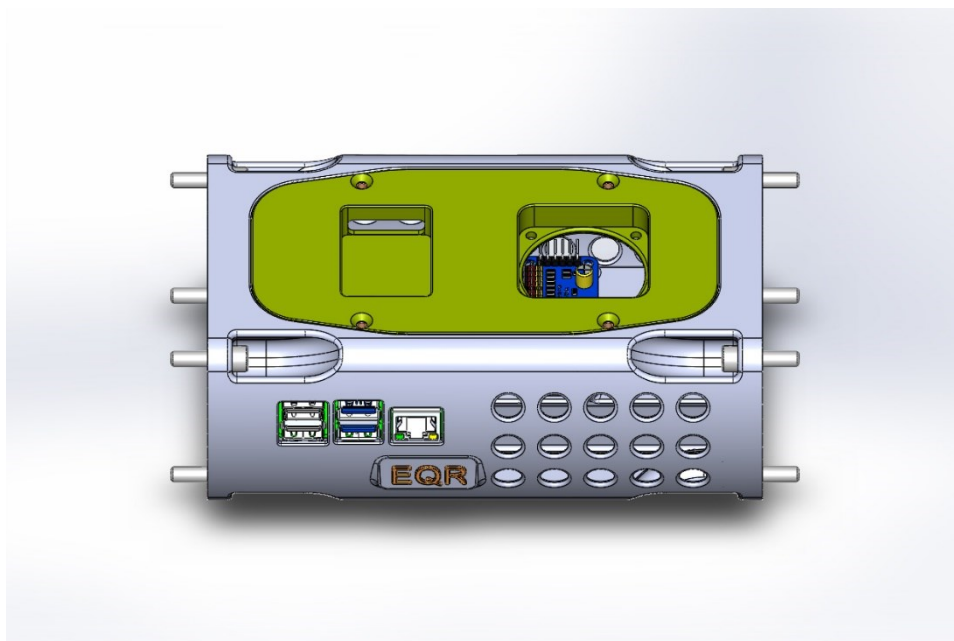


Obr.10.2 – Tělo robota zespodu s akumulátorem

Na obr10.2 je vidět tělo robota z pohledu zespodu, kde je vidět akumulátor, který je vsazený do těla, aby nikde nevyčníval ven. Baterie se dá zadělat krytem viz obr10.3, kde se kryt přidělá čtyřmi šrouby k tělu stejně tak jako elektronika viz. obr.10.4.



Obr.10.3 – Tělo robota zespodu s krytem baterie

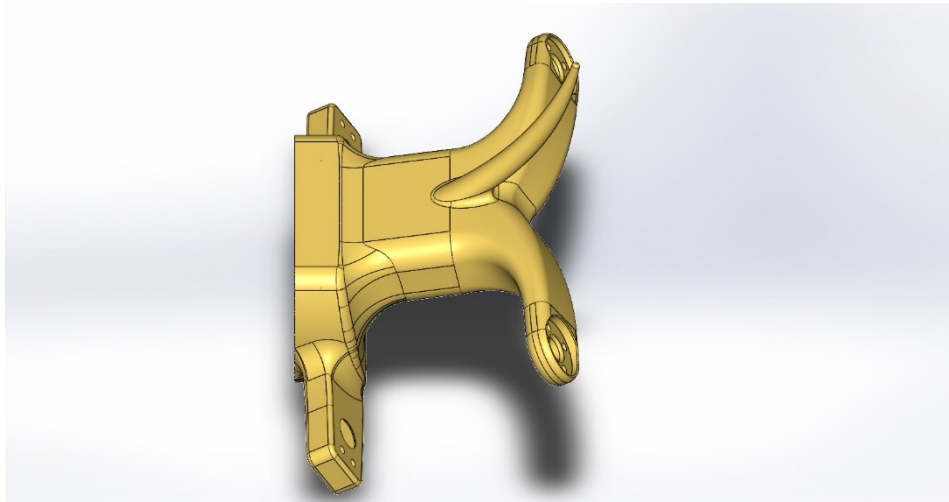


Obr.10.4 – Tělo robota s krytem elektroniky

Na obr.10.4 jsou 2 otvory v krytu elektroniky jeden, ten menší je určen pro monitorovací zařízení stavu baterie a ten větší je pro ventilátor, který slouží ke chlazení celé elektroniky uvnitř, jelikož zde dochází ke značnému zahřívání procesoru řídicí jednotka a také k ostatním komponentům elektroniky.

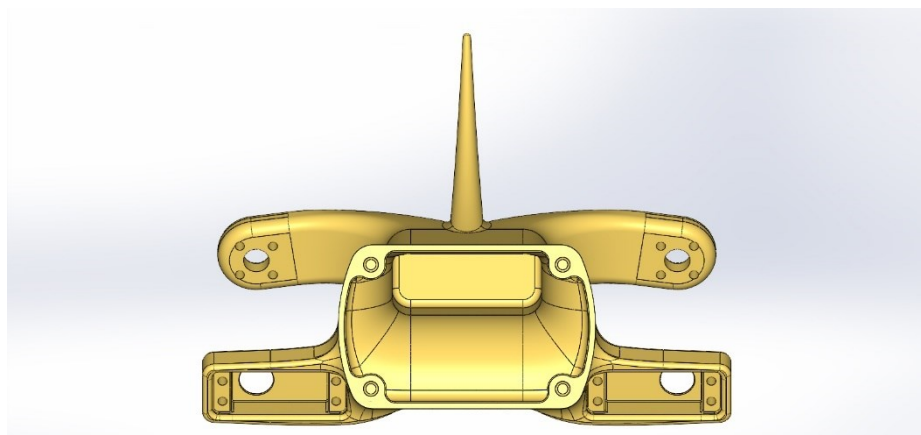
10.2 Zadní část

Zadní část, která je na obr.10.5, je navržena také s ohledem na celkovou hmotnost stejně tak jako u hrudní neboli přední části viz. kapitola 10.3. Pro dosažení požadavku na hmotnost je design vytvořen tak, aby byla konstrukce dutá, ale zároveň pevná. Dutá je také kvůli vnitřnímu vedení vodičů, aby byla zachována estetická stránka.



Obr.10.5 – Zadní část robota

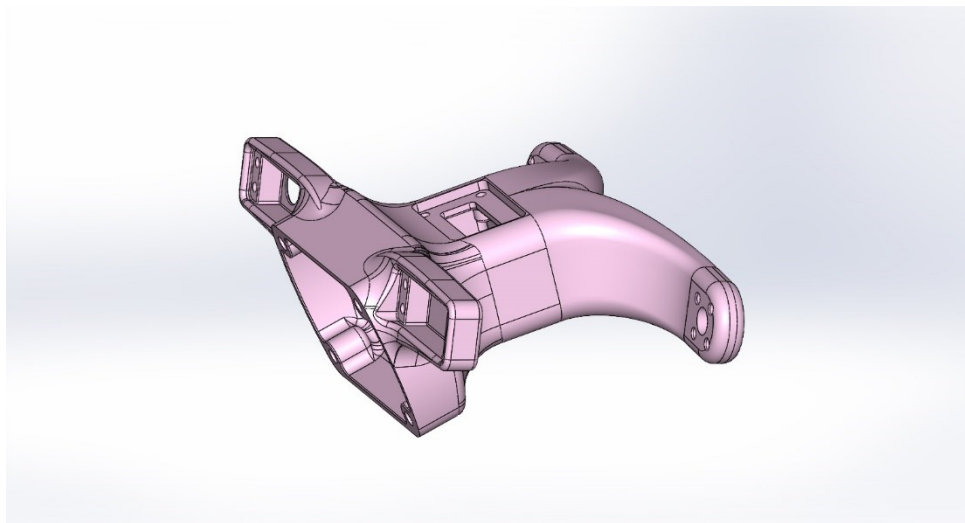
Na obr.10.5 lze vidět na pravé části kulaté otvory na obou stranách, které zde jsou pro uchycení čepů kyčelních kloubů, které se ke konstrukci uchyty čtyřmi šrouby na každé straně o velikosti M3, o kterých je psáno v předchozích kapitolách. Ocas zde je pouze pro estetické účely. Dále pak na obr.10.6 je zadní část, ale z pohledu zepředu, kde je jsou pro změnu na pravé i levé straně prohlubně pro uchycení servomotorů do této konstrukce, které se zase upevňují čtyřmi šrouby o velikosti M3. Také je zde vidět dutý design kvůli vedení kabeláže a odlehčení celé konstrukce.



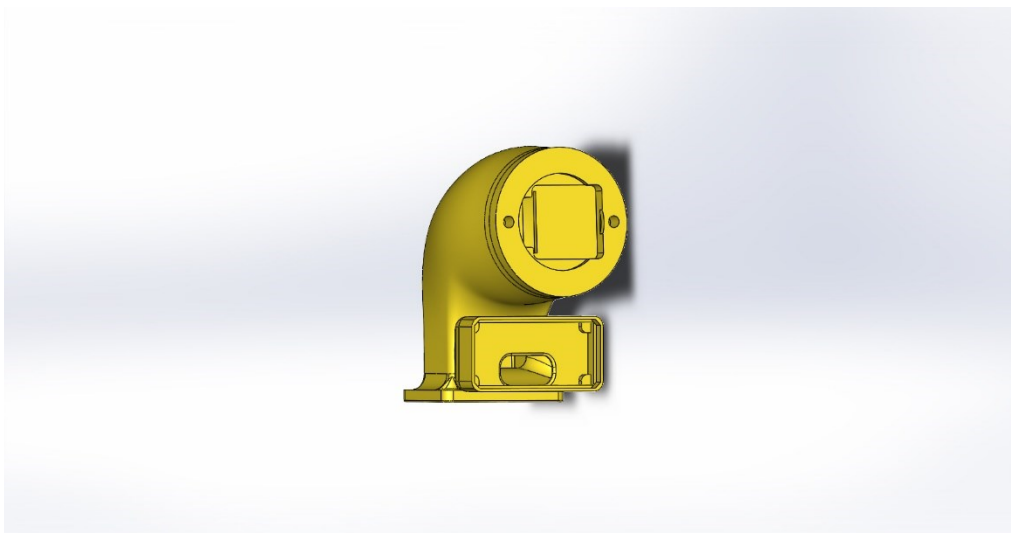
Obr.10.6 – Zadní část z pohledu zepředu

10.3 Přední část

Tato část má úplně stejnou koncepci jako přední část. Taktéž je celá konstrukce dutá kvůli hmotnosti a vedení kabeláže, rozdíl oproti zadní části je v tom, že přední část má motory upevněny nahoře oproti zadní části, která je má dole a dále také lze na vršku přední části nalézt otvor pro upevnění „hlavy“ robota viz. obr.10.8. Jak přední část, tak zadní část je připevněna k tělu šrouby o velikosti M5, proto jsou v obou součástech 4 díry na předních (otevřených) stranách do, kterých se tepelně zalisují již zmiňované závitové vložky, také o velikosti M5.



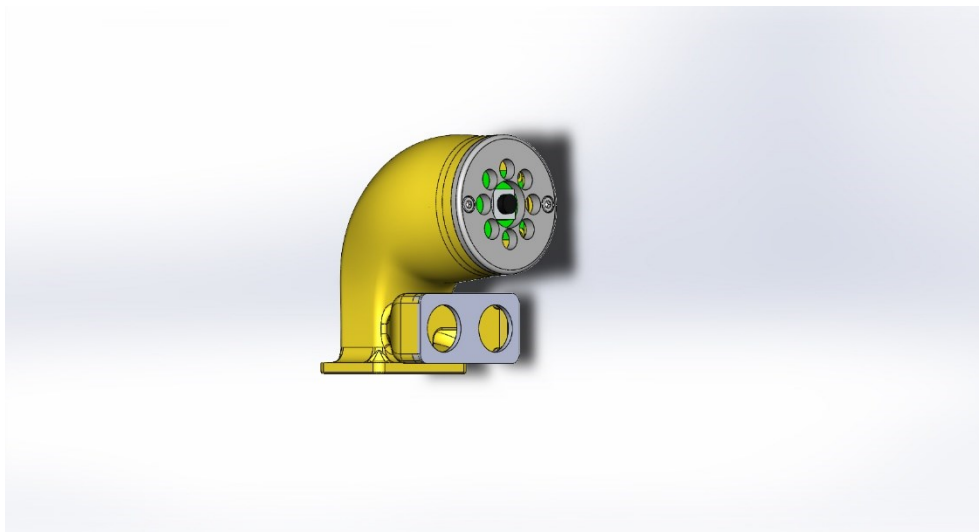
Obr.10.7 – Přední část robota



Obr.10.8 – „Hlava“ robota

Jak bylo zmíněno výše hlava je upevněna do přední části čtyřmi šrouby. Aby nevznikl nevzhledný spoj mezi hlavou a přední částí, tak je design vymyšlen tak že na spodku hlavy je

příruba, která se vsadí do prohlubně na přední části robotu, tím pádem je spoj hladký a není nikde žádná překryvná hrana. Tato součást je také dutá jako předchozí součásti, z důvodu již několikrát zmíněného. Do obdélníkového pouzdra je zasazen senzor vzdálenosti, který je přiklopen „víkem“ tohoto pouzdra. Na vrchu této kulaté části hlavy, co vypadá jako „oko“ je zepředu otvor kam se vloží kamera a okolo kamery je vložen světelný kruh pro přísvit nebo může sloužit pro osvětlení za špatného světla. Celková sestava hlavy, bez modelu senzoru vzdálenosti je zobrazena na obr.10.9.



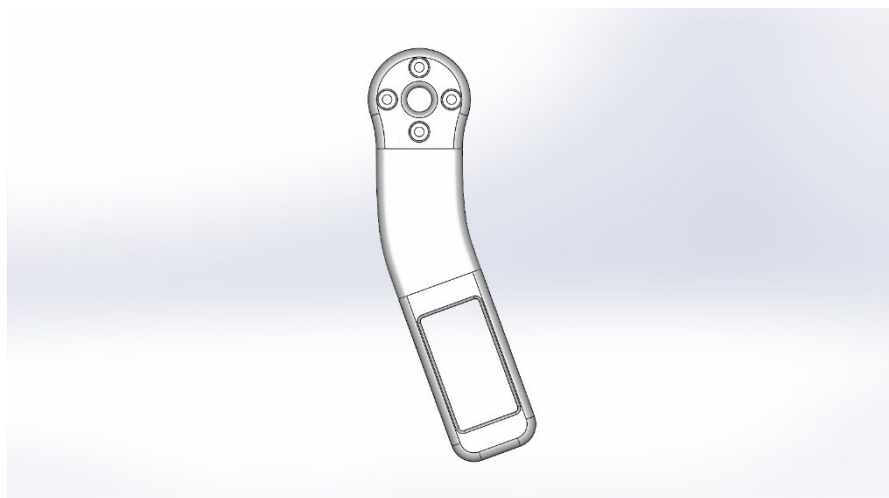
Obr.10.9 -Sestava hlavy robota

10.4 Koncepce nohy

Design nohy pro robota s čtyřmi nohama je zásadním prvkem celkové koncepce robota. Robotovy nohy nesou jeho hmotnost, umožňují mu pohyb a mají vliv na jeho stabilitu, agilitu a schopnost překonávat terén. Konstrukce nohy musí vyhovovat vysokým standardům pevnosti, flexibility, hmotnosti a energetické efektivity. Konstrukce nohy je rozdělena do dvou fází jednou z nich je již zmiňovaný kyčelní kloub, na který se upínají další části nohy. Druhou fází tvoří stehenní a holenní část nohy.

10.4.1 Stehenní část

Tato část nohy viz. obr.10.10 a 10.11 je napojena na servomotor, který je umístěn v kyčelním kloubu. Konstrukce je z větší části zase dutá, až na část, kde je umístěna servopáka, která je zapuštěna do konstrukce, zase kvůli estetice, a i vyšší pevnosti spoje servopáky s konstrukcí nohy. Tento spoj konstruován tak, že v servopáce jsou vyvrtány čtyři otvory pro uchycení, ve kterých jsou závity a ty samé otvory jsou v konstrukci této části nohy skrz které se prostrčí šrouby o velikosti M3, které jsou zašroubovány do závitů na servopáce.



Obr.10.10 – Stehenní část nohy zepředu



Obr.10.11 – Stehenní část nohy zezadu

Na obr.10.10 a 10.11 je stehenní část nohy zepředu a zezadu, kde je vidět zhloubení a uchycení pro servopáku a také pro servomotor, na který se dále pojí další a poslední část nohy.

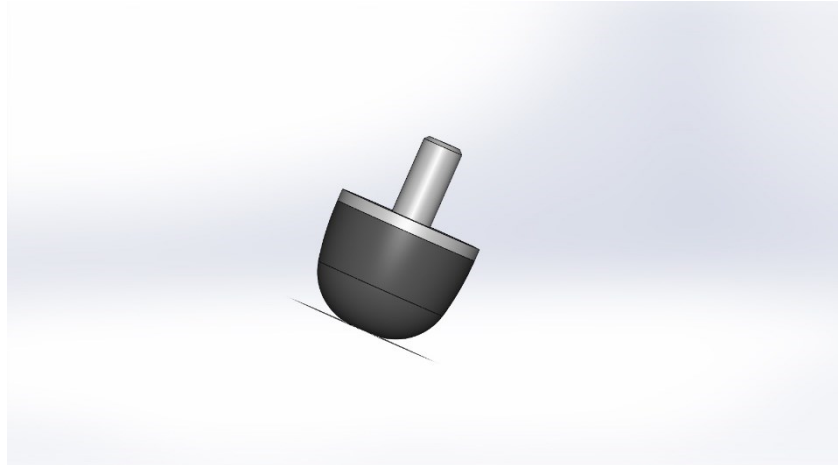
10.4.2 Holenní část

Holenní část viz obr.10.12 je konstruována stejným způsobem jako stehenní a pojí skrze servopáku na motor umístěný ve spodní části stehenní. Spojení je stejné jako u předchozí popisované součásti nohy robota.



