

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Evidenčné číslo: FEI-100863-111124

**VYTVORENIE OVLÁDAČA V PROSTREDÍ ROS PRE  
MOBILNÉHO ROBOTA**  
**BAKALÁRSKA PRÁCA**

**2023**

**Filip Loppreis**

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Evidenčné číslo: FEI-100863-111124

**VYTVORENIE OVLÁDAČA V PROSTREDÍ ROS PRE  
MOBILNÉHO ROBOTA**  
**BAKALÁRSKA PRÁCA**

Študijný program: Robotika a kybernetika

Názov študijného odboru: kybernetika

Školiace pracovisko: Ústav robotiky a kybernetiky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Michal Dobiš

Konzultant: Ing. Michal Dobiš

**Bratislava 2023**

**Filip Lobpreis**



## ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Autor práce:	Filip Lobpreis
Študijný program:	robotika a kybernetika
Študijný odbor:	kybernetika
Evidenčné číslo:	FEI-100863-111124
ID študenta:	111124
Vedúci práce:	Ing. Michal Dobiš
Vedúci pracoviska:	prof. Ing. Jarmila Pavlovičová, PhD.
Miesto vypracovania:	Ústav robotiky a kybernetiky
Názov práce:	<b>Vytvorenie ovládača v prostredí ROS pre mobilného robota</b>
Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje:	slovenský jazyk
Špecifikácia zadania:	Mobilná robotika využívaná v kombinácii s logistickými alebo servisnými úkonmi sa stáva čoraz viac populárnejšou. Úlohou študenta je naštudovať si mobilné robotické zariadenie, ktoré bude mať k dispozícii na Národnom centre robotiky a k nemu príslušné materiály. Študent bude pracovať s reálnym hardvérom a otvoreným systémom, ktorý bude potrebné preštudovať a pochopiť jeho fungovanie. Cieľom práce bude následne vytvoriť nadradený ovládač implementovaný v ROS (Robotickom operačnom systéme), ktorý bude schopný riadiť daného robota.
Úlohy:	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Analyzujte súčasný stav riešenia a prostredie Robotického operačného systému.</li><li>2. Analyzujte možnosti a metodiku implementácia riadiaceho balíka pre daný robot</li><li>3. Navrhnite spôsob implementácie a architektúru riešenia</li><li>4. Implementujte riadiaci systém pre mobilného roba</li