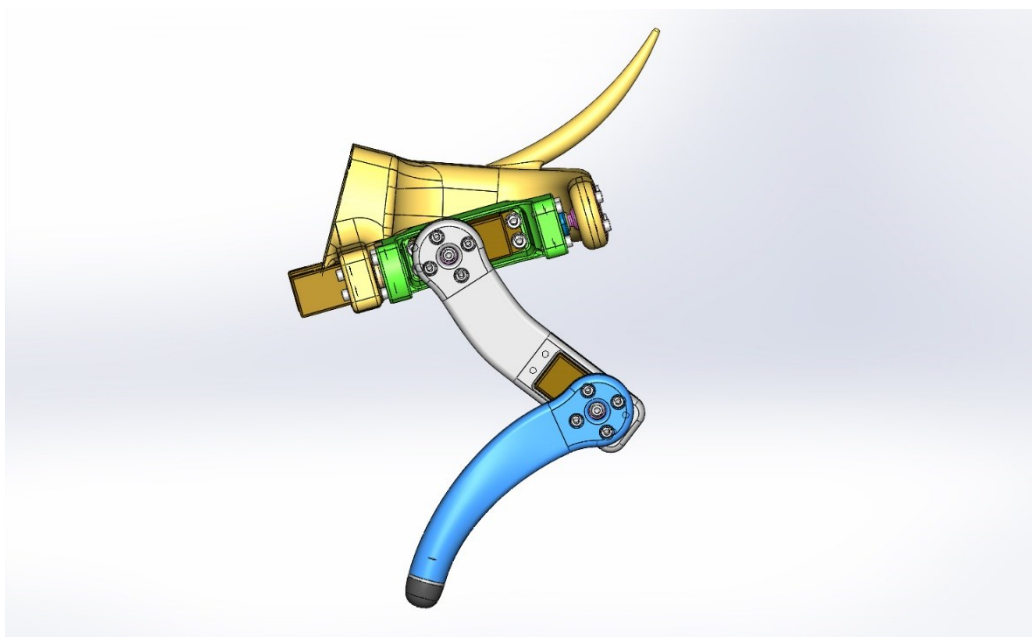
Obr.10.12 - holenní část nohy

Na obr 10.12 je znázorněna holenní část nohy, kde je vidět zase uchycení servopáky a také je na spodní části otvor, který slouží k zašroubování gumové koncovky nohy, která je tvořena gumovým silentblokem od firmy Aditeg viz obr.10.12. Tato koncovka je na noze z toho důvodu, aby noha neklouzala po povrchu, na kterém se bude robot pohybovat. Guma je zvolena kvůli svému neklouzavému povrchu.

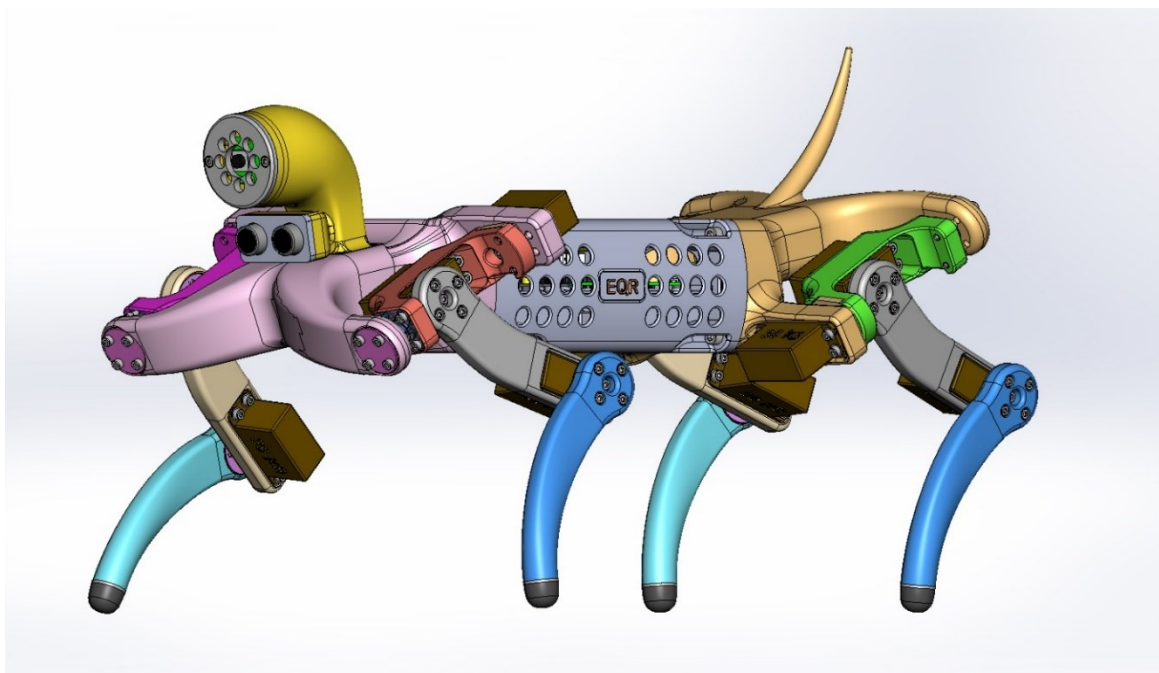


Obr.10.13 – 3D model gumového silentbloku

Na obr10.13 není zřejmý přesný model tohoto silentbloku, protože zde chybí závit, který je na oválném výstupku. Tento závit/šroub je zašroubován do zmiňovaného otvoru na spodní části holenní nohy, ve které je zalisována závitová vložka o velikosti M6. Celková sestava celé nohy je na zobrazena na obr.10.14 a celková sestava robota na obr.10.15 a 10.16.



Obr.10.14 – Celá sestava koncepce nohy



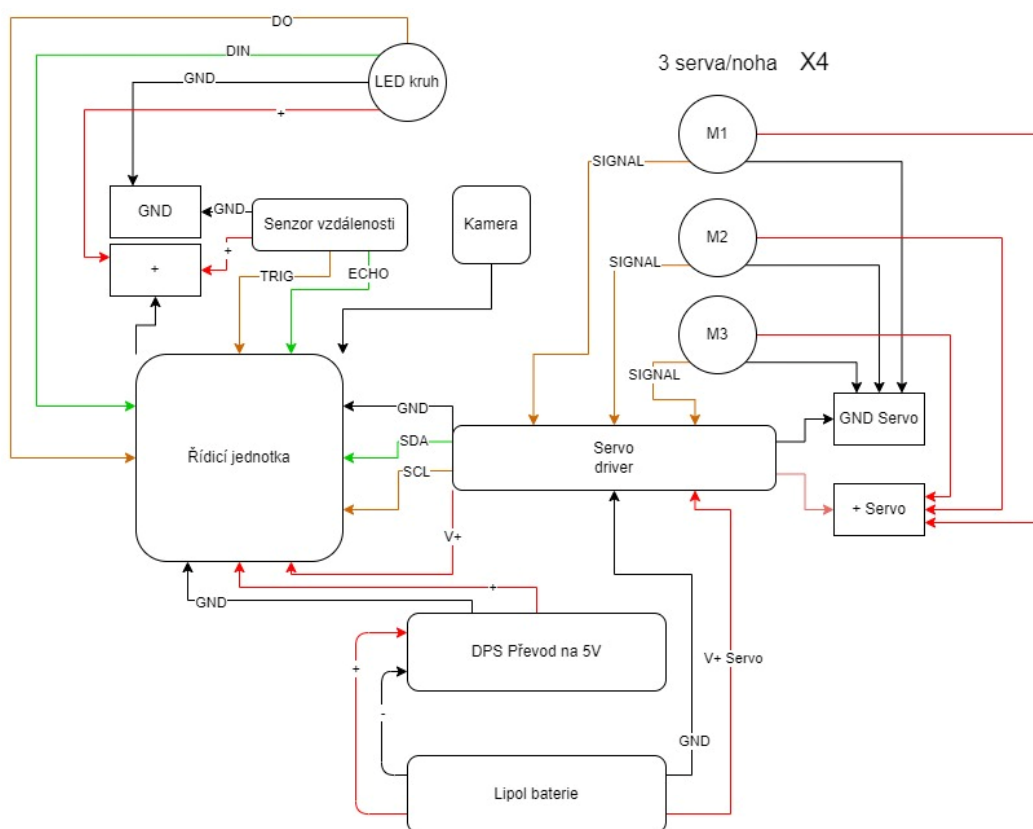
Obr.10.15 – 3D model celého robota



Obr.10.16 – Celková vytištěná a osazená sestava EQR

11 ELEKTRONIKA

Elektronika hraje klíčovou roli v provozu a řízení čtyřnohého robota. Zahrnuje všechny elektronické komponenty robota, jako jsou řídicí jednotky, senzory, akční členy, baterie a napájecí systémy. Důkladný návrh a implementace elektroniky je nezbytná pro dosažení požadované funkčnosti, výkonu a spolehlivosti robota. Blokové schéma zapojení elektroniky, podle kterého bude dále popisována je na obr.11.1.



Obr.11.1 – Blokové schéma zapojení elektroniky robota

11.1 Napájení

Celkové napájení robota je řešeno jednou Li-Pol baterií viz obr.11.2 od výrobce BigHobby konkrétně model BH-7200-35-2S jejíž parametry jsou k nalezení v tab.11.1.



Obr.11:2 – Li-Pol baterie (BigHobby)

Tab.11.1 – Technické parametry Li-Pol baterie (FlashHobby)

Model	BH 7200-35-2S (pevný obal)
Kapacita	7 200mAh
Napětí [V]	7.4 V
rozměry [mm]	25*46*138 mm
Váha	315 g
Stálý proud	35 C (252 A)
Max proud	70 C (504 A)
Vybíjecí konektor	Tdean
Servisní konektor	JST-XH

Kapacita baterie, jak je zřejmé z tabulky technických údajů je 7200mAh, tato kapacita je počítáno dle vzorce 11.1.

$$\text{Kapacita baterie} = \text{odběr proudu} \times \text{doba} \times 1000 \quad (11.1)$$

Kde Kapacita baterie je udávána v mAh
Odběr proud v A
Doba, po kterou má robot vydržet je v hodinách
*1000 je zde kvůli přepočtu na správné jednotky

Po dosazení do 11.1 lze získat 11.2.

$$\text{Kapacita baterie} = 12 \times 0,5 \times 1000 \quad (11.2)$$

Když je vypočítána 11.2, tak výsledná kapacita baterie je v 11.3.

$$\text{Kapacita baterie} = 6000 \text{ mAh} \quad (11.3)$$

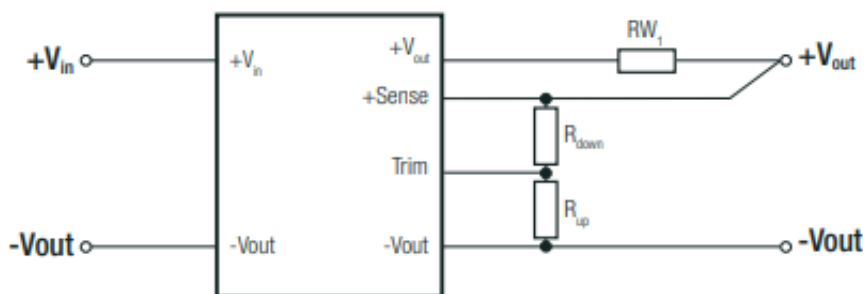
Výsledná kapacita baterie je vypočítána na 6000 mAh, dle 11.3, ale kvůli naddimenzování baterie byla zvolena vyšší kapacita, aby vznikla rezerva. Napětí baterie bylo zvoleno podle toho, aby bylo dostatečné pro napájení servomotorů.

Z baterie jsou napájeny servomotory, ale také je napětí z baterie pomocí DC/DC převodníku RPM 5.0-3.0-CT, který je na obr.11.3 převáděno na napětí 5 V DC pro napájení řídicí jednotky, z které jsou pak napájeny ostatní části obvodu. Tudíž jsou pro napájení vytvořeny dvě napěťové úrovně a to 7,4V DC a 5 V DC.



Obr.11.3 – DC/DC převodník RPM 5.0-3.0-CT (RECOM, 2021)

Podle (RECOM, 2021), zapojení tohoto konvertoru je na obr.11.4, kde je ale navíc funkce trimeru, která dokáže výstupní napětí regulovat od 0,9 do 5,5V DC. V zapojení, které je používáno v robotu je funkce Trim nevyužita a tím pádem ani funkce +Sense není použita, a proto je připojena pouze k výstupu V_{OUT} . V tab.11.2 jsou uvedeny technické parametry dle datasheetu (RECOM, 2021).

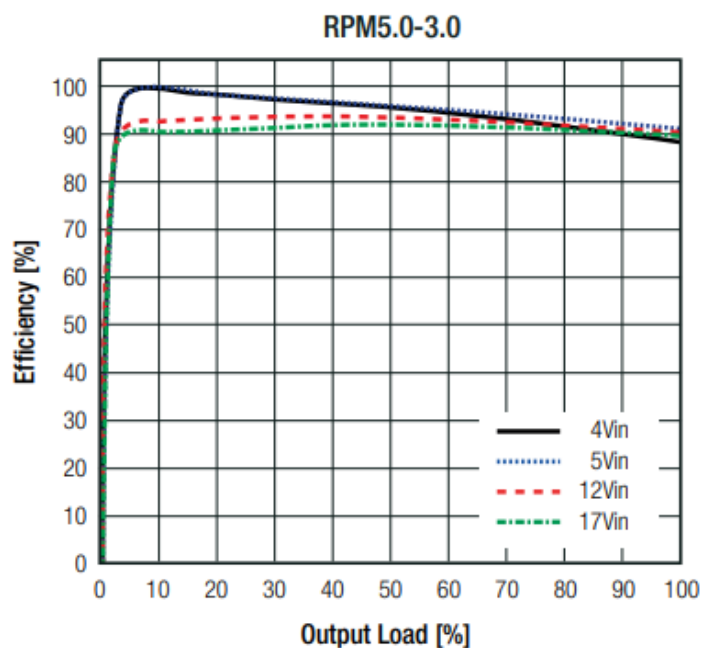


Obr.11.4 – Schéma zapojení převodníku RPM (RECOM, 2021)

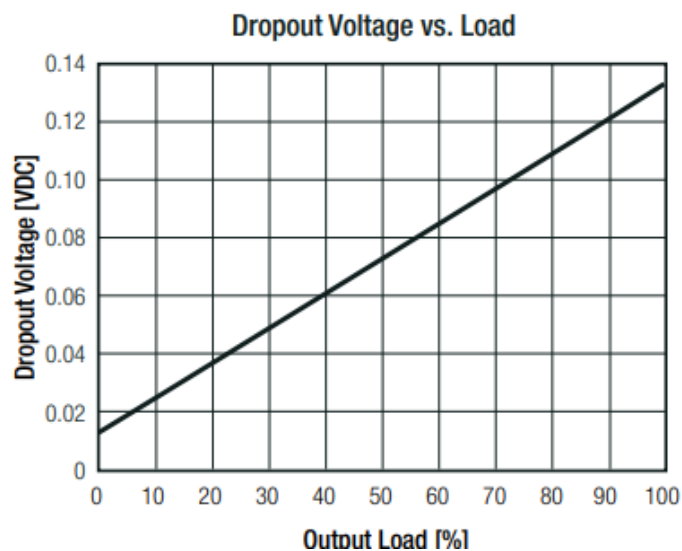
Tab.11.2 – Technické parametry napěťového převodníku (RECOM, 2021)

Vstupní napětí [VDC]	3-17
Výstupní napětí [VDC]	5
Výstupní nastavitelné napětí [VDC]	0.9–6.0
Výstupní proud max. [A]	3.0
Účinnost [%]	90–97

Graf účinnosti v závislosti na zatížení tohoto převodníku je zobrazen na obr:11.5.a závislost úbytku napětí na zátěži výstupu je zobrazena na obr.11.6.



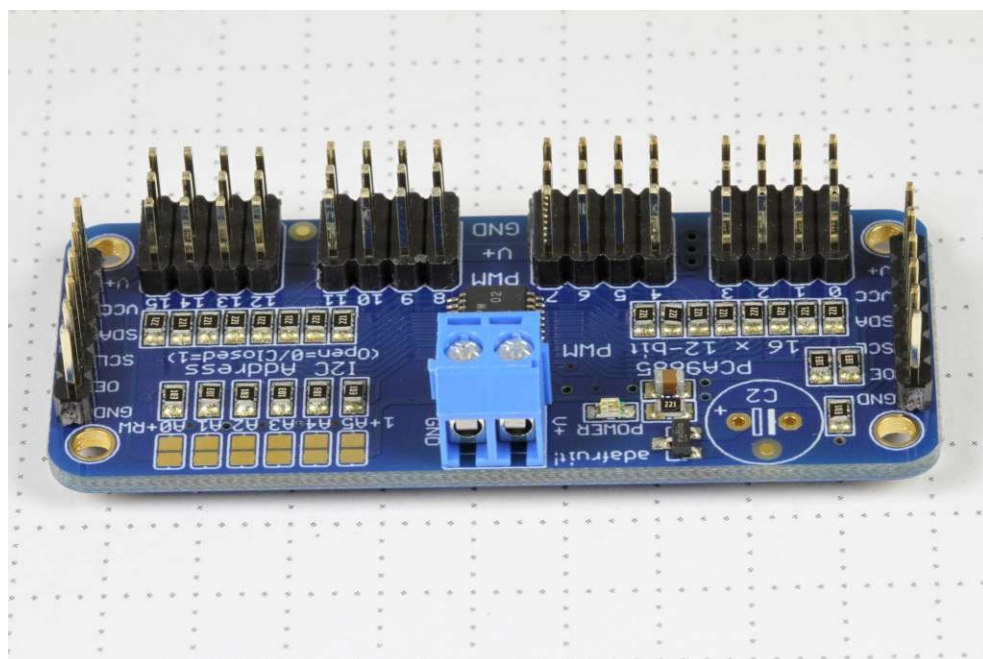
Obr.11.5 – Graf účinnosti v závislosti na zatížení (RECOM, 2021)



Obr11.6 - Závislost úbytku napětí na zátěži výstupu (RECOM,2021)

11.2 Servo driver

Servo driver, jak už vyplívá z názvu je v zapojení používán k ovládání servomotorů, přes I2C sběrnici, kde řídicí jednotka posílá pulsy PWM o různých délkách a podle toho se řídí otáčení servomotorů. V tomto zapojení je konkrétně používán driver Adafruit PCA9685, který lze vidět na obr.11.7. Technické parametry jsou vidět v tab.11.3.



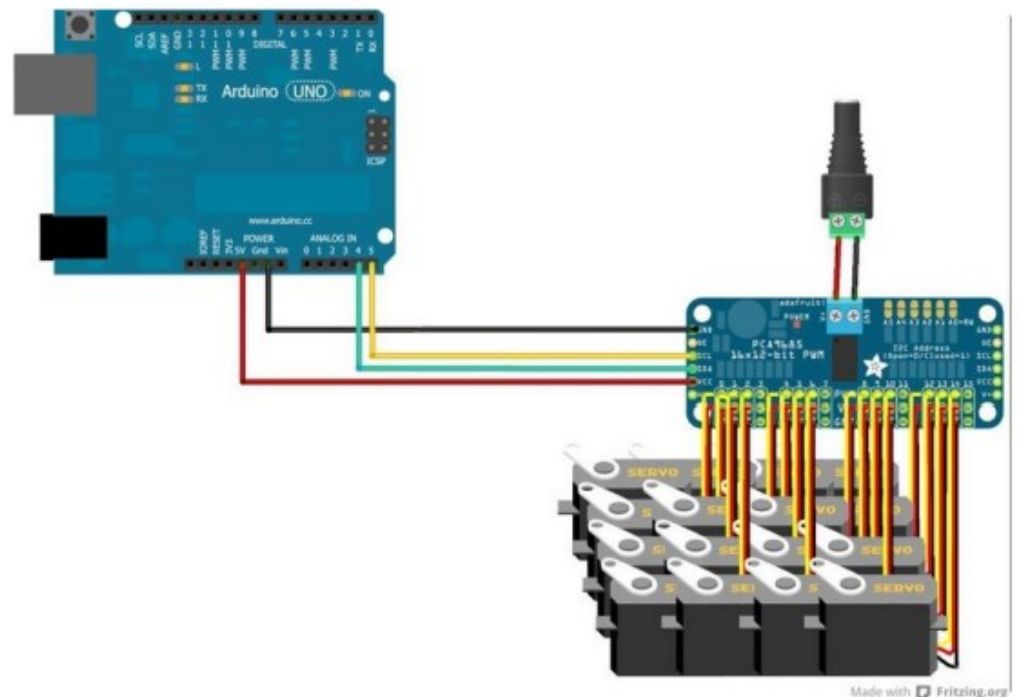
Obr.11.7 – Servo driver Adafruit PCA9685 (ADAFRUIT, nedatováno)

Tab.11.3 – Technické parametry modulu PCA9685 (ADAFRUIT, nedatováno)

Frekvence PWM	40–1000 Hz
Počet kanálů	16
Rozlišení	12 bitů
Napětí	5–12 VDC
Rozměry	60x25 mm
Hmotnost	12 g

Modul viz. obr.11.7, který je vybavený integrovaným obvodem PCA9685, nabízí dle tab.11.3 16 kanálů s funkcí PWM. To umožňuje ovládat až 16 servomotorů připojených k tomuto modulu s rozlišením PWM 12 bitů. Modul je vybaven napájecím konektorem pro externí zdroj napětí pro serva na vrchu, 16 konektory pro připojení serv na spodní straně a piny pro připojení modulu k řídicí jednotce na stranách. Na vrchu modulu jsou také pájecí plošky označené jako A0-A5, které slouží k nastavení I2C adresy. Díky možnosti propojení více těchto

modulů PCA9685 a díky 6bitové adrese můžeme mít až 64 těchto modulů. (ADAFRUIT, nedatováno)



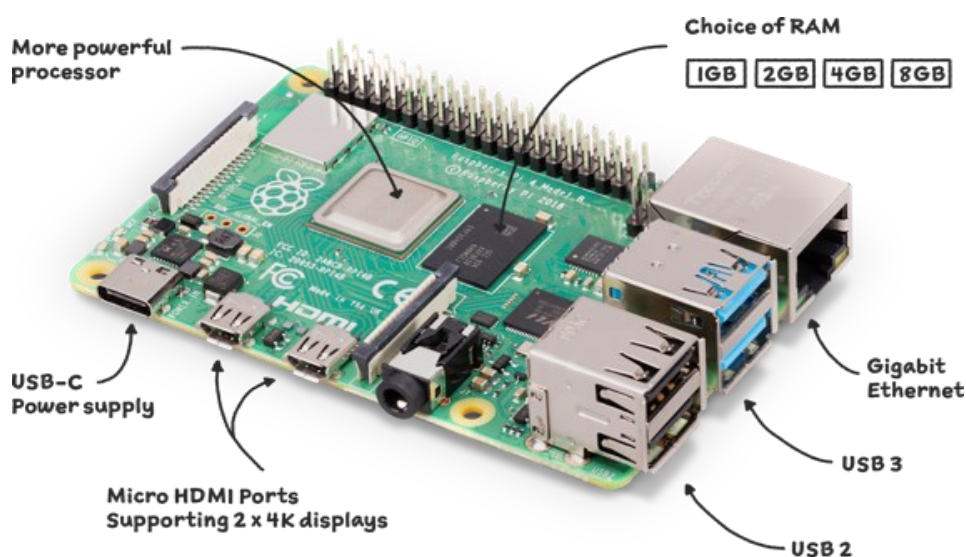
Obr.11.8 – Schéma zapojení modulu a propojení s řídicí jednotkou (ADAFRUIT, nedatováno)

Na obr.11.8, je k vidění schéma zapojení modulu se servomotory a s řídicí jednotkou konkrétně s Arduino UNO R3. Jak bylo již zmíněno pro připojení servomotorů slouží vystouplé konektory na spodní straně modulu a na vrchní straně je externí napájení servomotorů, na boční straně jsou dva piny pro připojení k řídicí jednotce a dva piny pro napájení modulu. Pin VCC, který slouží k napájení modulu je připojen k 5 V na arduinu a pin GND na GND arduina, dále zde jsou piny pro komunikaci po I2C konkrétně SDA a SCL, tyto piny musí být vždy propojeny s vyhrazenými piny, které slouží k I2C komunikaci na vybrané řídicí jednotce u Arduina to je pin A4 pro SDA a A5 pro SCL.

11.3 Řídicí jednotka

Tato jednotka viz obr.11.9 je mozkm celého robota, jelikož řídí vše, od pohybu až k plánování trajektorie a zpracování informací ze senzorů. Pro tyto účely byl zvolen miniaturní počítač Raspberry pi model 4B, který disponuje dle (Raspberry pi, 2024) čtyřjádrovým procesorem Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC s taktovací frekvencí 1,6 GHz, operační paměť RAM 4GB LPDDR4 -3200 SDRAM a také podporuje 2,4/5 GHz bezdrátové připojení wifi a Bluetooth 5.0. Další technické specifikace jsou uvedeny v tab11.4.

Raspberry Pi 4 Model B má 40 pinů: 26 GPIO pinů, dva 5V piny, dva 3V3 piny a 7 ground pinů (0V). GPIO piny RPI 4 jsou schopné generovat PWM výstup a deska podporuje SPI, I2C a UART sériové komunikační protokoly.



Obr.11.9 – Raspberry pi 4B (RASPBERYPi, nedatováno)

Tab.11.4 – Technické parametry Raspberry pi 4B (RASPBERYPi,2024)

Parametr	Detail
Procesor	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz
Paměť RAM	1GB, 2GB, 4GB nebo 8GB LPDDR4-3200 SDRAM (podle modelu)
Bezdrátová konektivita	2.4 GHz a 5.0 GHz IEEE 802.11ac, Bluetooth 5.0, BLE
Ethernet	Gigabit Ethernet
USB porty	2 USB 3.0 porty; 2 USB 2.0 porty
HDMI porty	2 × micro-HDMI (podpora až 4kp60)
Napájení	5V DC přes USB-C konektor (minimálně 3A*), 5V DC přes GPIO header (minimálně 3A*)

11.4 Senzor vzdálenosti

Senzor vzdálenosti v konstrukci robota plní funkci detekce překážky a měří vzdálenost mezi překážkou a robotem. Pro tyto účely je zvolen ultrazvukový senzor vzdálenosti, který dokáže měřit s velkou přesností a není ovlivněn materiálem od kterého se ultrazvuková vlna odrazí jako například u senzorů vzdálenosti laserových, kde může docházet k lomu světla a tím pádem ke zkreslování informace o vzdálenosti k překážce, a to může mít za následek špatné vyhodnocení a kolizi robota s překážkou.

Konkrétně je pak zvolen modul HCSR04, jehož ilustrace je na obr.11.10. a jeho technické údaje jsou uvedeny v tab.11.5.



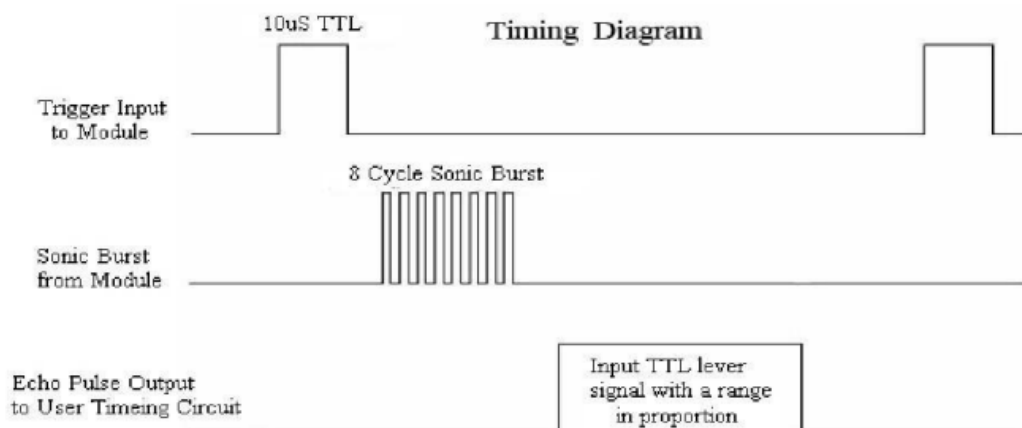
Obr.11.10 – UZ senzor vzdálenosti HCSR04 (ELECTFREAKS, nedatováno)

Tab.11.5 – Technické údaje senzoru HCSR04 (ELECTFREAKS, nedatováno)

Pracovní napětí	DC 5 V
Pracovní proud	15 mA
Pracovní frekvence	40 Hz
Max. dosah	4 m
Min. dosah	2 cm
Úhel měření	15°
Rozměry	45x20x15 mm

Podle (ELECTFREAKS, nedatováno). Časový diagram viz.obr.11.11 zobrazuje princip fungování modulu. Pro zahájení měření stačí na vstupní pi trigger poslat krátký 10 mikrosekundový impuls. Modul následně vyšle 8 cyklů ultrazvukového signálu o frekvenci 40 kHz a zároveň spustí měření echa.

Echo je pulzní šířka objektu vzdáleného od modulu. Vzdálenost je přímo úměrná délce trvání ozvěny.



Obr.11.11 – Časový průběh UZ senzoru HCSR04 (ELECTFREAKS, nedatováno)

Vzdálenost lze vypočítat z časového intervalu mezi odesláním trigger signálu a přijetím signálu echo dle 11.4.

$$Vzdálenost = Doba\ vysokého\ signálu \times \frac{Rychlost\ zvuku}{2} \quad (11.4)$$

Kde Rychlost zvuku je 340 m/s

Pro zabránění překrytí Trigger a Echo signálu je doporučeno používat měřicí cyklus větší než 60 ms.

11.5 Kamera

Kamera je zde umístěna kvůli vizuálnímu kontaktu robota s operátorem. Zjednodušeně řečeno, aby člověk viděl vše, co vidí robot při svém průzkumu. Kamera je vybrána tak, aby měla malé rozměry, snadné připojení, velké rozlišení a vysoké zorné pole, z tohoto důvodu padla při výběru do oka právě RPI camera 3 wide viz. obr.11.12



Obr.11.12 – RPI camera 3 wide (RASPBERRYPI, 2023)

Jak je uvedeno v datasheetu (Raspberrypi, 2023). Oficiální kamerový modul Raspberry Pi, který je vybaven obrazovým snímačem CMOS s rozlišením 12 Mpx (Sony IMX708), který se vyznačuje zadním osvětlením a skládáním na sebe. Díky vysokému odstupu signálu od šumu (SNR) a vestavěné 2D dynamické korekci vadných pixelů (DPC) je schopen poskytnout kvalitní obraz. Modul také obsahuje funkci automatického ostření s fázovou detekcí (PDAF), která umožňuje rychlé automatické ostření. Kromě toho je vybaven funkcí QBC Re-mosaic a režimem HDR, který poskytuje výstup až 3 Mpx. Modul komunikuje pomocí sériového datového výstupu CSI-2 a dvou vodičové sériové komunikace, která podporuje rychlý režim I2C a rychlý režim plus. Zaostrovací mechanismus je ovládán dvou vodičovým sériovým ovládáním. Podrobné technické informace jsou k nalezení v tab.11.6.

Tab.11.6 – Technické specifikace RPI cam 3 Wide (RASPBERRYPI, 2023)

Specifikace	Camera 3 Wide
IR filtr	ano
Rozlišení snímku	11,9 Mpx
Režimy videa	1080p50, 720p100, 480p120
Snímač	Sony IMX708
Rozlišení snímače	4608 × 2592 px
Plocha snímače	7,4 mm napříč
Optická velikost	1/2,43"
Hloubka ostrosti	Automatické ostření s fázovou detekcí
Ohnisková vzdálenost	120°
Horizontální zorné pole	102°
Vertikální zorné pole	67°
Ohnisková vzdálenost (F-Stop)	F2.2
Maximální doba expozice (sekundy)	112
Minimální zaostřovací vzdálenost (MOD)	5 cm

Kamera je k řídicí jednotce připojena tzv. flex kabelem viz.obr.11.13 přes rozhraní CSI na kamerový konektor.



Obr.11.13 – Flex kabel pro připojení kamery (RPISHOP)

11.6 Osvětlení cesty robota

O osvětlení cesty robota za špatných světelných podmínek a pro přisvit kamery, taktéž za špatných světelných podmínek a pro světelnou vizualizaci poruch nebo upozornění se používá světelný kruh, který je umístěn okolo kamery v „hlavě“ robota, konkrétně RGB NEOPIXEL ring 8, který je složen z osmi RGB led diod typu WS2812 viz. obr.11.14. Tyto diody lze řídit pomocí pouze 3 pinů, a to jednoho datového a dvou napájecích. Technická parametry dle datasheetu (ECLIPSERA s.r.o., 2021), jsou uvedeny v tab.11.7.



Obr.11.14 – Neopixel ring 8 (Dratek)

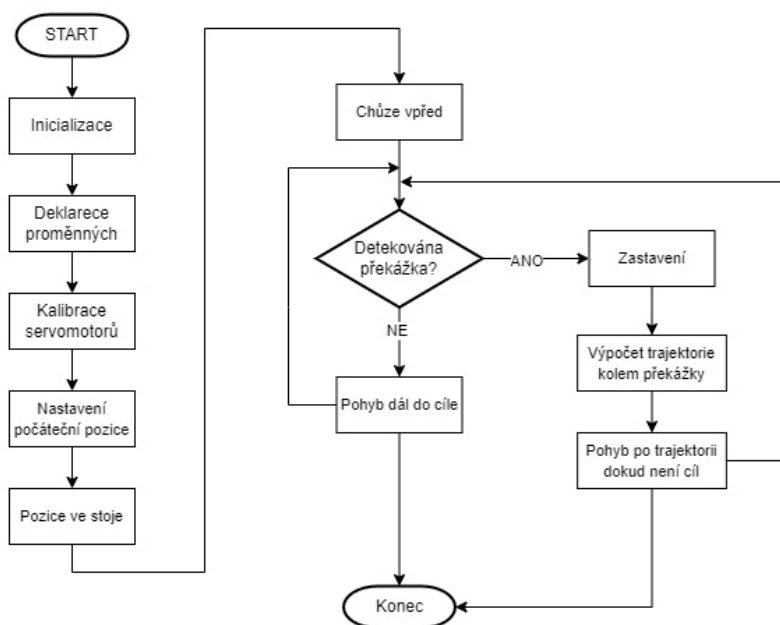
Tab.11.7 – Technické specifikace Neopixel ring 8 (ECLIPSERA, 2021)

Specifikace	NEOPIXEL ring 8
Typ LED diody	WS2812B
Počet LED	8
Barevné spektrum	RGB
Napájecí napětí	DC 5 V
Max. proud	280 mA

Připojení tohoto module je realizováno pomocí 2 pinů pro napájení V+ a GND a datového pinu, který je připojen na nějaký digitální pin na řídicí jednotce.

12 SOFTWARE

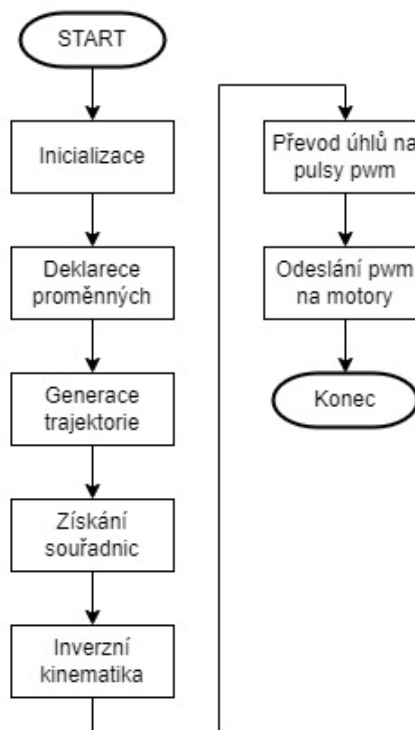
Software robotu je implementován na řídicí jednotce, která je popsána v kapitole 11.3. Dále vše bude popisováno dle vývojového diagramu, který je zobrazen na obr.12.1.



Obr.12.1 – Základní vývojový diagram softwaru

12.1 Chůze

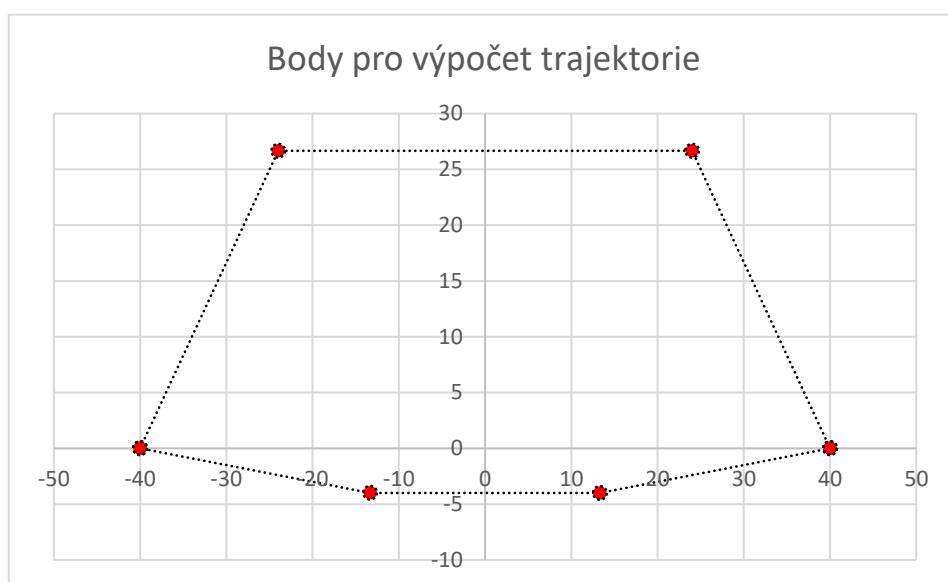
Asynchronní algoritmus chůze je rozdělen do třech fází nejprve je vygenerována trajektorie kroku, z které jsou získány potřebné souřadnice x , y a z pro polohu koncového efektoru nohy. Tyto souřadnice jsou dále předány funkci pro výpočet inverzní kinematiky, která přijímá tyto souřadnice a vypočítává úhel natočení jednotlivých servomotorů, dále pak jsou tyto úhly přepočítány na pulsy pwm, které jsou pak posílány na servomotory a ty se podle toho natáčejí. Takto je implementován algoritmus pro jednu nohu, ten je pak s časovým zpožděním implementován i na ostatní nohy. Vývojový diagram algoritmu chůze je na obr.12.2.



Obr.12.2 – Vývojový diagram algoritmu chůze

12.1.1 Generace trajektorie

Pro generování trajektorie jsou zvoleny 4 body pro fázi švihů a 4 body pro fázi opory, kde jsou 2 body stejné, takže dohromady ne 8, ale 6 bodů je potřeba pro generování trajektorie. Tyto body jsou počítány na základě tří parametrů, a to délka kroku, výška kroku a hloubka kroku. Body jsou zobrazeny na obr.12.3, kde pro výpočet byly použity parametry v tab.12.1.



Obr.12.3 – Počáteční body pro výpočet trajektorie

Tab.12.1 – Parametry pro výpočet počátečních bodů

délka kroku [mm]	80
výška kroku [mm]	20
hloubka kroku [mm]	3

Když jsou známy počáteční, které určují tzv. řídicí polygon je možné přejít k samotnému výpočtu celé trajektorie kroku, která je počítána pomocí kubické Bézierovi křivky. Trajektorie je vytvořena ze dvou těchto křivek jedna pro fázi švihů a jedna pro fázi opory.

Tato křivka n-tého stupně je určena n+1 kontrolními body. Tyto body tvoří takzvaný řídicí polygon. Křivka je definována pro hodnoty t v intervalu od 0 do 1 dle (12.1.).

$$C(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t)P_i \quad (12.1)$$

Kde P_i jsou řídicí body, které tvoří řídicí polynom

$B_{i,n}(t)$ je i -tý Bernsteinův polynom n -tého stupně viz. (12.2.).

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (12.2)$$

Konkrétně pak pro kubickou Bézierovu křivku, kde $n=3$ což znamená, že je to křivka 3. stupně, protože $n+1=4$, a proto jsou 4 body pro fázi švihů a 4 body pro fázi opory, když je dosazeno do (12.1.) vznikne (12.3.).

$$C(t) = \sum_{i=0}^3 \binom{3}{i} t^i (1-t)^{3-i} P_i \quad (12.3)$$

Zápis bez sumy je pak v (12.4)

$$C(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3 \quad (12.4)$$

Kde $P_0 - P_n$ jsou řídicí body a P_n v tomto konkrétním příkladě, kde je nutné získat souřadnice x, y je (12.5).

$$P_n = [X_n; Y_n] \quad (12.5)$$

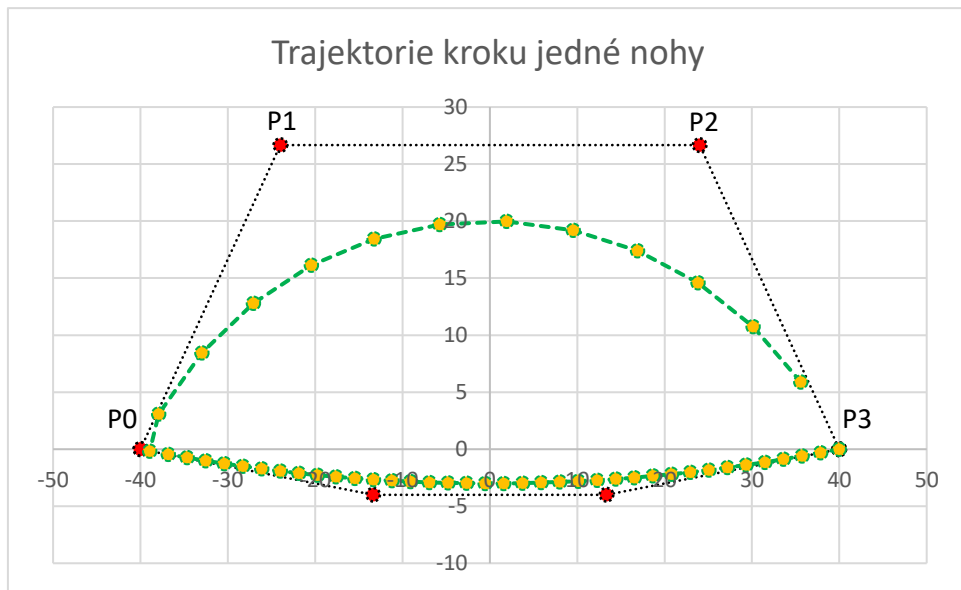
Pro výpočet souřadnic x, y a z je pak použita rovnice (12.6) pro x , (12.7.) pro y a (12.8) pro z .

$$x = (1-t)^3 x_0 + 3t(1-t)^2 x_1 + 3t^2(1-t) x_2 + t^3 x_3 \quad (12.6)$$

$$y = (1-t)^3 y_0 + 3t(1-t)^2 y_1 + 3t^2(1-t) y_2 + t^3 y_3 \quad (12.7)$$

$$z = (1-t)^3 z_0 + 3t(1-t)^2 z_1 + 3t^2(1-t) z_2 + t^3 z_3 \quad (12.8)$$

Výsledná trajektorie s 50 body je zobrazena obr.12.4.

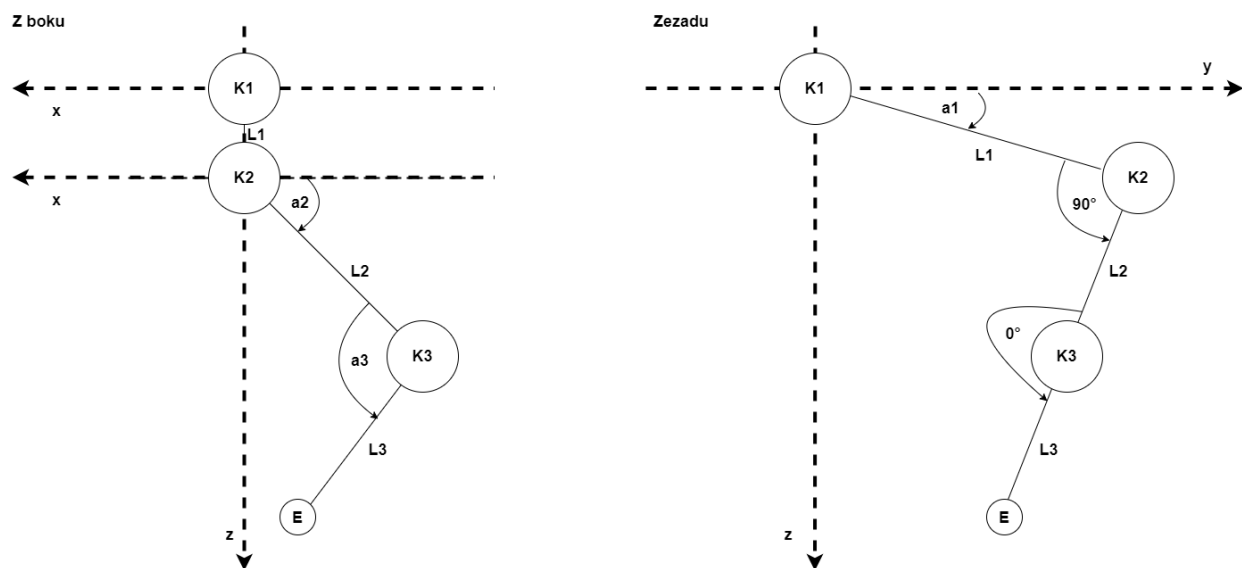


Obr:12.4 – Trajektorie pro jeden krok

Kubická Bézierova křivka je definována čtyřmi body: P0, P1, P2 a P3. Křivka se zrodí v bodě P0, pokračuje směrem k bodu P1 a následně se odklání směrem k bodům P2 a P3. Je důležité poznamenat, že křivka obecně neprochází přímo body P1 a P2. Tyto body slouží k určení tvaru křivky. Bod P1 určuje směr, kterým se křivka od bodu P0 vydává, zatímco bod P2 určuje směr, kterým se křivka blíží k bodu P3.

12.1.2 Inverzní kinematika

Když jsou známy souřadnice x , y a z koncového bodu nohy podle lokálního ss, tak lze pomocí inverzní kinematiky vypočítat úhly jednotlivých servomotorů, podle kinematického modelu z pohledu zezadu robota a z boku na obr12.5.



Obr:12.5 – Kinematický model čtyřnohého robota EQR

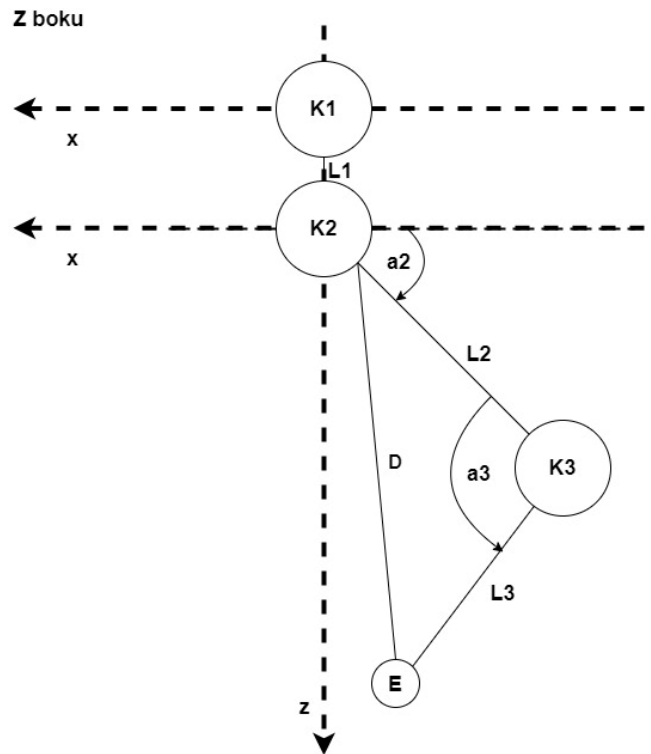
Podle obrázku, kde K1, K2 a K3 jsou klouby nohy a a_1 , a_2 a a_3 jsou úhly jednotlivých servomotorů, které jsou potřeba vypočítat. L1, L2 a L3 jsou délky jednotlivých segmentů nohy a E znázorňuje koncový „efektor“ nohy. V tab12.2 jsou parametry nohy.

Tab.12.2 – Parametry nohy

L1	30 mm
L2	102 mm
L3	128.98 mm

Pro účely výpočtu inverzní kinematiky je vytvořena funkce, která jako vstup přijímá souřadnice koncového efektoru nohy E_x , E_y a E_z a vrací úhly servomotorů a_1 , a_2 a a_3 .

Když robot provádí chůzi rovně není nutné počítat úhel a_1 , protože je vždy roven 90° . Pro výpočet inverzní kinematiky jedné nohy lze postupovat podle obr.12.6 a (12.9), kde je vypočítána dosažitelnost bodu E podle Pythagorovy věty.



Obr.12.6 – Upravený kinematický model pro a_3

$$D = E_x^2 + E_z^2 \quad (12.9)$$

Kde E_x a E_z jsou souřadnice x a y koncového bodu/efektoru nohy

Dále pak podle Kosinovy věty za pomocí délek segmentů nohy lze vypočítat (12.10.).

$$D^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos(a_3) \quad (12.10)$$

Z (12.10) lze vytknout $\cos(a_3)$ viz. (12.11.).

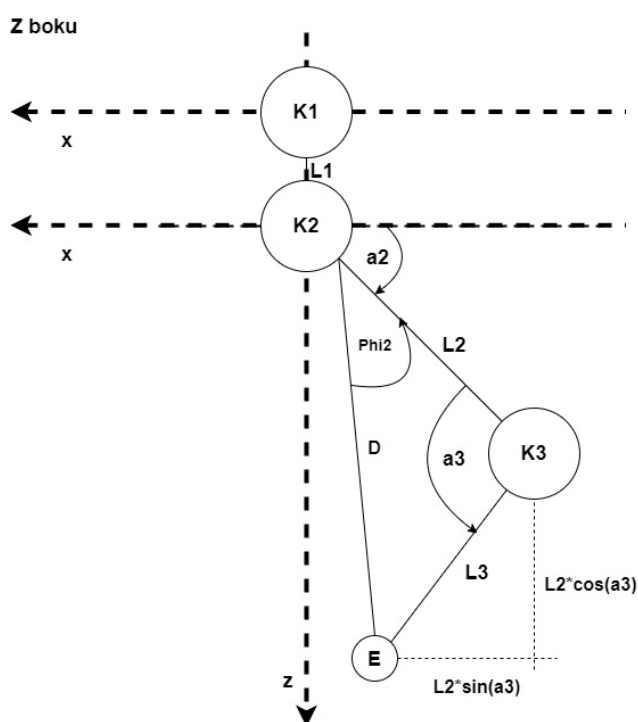
$$\cos(a_3) = \frac{L_2^2 + L_3^2 - D^2}{2L_2L_3} \quad (12.11)$$

Pro úhel a_3 jsou 2 možnosti jedna pro kloub K3 orientovaný dolů a druhá nahoru, Když je K3 orientován dolů, tak platí (12.12), a když dolů, tak platí (12.13).

$$a_{3_{down}} = -\cos^{-1}\left(\frac{E_x^2 + E_z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}\right) \quad (12.12)$$

$$a_{3_{up}} = \cos^{-1}\left(\frac{E_x^2 + E_z^2 - L_2^2 + L_3^2}{2L_2L_3}\right) \quad (12.13)$$

Dle obr.12.7 lze postupně vypočítat úhel a_2 .



Obr.12.7 – Upravený kinematický model pro a_2

Z obr.12.7, lze vypočítat podle tangetové věty (12.14).

$$\tan(a_2 + \Phi_{i2}) = \frac{E_z}{E_x} \quad (12.14)$$

Z rovnice (12.14) lze jednoduchou úpravou dostat (12.15).

$$a_2 = \tan^{-1} \left(\frac{E_z}{E_x} \right) - \text{Phi}_2 \quad (12.15)$$

Použitím Kosinovy věty lze získat rovnici (12.16) pro výpočet pomocného úhlu Phi_2 .

$$\text{Phi}_2 = \tan^{-1} \left(\frac{L_3 \sin(a_3)}{L_2 + L_3 \cos(a_3)} \right) \quad (12.16)$$

Pro konečný výpočet úhlu a_2 lze použít (12.17).

$$a_1 = \tan^{-1} \left(\frac{E_z}{E_x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L_3 \sin(a_3)}{L_2 + L_3 \cos(a_3)} \right) \quad (12.17)$$

12.1.3 Převod úhlů na pulsy

Jak již bylo zmíněno pro ovládání servomotorů jsou zapotřebí pulsy pwm o různých šířkách, a proto je nutné úhly vypočítané z inverzní kinematiky dále zpracovat, než se mohou odeslat informace o natočení servomotorů. Nejprve je nutné vypočítané úhly převést na stupně, jelikož vypočtené úhly jsou v radiánech, to lze udělat pomocí (12.18).

$$\text{Úhel}_{\text{stupně}} = \text{Úhel}_{\text{rad}} \times 180/\text{Pi} \quad (12.18)$$

Kde $\text{Úhel}_{\text{stupně}}$ jak již vyplývá z názvu je požadovaný úhel ve stupních

Úhel_{rad} jak již vyplývá z názvu je požadovaný úhel v radiánech

Pi je konstanta, která je rovna 3,14159

Dále je potřeba úhly ve stupních přepočítat podle konfigurace servomotorů robota, což znamená podle toho, jak jsou servomotory nastaveny na tzv. nulovou polohu, v tomhle případě jsou servomotory nastaveny na 90° a s touto hodnotou je nutné počítat při přepočtu úhlů.

Přepočítané úhly je nutno dále převést na pulsy pwm signálu k tomu je nutné znát minimální a maximální možnou hodnotu signálu pwm pro konkrétní servo, což se dá zjistit z datasheetu anebo jako v tomto případě je možné v datasheetu viz. obr.9.2 zjistit minimální a maximální šířku pwm pulsu v mikrosekundách, což v tomhle případě je 500 až 2500 mikrosekund, když jsou tyto hodnoty zjištěny je možné přejít k výpočtu pro minimální viz. (12.19) a maximální viz. (12.20) hodnotu pwm signálu.

$$PWM_{min} = \frac{(US_{min} \times 4096 \times f)}{1000000} \quad (12.19)$$

$$PWM_{max} = \frac{(US_{max} \times 4096 \times f)}{1000000} \quad (12.20)$$

Kde PWM_{min} a PWM_{max} je minimální a maximální hodnota PWM signálu.

US_{min} a US_{max} je minimální a maximální šířka pulzu PWM signálu

4096 je kvůli 12-bitovému rozlišení signálu což znamená až 4096 hodnot

f je frekvence PWM signálu v Hz

hodnota 1000000 je kvůli převodu na sekundy

Po dosazení konkrétních hodnot do (12.19) a (12.20) vzniknou výsledné (12.21) a (12.22)

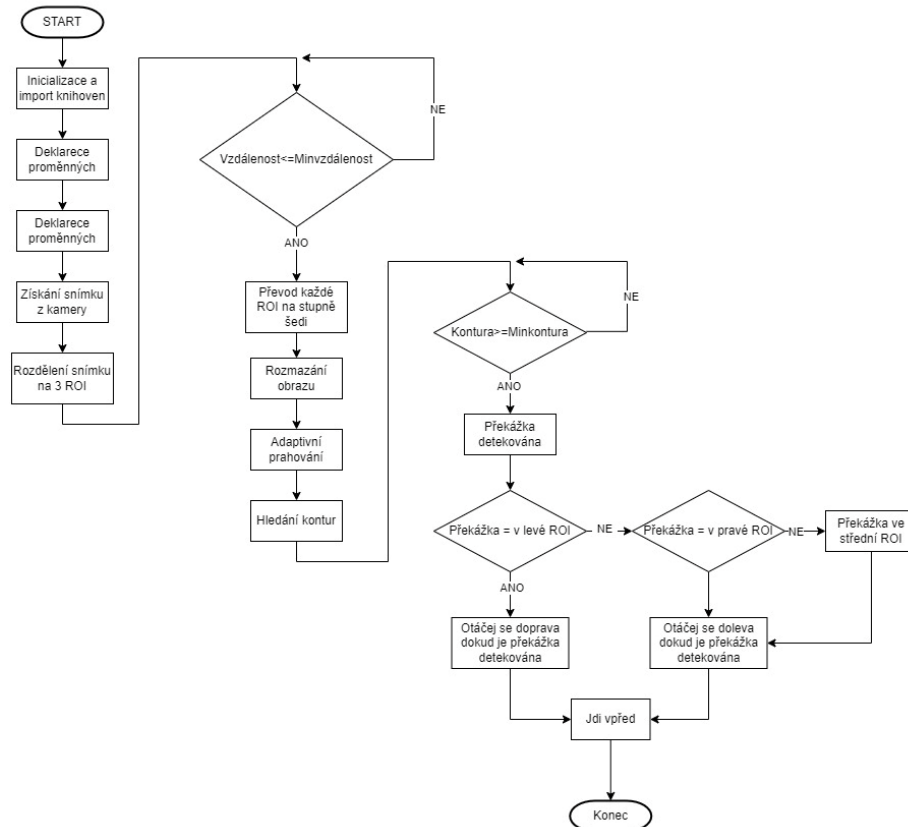
$$PWM_{min} = \frac{(500 \times 4096 \times 333)}{1000000} \quad (12.21)$$

$$PWM_{max} = \frac{(2500 \times 4096 \times 333)}{1000000} \quad (12.22)$$

Když jsou (12.21) a (12.22) vypočítány je nezbytné přejít k další a poslední části, a to je namapovat výsledné úhly ve stupních, které jsou přepočítané na korektní hodnoty v rozsahu 0-180 stupňů na hodnoty signálu PWM (PWM_{min} a max) a následně tyto hodnoty odeslat na příslušný kanál servodriveru a tím řídit servomotory.

12.1.4 Detekce v okolí

Pro detekci v okolí je používána již zmíněná kamera, která, ale nedokáže určit, jak daleko se nachází robot od objektu nebo překážky, a tak je k detekci ještě používán senzor vzdálenosti, který pozná, jak daleko je robot od detekované překážky, o kterém již také je psáno v předešlých kapitolách. Detekce je založena na vývojovém diagramu na obr.12.8.



Obr.12.8 – Vývojový diagram detekce v okolí

K detekci pomocí kamery je používána knihovna OpenCV a picamera2, které umožňují získat snímky z kamery. V každém cyklu se získá nový snímek a v tomto cyklu je rozdělen snímek na 3 části podle šířky a výšky tohoto snímku na levou střední a pravou část snímku, pokud je vzdálenost aktuální větší než nastavená hodnota pro hranici detekce, aby robot stihl včas reagovat a nenarazil do překážky, tak se detekce v rozděleném snímku neprovádí, ale pokud je menší nebo rovna hraniční vzdálenosti, tak se detekce provádí a podle toho se upraví dále chování robota. Když je překážka na některé části snímku detekována, tak se obkreslí její hrany a zvýrazní se, aby ji operátor viděl na kameře a nešla přehlédnout a také se vypíšou informace v jaké části snímku je překážka detekována.

13 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ A ANALÝZA

Tato kapitola je věnována experimentálnímu ověření a analýze schopností pro různé scénáře.

13.1 Ověření inverzní kinematiky

Pro ověření inverzní kinematiky robota se používá dopředná kinematika robota, která oproti inverzní kinematice přijímá úhly natočení kloubů a vrací souřadnice x , y a z , na základě délek segmentů nohy stejně tak jako inverzní kinematika. Výpočet dopředné kinematiky je zřejmý z (13.1) pro souřadnici x , (13.2) pro y a z (13.3) pro z .

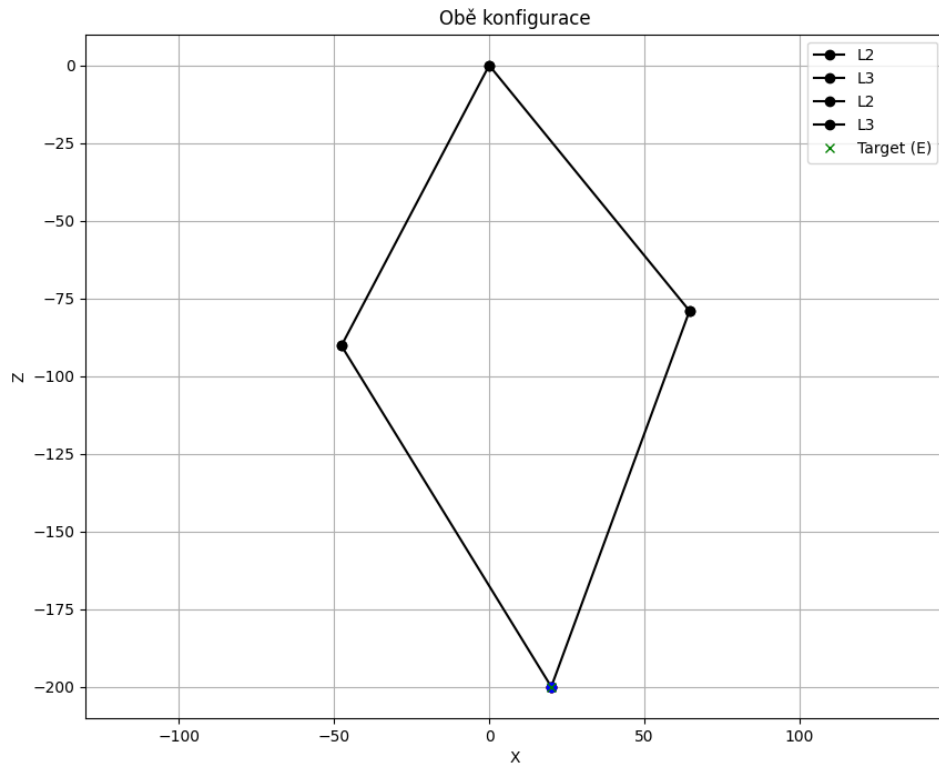
$$x = L_1 \cos a_1 + L_2 \cos(a_1 + a_2) + L_3 \cos(a_1 + a_2 + a_3) \quad (13.1)$$

$$y = L_1 \sin a_1 + L_2 \sin(a_1 + a_2) + L_3 \sin(a_1 + a_2 + a_3) \quad (13.2)$$

$$z = L_1 \sin a_2 + L_2 \sin(a_2 + a_3) \quad (13.3)$$

Kde x , y a z jsou souřadnice koncového „efektoru“ nohy
 L_1 , L_2 a L_3 jsou délky jednotlivých článků nohy
 a_1 , a_2 a a_3 jsou úhly natočení jednotlivých kloubů

Ověření správnosti inverzní kinematiky je provedeno na dvou různých sadách souřadnic, kde je vypočítána i dopředná kinematika a následně grafické zobrazení pro obě konfigurace nohy to znamená pro *up* a *down*. Na obr.13.1 je ověření správnosti pro souřadnice $x = 20.0$ a $z = -200$ pro inverzní kinematiku na 13.2 pro dopřednou.



Obr.13.1 – Ověření IK pro souřadnice $x = 20.0$ a $z = -200.0$

Dopředna kinematika - pozice: (20.00000000000014, -200.0)

Obě konfigurace

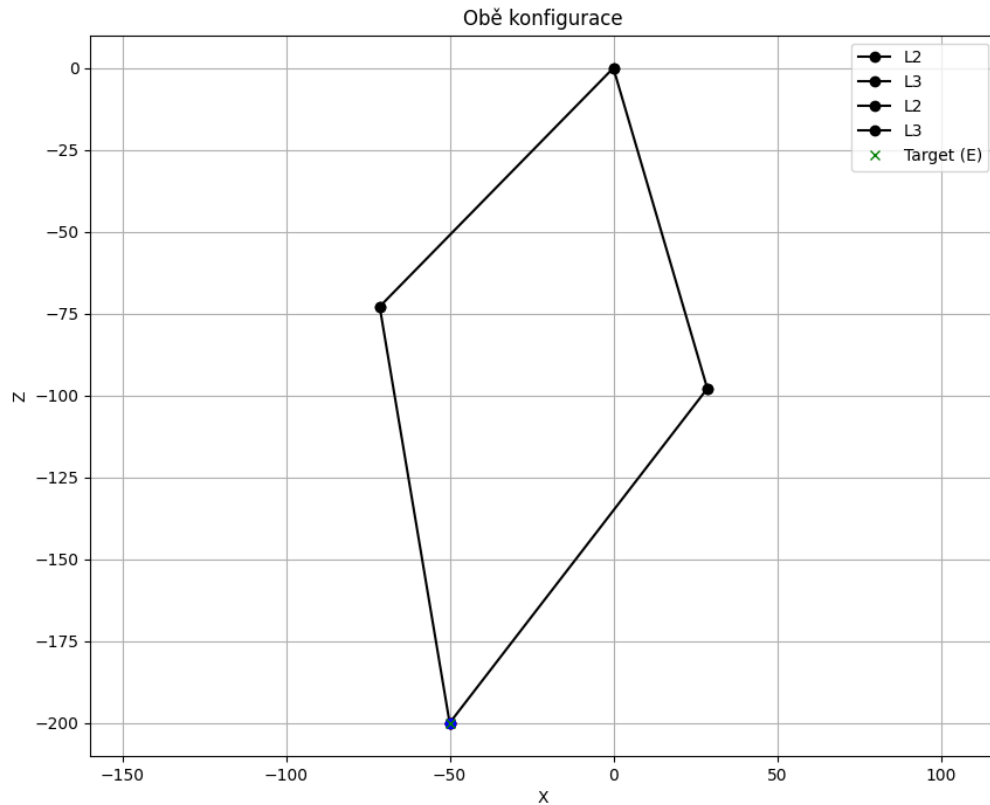
Obr.13.2 – Ověření FK pro x a z stejné jako na obr.13.1

Na obr.13.3 a 13.4 je viditelné ověření pro $x = -50$ a $z = -200$.

Dopředna kinematika - pozice: (-50.00000000000003, -200.0)

Obě konfigurace

Obr.13.3 – Ověření FK pro $x = -50$ a $z = -200$



Obr.13.4 – Ověření IK pro $x = -50$ a $z = -200$

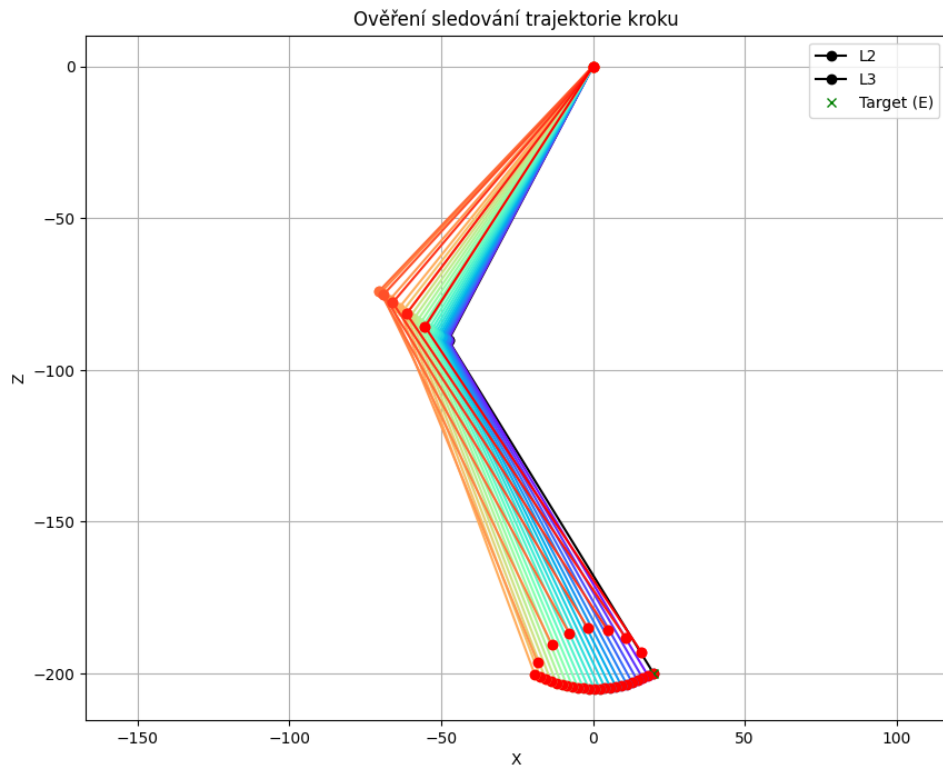
13.2 Ověření trajektorie kroku

Ověření trajektorie kroku jedné nohy pro různé parametry kroků a následné ověření sledování trajektorie nohou robota za pomoci grafů.

Trajektorie kroku nohy je vytvořena za pomoci dvou Béziových křivek jedna pro fázi švihu, která je rychlejší a jedna pro fázi opory, která je pomalejší, což je vidět podle počtu bodů na každou fázi pohybu nohy. Pro obr13.5 jsou parametry kroku nastaveny viz tab.13.1.

Tab.13.1 – Parametry kroku pro obr.13.4.

Délka kroku	40 mm
Výška kroku	15 mm
Hloubka kroku	5 mm
Počet bodů trajektorie	30 bodů

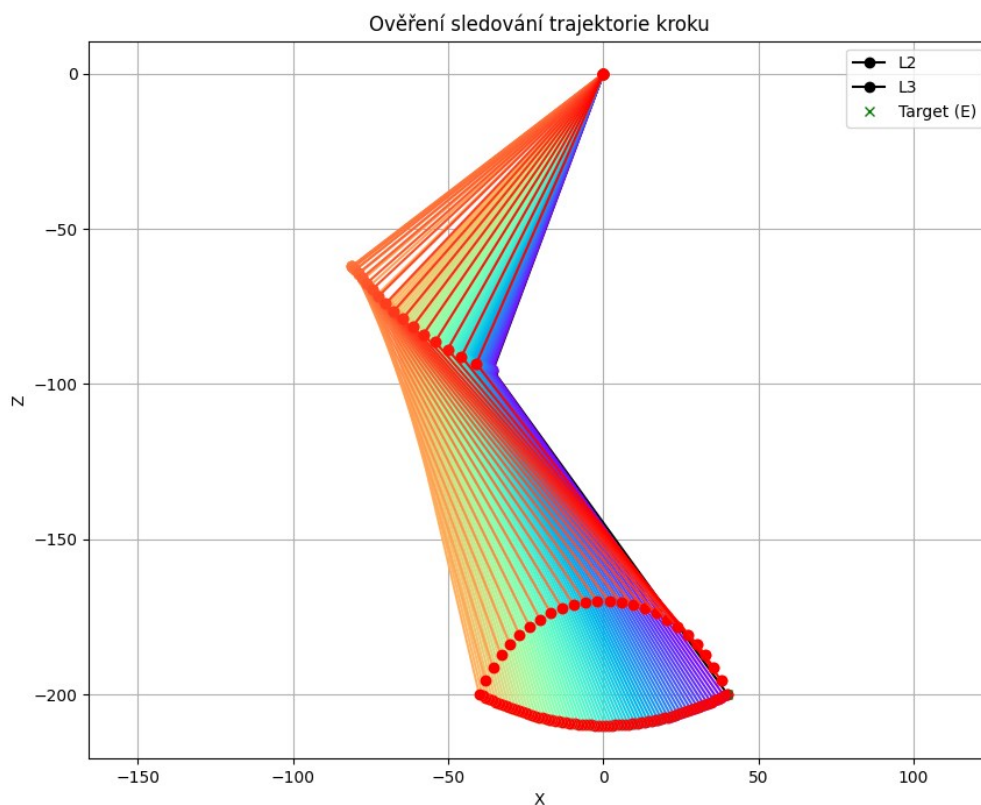


Obr.13.5 – Trajektorie kroku s parametry z tab13.1.

Z obr13.5 je vidět, že červené body jsou body trajektorie a různě barevné čáry jsou jednotlivá natočení nohy podle této trajektorie. Jak již bylo zmíněno pro fázi švihu je bodů méně, a proto je rychlejší, protože její zpracování trvá méně času a pro fázi opory je bodů více, a proto je pomalejší z důvodu lepší stability robotu. V tab13.2 jsou uvedeny jiné parametry kroku pro obr.13.6, aby ověření nebylo jen pro jeden případ parametrů, ale aby bylo otestováno více scénářů.

Tab.13.2 – Parametry kroku pro obr.13.6.

Délka kroku	80 mm
Výška kroku	30 mm
Hloubka kroku	10 mm
Počet bodů trajektorie	100 bodů

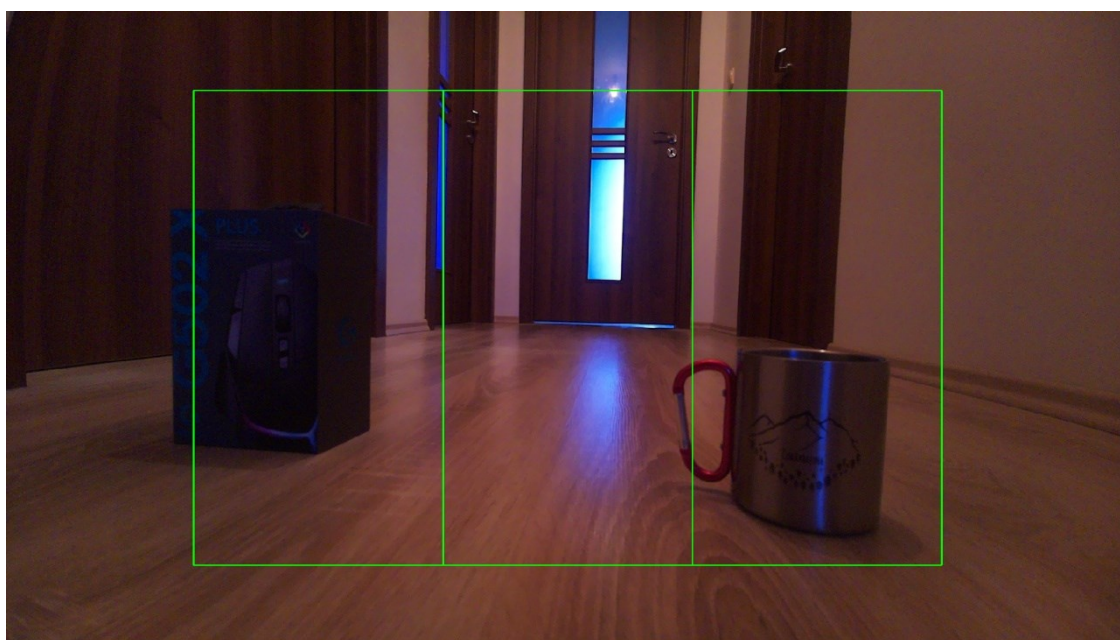


Obr.13.6 – Trajektorie kroku s parametry z tab13.2.

Z tab.13.2 je zřejmé, že se parametry kroku výrazně změnili, a proto je vidět i z obr.13.6, že i trajektorie je výrazně změněna a vypadá jinak, jelikož je na trajektorii tentokrát 100 bodů místo 30 je z obrázku jasné, že hustota počtu bodů se výrazně zvýšila a také, že se celkový krok zvýšil, přesně podle zadaných parametrů.

13.3 Ověření detekce

Ověřena bude samotná detekce překážek kamerou, nejdříve bez měření vzdálenosti k překážce a poté i s měřením vzdálenosti. Detekce je prováděna, jak bylo zmíněno pomocí kamery a snímače vzdálenosti za pomoci knihovny OpenCV. Konkrétně detekce začíná inicializací kamery s danou konfigurací, včetně formátu a velikosti obrazu, který je nastaven na 1920x1080 pixelů. Poté je obraz zachycen z kamery a tento obraz je zpracován pro detekci překážek. Zpracování obrazu začíná definicí oblasti zájmu (ROI), což je část obrazu, která bude analyzována na přítomnost překážek. Velikost a poloha ROI jsou definovány na základě šířky a výšky obrazu., kde šířka ROI je nastavena na $\frac{2}{3}$ šířky celého obrazu dělené třemi, protože jsou 3 obdélníky a výška je nastavena na $\frac{3}{4}$ výšky obrazu a poloha celé ROI je vycentrována na střed obrazu, jak je vidět na obr.13.7.



Obr.13.7 – Snímek z kamery s vyznačenými ROI

Detekce je prováděna pouze ve vyznačených ROI a každá je zpracovávána samostatně proto bude dále zobrazována pouze pravá ROI s hrníčkem jako překážkou. Původní obraz je převeden na šedotónový viz. obr.13.8, což znamená, že se odstraní barva a obrázek se zobrazí pouze v odstínech šedé. Tento šedotónový obraz je rozmazán pomocí Gaussova filtru, což snižuje šum a detaily v obraze. Aplikace Gaussova filtru je k vidění na obr.13.9.



Obr.13.8 – Vstupní obraz převeden na stupně šedi



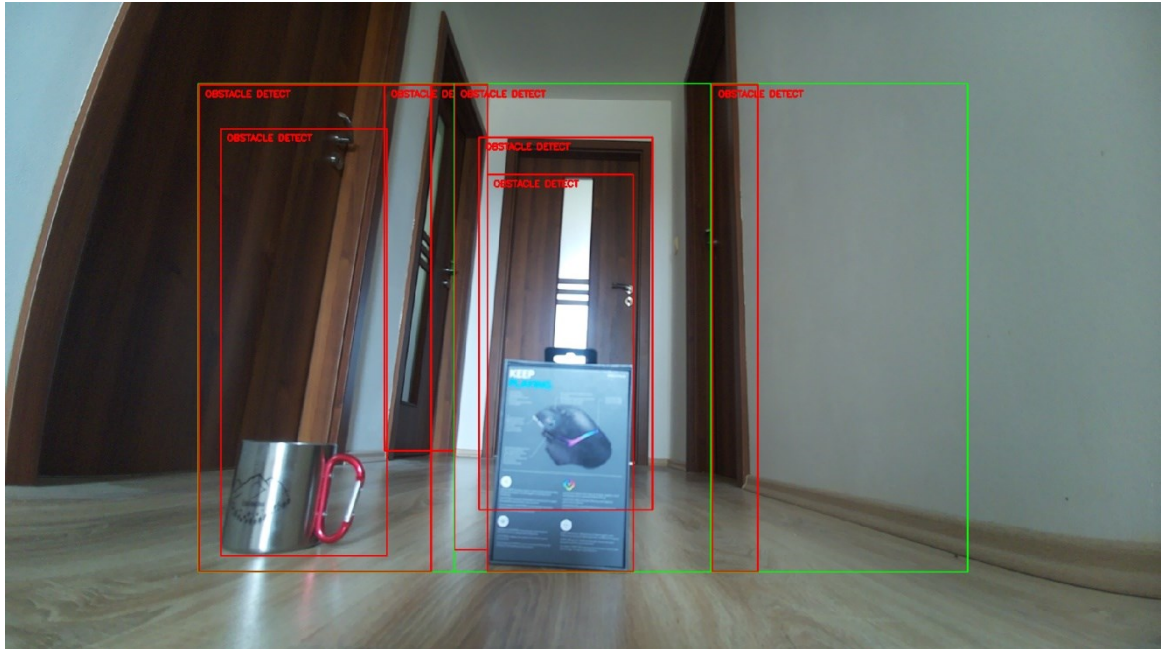
Obr.13.9 – Aplikace Gaussova filtru

Na rozmazaný obraz je aplikováno adaptivní prahování. To znamená, že všechny pixely s intenzitou nad určitým prahem se stanou bílými a všechny pixely s intenzitou pod tímto prahem se stanou černými. Tím se vytvoří binární obraz, který je snadnější analyzovat viz. obr.13.10.



Obr.13.10 – Adaptivní prahování

V prahovém obraze jsou poté nalezeny kontury. Kontura je jednoduše spojená křivka všech souvislých bodů na hranici objektu. Pro každou konturu, která má větší plochu než definovaná minimální plocha kontury, se vykreslí obdélník a text “OBSTACLE DETECT”. Tím se označí detekované překážky. Výsledný obraz je na obr.13.11.



Obr.13.11 – Výsledný snímek z kamery s detekovanými překážkami

Jak je zřejmé z obrázku výše kamera není hloubková, a proto detekuje jako překážku i futra dveří nebo dveře na straně. Důvodem je, že nedokáže poznat, že se nejedná o překážku, protože to „nevidí“ ve 3D zobrazení jako naše oko, a proto musí být přidán snímač vzdálenosti, který díky tomu, že již je známa vzdálenost od překážky tak, detekuje pouze překážky, co opravdu brání v cestě.

14 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byl navržen, sestaven a otestován čtyřnohý robot. Tento robot je vybaven řídicí jednotkou Raspberry Pi 4 Model B, která umožnila efektivní generování trajektorie kroku za pomoci Bézierových křivek, zpracování obrazu z kamery, pomocí kterého je robot schopen detekovat překážky v jeho blízkém okolí a díky ultrazvukovému senzoru vzdálenosti je schopen poznat, jak daleko se od překážky nachází a podle toho upravit svůj pohyb a chování.

Raspberry Pi, miniaturní počítač, který byl použit jako řídicí jednotka tohoto robota, ukázal svůj potenciál v oblasti robotiky. Jeho schopnost efektivně generovat trajektorii, zpracovávat obraz z kamery, řídit pohyb a zpracovávat data ze sensorů byla klíčová pro částečný úspěch tohoto projektu.

Výsledkem této práce je funkční prototyp robota, který demonstruje možnosti použití miniaturních počítačů, jako je Raspberry Pi, v oblasti robotiky. Software, který byl pro tento robot vyvinut, umožňuje jeho autonomní pohyb a interakci s okolím, což otevírá nové možnosti použití v průmyslu a výzkumu, avšak je to zatím pouze prototyp.

Existuje několik možností pro další výzkum a vylepšení robotické platformy. Jednou z nich je použití BLDC motorů namísto servomotorů, což by mohlo zlepšit efektivitu a výkon robota. Další možností je vylepšení softwaru pro řízení robota, například implementací pokročilejších algoritmů pro plánování pohybu nebo zpracování dat ze sensorů.

Další inovativní myšlenkou by bylo zapojit umělou inteligenci do řízení robota, což by mohlo zlepšit jeho schopnost adaptovat se na nové situace a reagovat na neočekávané události. Také by bylo možné vytvořit kryt motorů pro složitější průzkumné operace, což by mohlo rozšířit možnosti použití robota v náročných prostředích.

POUŽITÁ LITERATURA

- 3DFOXSHOP, 2024. „závitová vložka-10-ks“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://www.3dfoxshop.cz/zavitova-vlozka-10-ks/?variantId=16737&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw0MexBhD3ARIsAEI3WHILCHT8e4dZ3ZjDb57KKyARVx3cqg0bss5UhiKu4dObUm_RCHCAopoaAusHEALw_wcB
- ALGORITMY, 2016. „Dijkstrův algoritmus“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.algoritmy.net/article/5108/Dijkstruv-algoritmus>
- ANYBOTICS, 2022. „ANYmal Technical Specifications“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.anybotics.com/anymal-technical-specifications.pdf>
- ANYBOTICS, 2024. „ANYmal“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.anybotics.com/robotics/anymal/>
- ANYMAL-RESEARCH, 2024. „ANYmal robot“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.anymal-research.org>
- BOSTONDYNAMICS, 2020. „Spot“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://bostondynamics.com/products/spot/>
- DATASHEETS.RASPBERRYPI, 2023. „Raspberry Pi Camera Module 3“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://datasheets.raspberrypi.com/camera/camera-module-3-product-brief.pdf?_gl=1*2iyju7*_ga*NzA5MzkwNzgwLjE3MTIzMTg5MTk.*_ga_22FD70LWDS*MTcxMzc4MDYwMC4xLjEuMTcxMzc4MDY0MS4wLjAuMA
- DFROBOT, 2024. „DToF LD19 Laser LiDAR Sensor Kit (12m)“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.dfrobot.com/product-2610.html>
- E-KONSTRUKTER, 2023. „technicke-vypocty“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/technicke-vypocty/11-vypocet-sily-valce/133-vypocet-sily-pneumatickeho-valce>
- FLASHHOBBY, 2020. „CLS3838MED-38Kg“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.flashhobby.com/cls3838med-38kg-cls-servo.html>
- HADEX Nedatováno., „M475 – Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04 Uživatelský manuál“; [online], [cit. 24-05-09] Dostupné z: http://sa.tipa.eu/manualy/09830133-manual-cz.pdf?_gl=1*1nt2n6g*_ga*NTI2OTUxMjEyLjE2NTA0ODA2NDk.*_ga_S8TT6YMQ41*MTY1MDQ4MDY0Ni4xLjAuMTY1MDQ4MDY0Ni4w

- HOWTOMECHATRONICS, 2024. „*How-it-works*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-servo-motors-work-how-to-control-servos-using-arduino/#google_vignette
- HUMPHREYS, G a PEERS CH. a LI, J a WAN, Y a SUN, J a RICHARDSON, J a ZHOU, CH, 2022. „*Teleoperating a Legged Manipulator Through Whole-Body Control*“; [online]. Towards Autonomous Robotic Systems. TAROS 2022. 328 s. [cit. 24-05-09]. ISBN 978-3-031-15907-7.
- CHANDRACHARY, S, 2021. „*Introduction to 3D SLAM with RTAB-Map*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://shivachandrachary.medium.com/introduction-to-3d-slam-with-rtab-map-8df39da2d293>
- IGUS, 2024. „*flange bearing EFSM HT*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.igus.com/info/spherical-bearings-efsm-ht-flange-bearing>
- IQSDIRECTORY, 2024. „*DC Motors*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-motor/dc-motors.html>
- ITNETWORK, 2024. „*Úvod do Raspberry Pi*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/raspberry-pi/uvod-do-raspberry-pi/1000?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw57exBhAsEiwAaIxaZmsTIt1tnIplHT4PQP6O34fv4zOY1nLL2IUnbvbKWPItNjUHW4OkebhoCWoUQAuD_BwE
- KALYONCU, M. 2017. „*The Coordinates Sytems of Leg J oints*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322594373_Inverse_Kinematic_Analysis_of_a_Quadruped_Robot
- LA VALLE, S, nedatováno. „*Rapidly-Exploring Random Trees*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://msl.cs.illinois.edu/~lavalle/papers/Lav98c.pdf>
- LEARN-ADAFRUIT, 2024. „*Adafruit PCA9685 16 – Channel Servo Driver*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/16-channel-pwm-servo-driver.pdf>
- LIANG, O, 2013. „*Quadruped robot gait study*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://oscarliang.com/quadruped-robot-gait-study/>
- MATHWORKS, 2024. „*Patch planning*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://ch.mathworks.com/discovery/path-planning.html>
- MDPI, 2022. „*Positioning of Quadruped Robot Based on Tightli Couple Lidar Vision Inertial Odometr*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/12/2945>

- MOUSER, 2021. „datasheet RPM-3.0“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/468/RPM_3_0-1591898.pdf
- RPISHOP, 2024. „MIPI FFC flex video kabel, 50cm“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://rpishop.cz/mipi/5257-mipi-ffc-flex-video-kabel-50-cm.html>
- SHARP 2006.; „GP2Y0A21YK0F“; [online], [cit. 24.05.09] Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/412635/SHARP/GP2Y0A21YK0F.html>
- SPARKFUN, 2024. „Ultrasonic Ranging Module HC – SR04“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
- STRÁNSKÝ, J, 2018. Dijkstrův algoritmus. Hradec Králové, Bakalářské práce. Univerzita Hradec Králové, Fakulta informatiky a managementu, Katedra informatiky a kvantitativních metod
- SVEGLIATO, J, 2020. „How does the robot plan a patch using RRT“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/how-does-a-robot-plan-a-path-in-its-environment-b8e9519c738b>
- TANG, Z, a HONHZHONG, T, 2021. „An overview of patch planning algorithms“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/804/2/022024>
- UNITREE, 2024. „GO2“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://www.unitree.com/go2/>
- VODA, Z. 2017. *Průvodce světem Arduina Vydání druhé.*, Bučovice: Martin Stříž, ISBN 978-80-87106-93-8.
- WIKIPEDIA, 2022. „A*“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/A*
- WIKIPEDIA, 2023. „Pneumatic_actuator“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic_actuator
- WIKIPEDIA, 2024. „Lidar“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- WIKIPEDIA, 2024. „Telerobotics“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Telerobotics>
- YANG, G. 2013. „Patch planning using A* algorithm.“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Path-planning-using-the-A-algorithm_fig9_264168166

- DRATEK, 2021. „Programovatelný RGB LED kruh“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z:
https://dratek.cz/docs/produkty/1/1246/1557993928.pdf?_gl=1*7ceigy*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjw3NyxBhBmEiwAyofDYVpexwu72M-02hjq2qaoodVIMSUK8U3PVdlAJ0-rAIeWgUbtULSPsRoCoIQQA_vD_BwE
- RASPBERRYPI, 2024. „Raspberry Pi 4“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z:
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- DATASHEETS.RASPBERRYPI, 2024. „Raspberry Pi 4 Model B“; [online]. [cit. 24-05-09] Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>
- NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Robotika, 1. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1.
- ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN – technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-181-0.
- SUMMERFIELD, Mark. *Python 3: výukový kurz*. 2. vydání. Přeložil Lukáš KREJČÍ. Brno: Computer Press, 2021. ISBN 978-80-251-5030-6.
- CHLEBNÝ, JAN. *Automatizace a automatizační technika*. 3, Prostředky automatizační techniky. 4., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-2523-6.
- Automatizace a automatizační technika*. 2, Systémová pojetí automatizace. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-4106-9.
- Automatizace a automatizační technika*. 1, Systémové pojetí automatizace. Brno: Computer Press, 2012. ISBN 978-80-251-3628-7.
- SICILIANO, Bruno. *Robotics: modelling, planning and control*. Advanced textbooks in control and signal processing. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84628-641-4.
- PAGÁČ, Marek. *Učebnice SolidWorks*. V Brně: Vydavatelství Nová média, [2017]. ISBN 978-80-270-0918-3.
- SPONG, Mark W.; HUTCHINSON, Seth a VIDYASAGAR, Mathukumalli. *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-471-64990-2.
- Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A – Výrobní dokumentace

Příloha k diplomové práci

**NÁVRH A KONSTRUKCE PRŮZKUMNÉHO ČTYŘNOHÉHO
MOBILNÍHO ROBOTA**

Martin Svoboda

VÝROBNÍ DOKUMENTACE

OBSAH

	OBSAH	1
	ÚVOD	3
1	VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	4
	ZÁVĚR	14

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr.1.1 – Výkres těla robota v měřítku 2:1	4
Obr.1.2 – Výkres přední části robota v měřítku 2:1	5
Obr.1.3 – Výkres zadní části robota v měřítku 2:1	6
Obr.1.4 – Výkres kyčelního kloubu v měřítku 1:1	7
Obr.1.5 – Výkres první části nohy robota (Stehenní) v měřítku 1:1	8
Obr.1.6 – Výkres druhé části nohy robota (Holenní) v měřítku 1:1.....	8
Obr.1.7 – Výkres hlavy robota v měřítku 1:1	9
Obr.1.8 – Výkres pro čep kyčelního kloubu	10
Obr.1.10 – Výkresová dokumentace pro výrobu větší servopáky (32 mm)	11
Obr.1.9 – Výkresová dokumentace pro výrobu menší servopáky (30 mm)	11
Obr.1.11 – Výkres krytu baterie v měřítku 1:1	12
Obr.1.13 – Výkres difuzoru a krytu kamery v měřítku 1:1	13
Obr.1.12 – Výkresová dokumentace krytu těla robota v měřítku 1:1.....	13

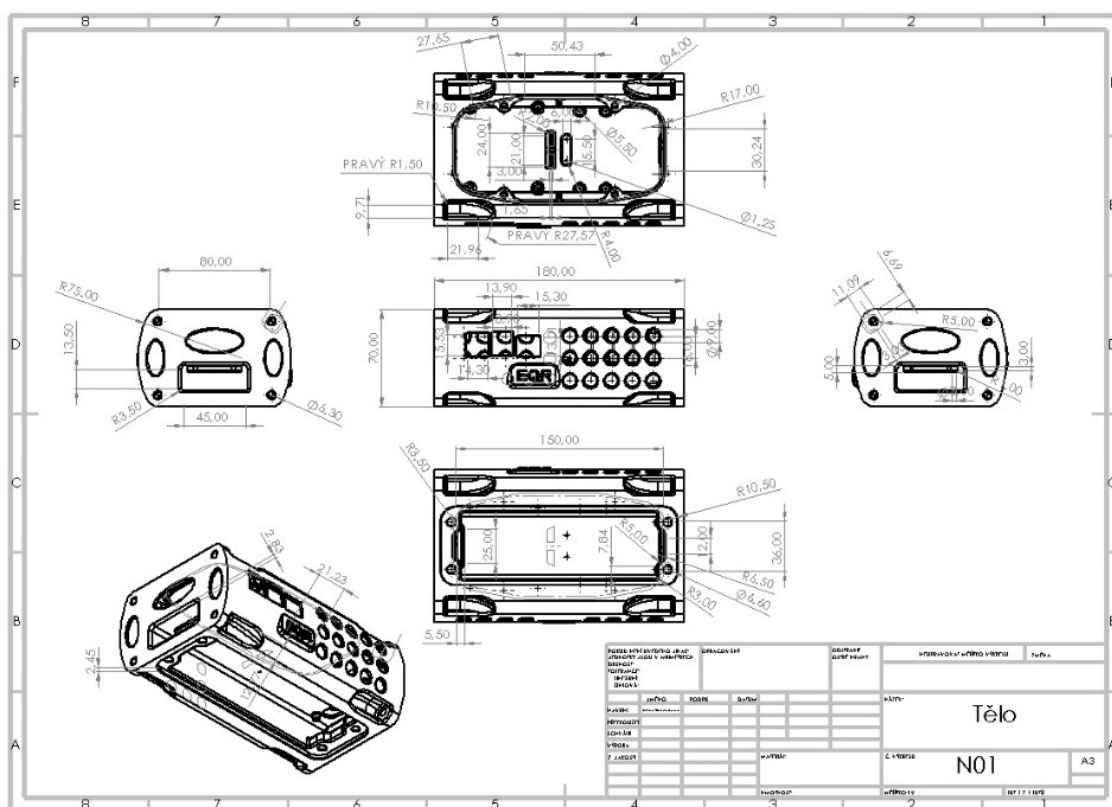
ÚVOD

Tato příloha je určena pro technickou dokumentaci k modelu robota, jsou zde všechny potřebné výkresy a popisy k výrobě, avšak nikoliv přesný postup výroby a postup 3D tisku.

1 VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

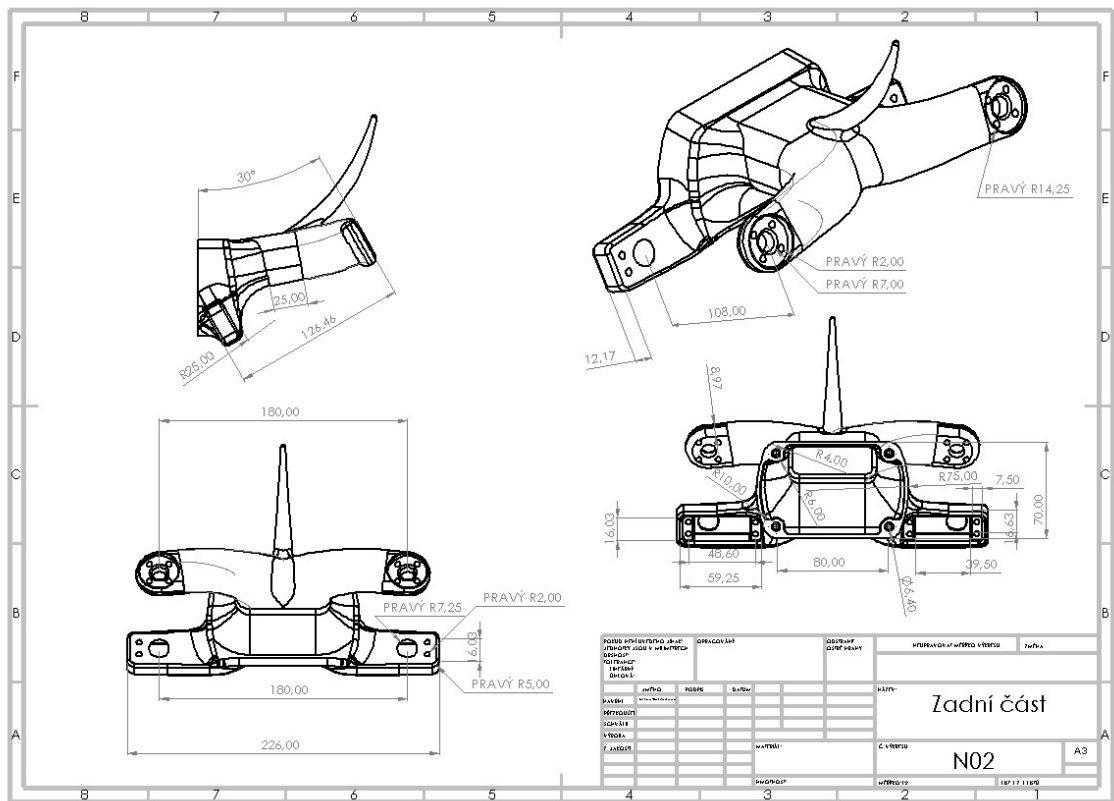
Veškeré výkresy byli vytvářeny z 3D modelů v softwaru Solidworks profesional 2020, výkresy jsou kresleny v měřítku 1:1 pokud není uvedeno jinak, ale vše je obsaženo vždy v hlavičce výkresu na pravé dolní straně, výkresy jsou ve formátu A3 a zmenšeny nebo zvětšeny pro tyto účely.

Výkres pro model těla robota je k vidění na obr.1.1 a je v měřítku 2:1.



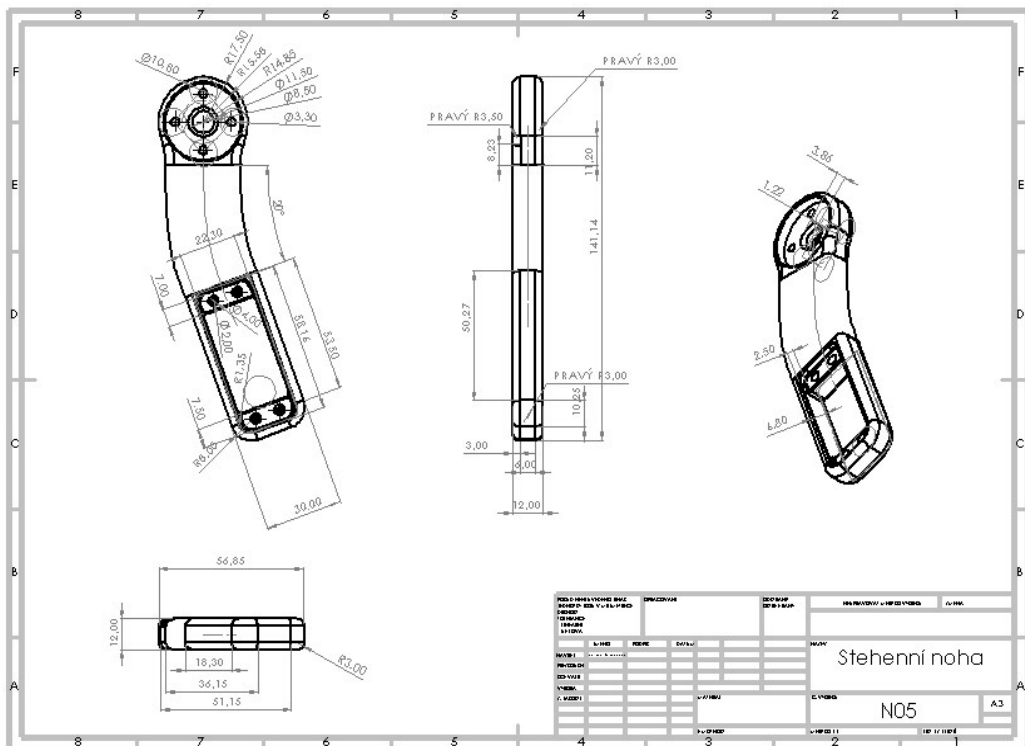
1 Obr.1.1 – Výkres těla robota v měřítku 2:1

Pro zobrazení výkresové dokumentace zadní části robota je k dispozici obr1.3. Zadní část je také v měřítku 2:1, protože v m2řítku 1:1 by výkres byl příliš velký na zpracování.

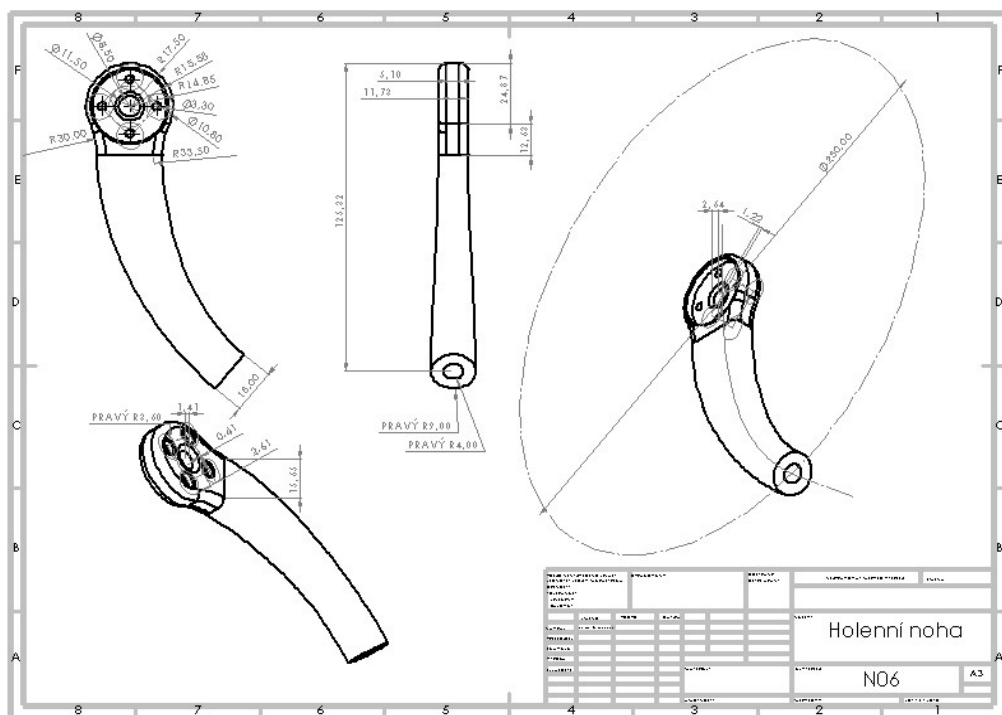


3 Obr.1.3 – Výkres zadní části robota v měřítku 2:1

Následující části, které jsou zobrazeny na obr1.5 a 1.6 popisují celou nohu robota, která je složena ze dvou částí.

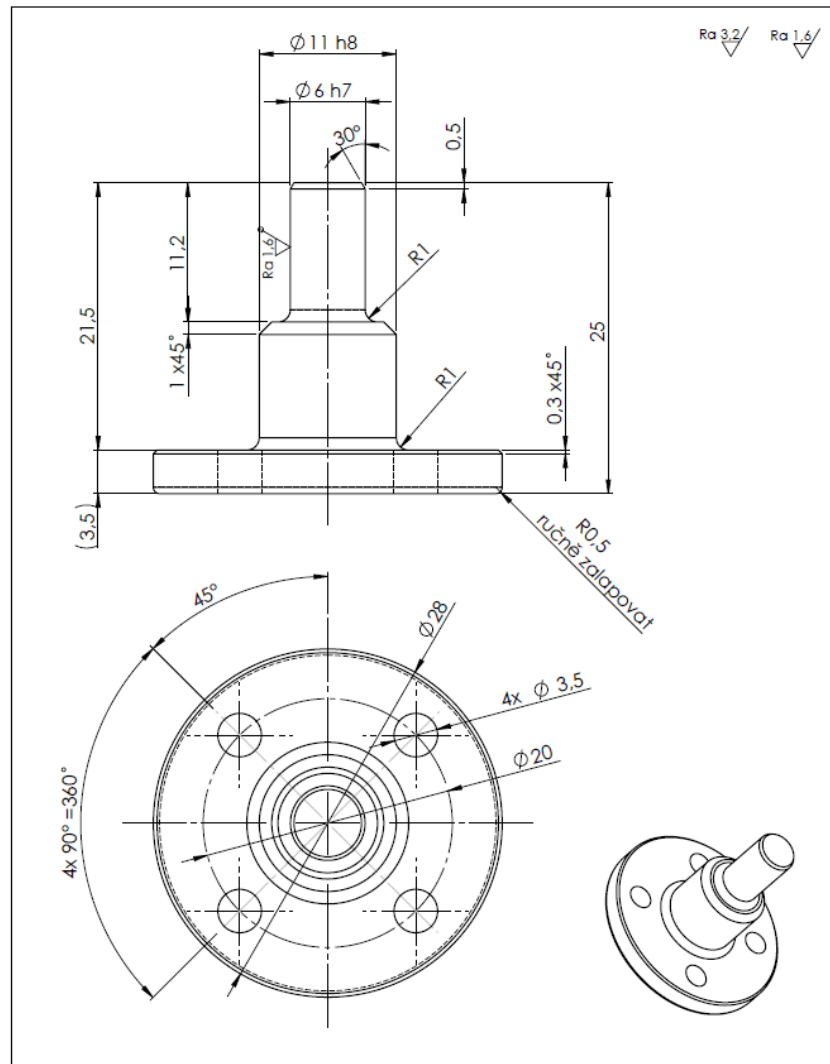


5 Obr.1.5 – Výkres první části nohy robota (Stehenní) v měřítku 1:1

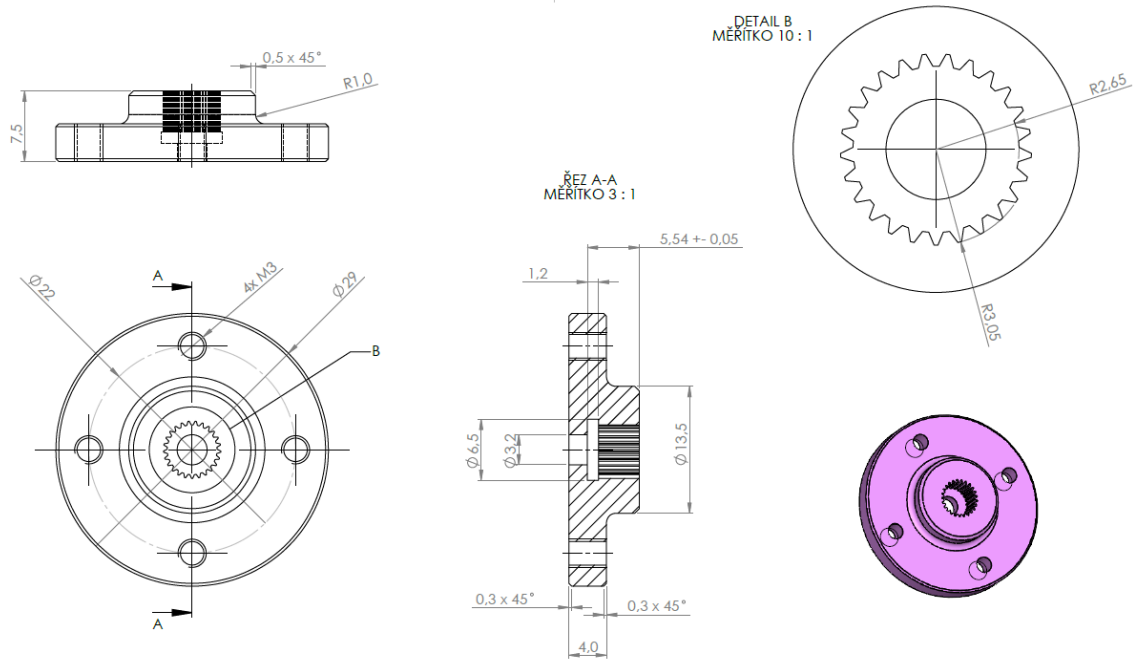


6 Obr.1.6 – Výkres druhé části nohy robota (Holenní) v měřítku 1:1

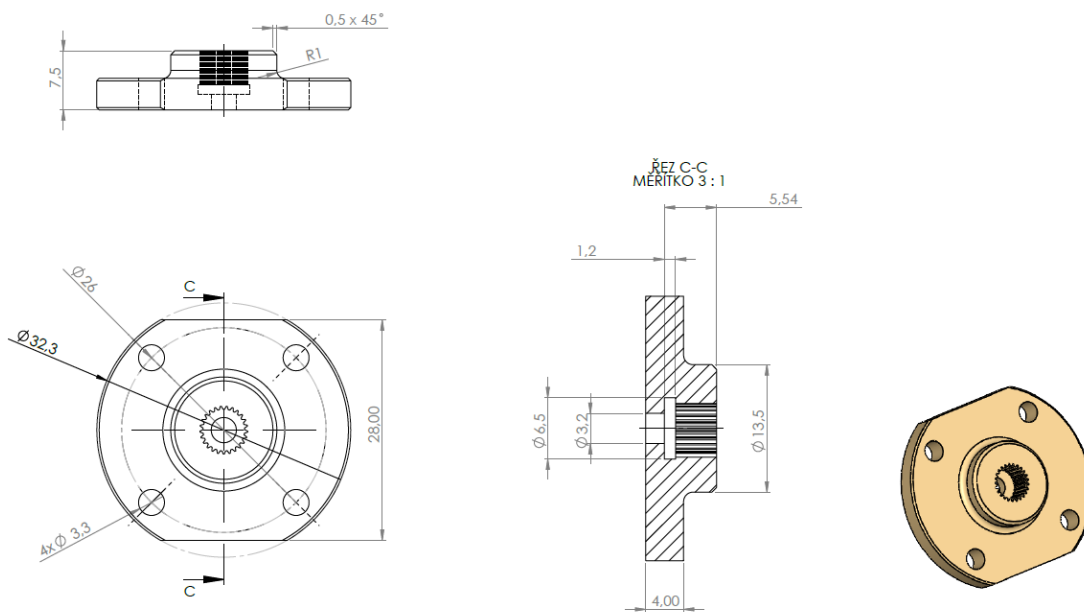
Nedílnou součástí sestavy nohy jsou čepy a servopáky, kde jejich výkresy jsou na obr1.8, 1.9 a 1.10.



8 Obr1.8 – Výkres pro čep kyčelního kloubu

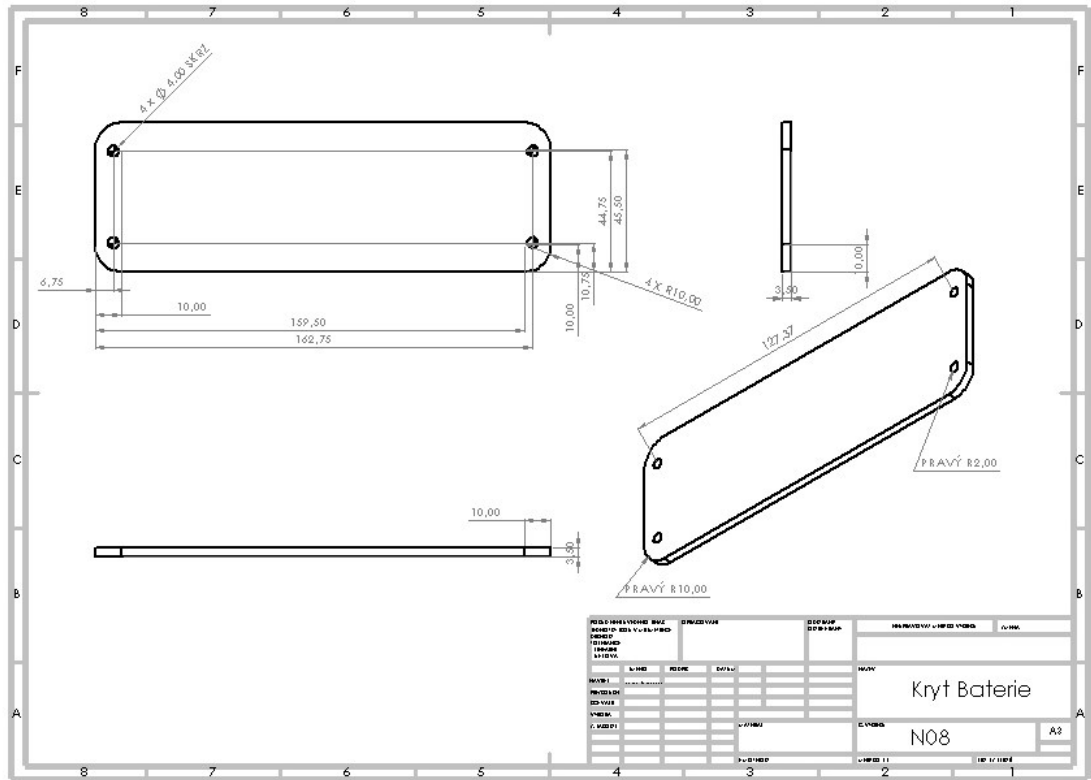


10 Obr1.9 – Výkresová dokumentace pro výrobu menší servopáky (30 mm)

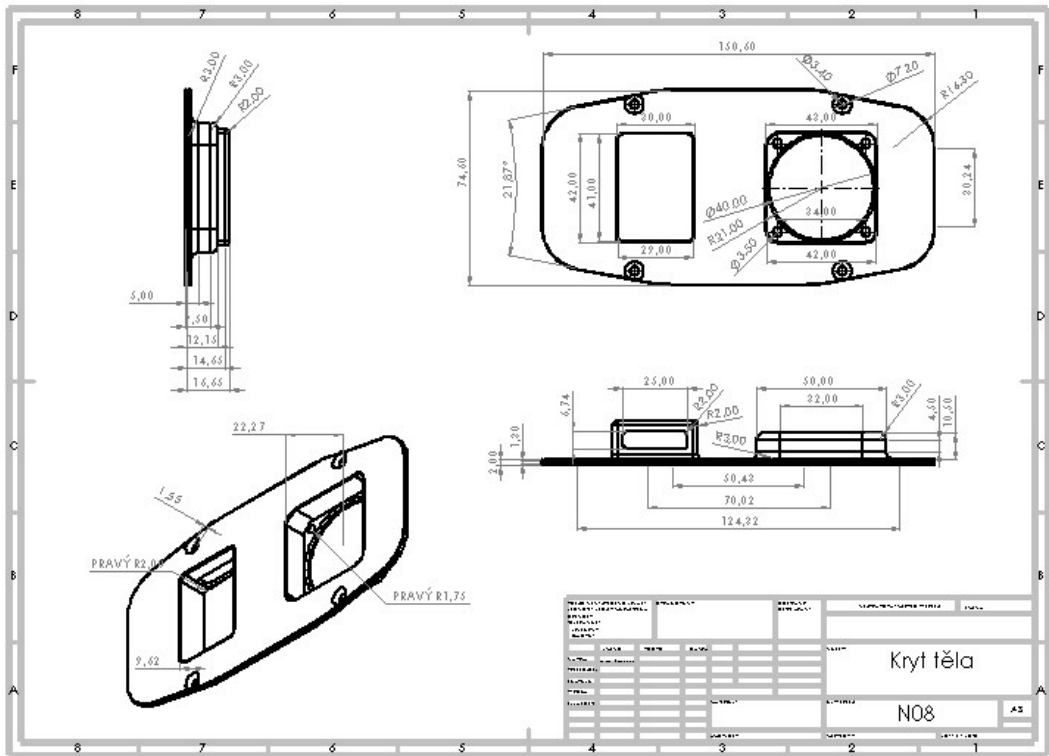


9 Obr1.10 – Výkresová dokumentace pro výrobu větší servopáky (32 mm)

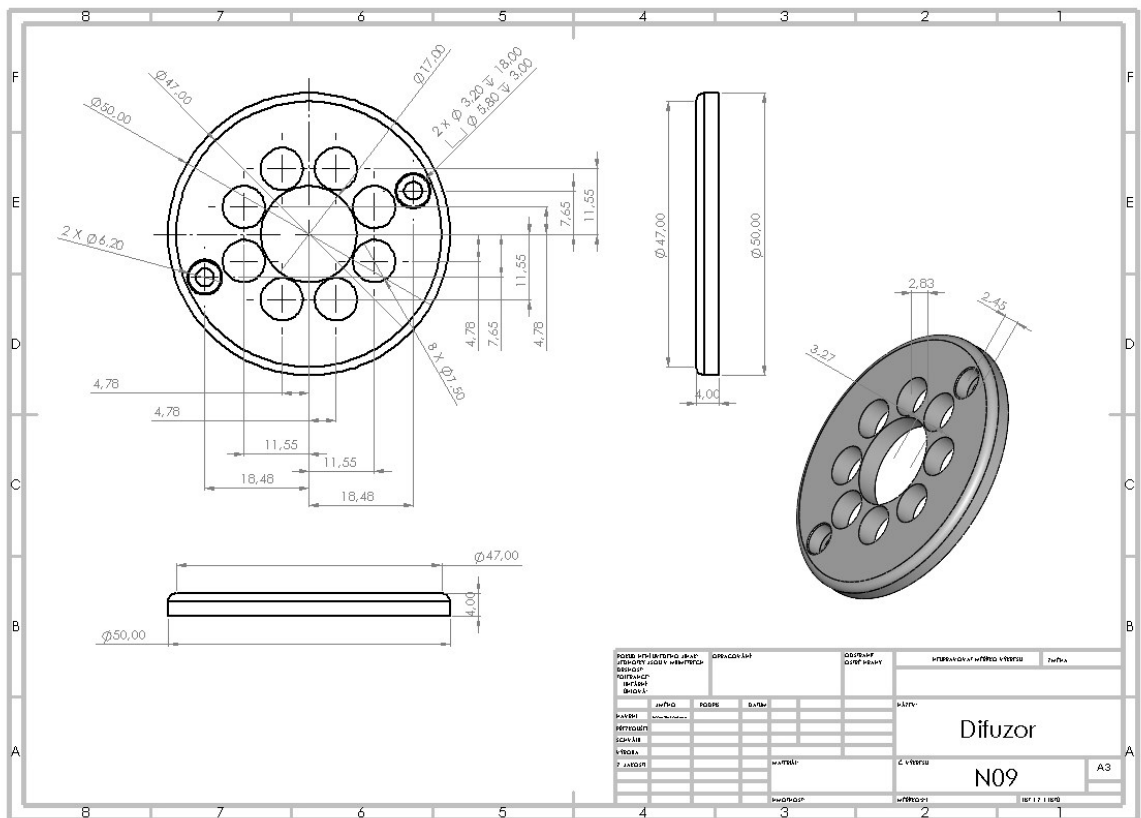
V poslední řadě zbývají už jen výkresy pro kryt baterky viz. obr.1.11 a těla robota obr. 1.12 a také difuzor LED ringu a kryt kamery, který je na obr.1.13.



11 Obr.1.11 – Výkres krytu baterie v měřítku 1:1



13 Obr.1.12 – Výkresová dokumentace krytu těla robota v měřítku 1:1



12 Obr.1.13 – Výkres difuzoru a krytu kamery v měřítku 1:1

ZÁVĚR

Postupováním podle této výrobní dokumentace a při dodržení všech pravidel, předpisů a pokynů uvedené v ní, by měl být odborník k tomu určený, nikoliv lidově řečeno lajk schopen vyrobit a sestavit tento model prototypu čtyřnohého robota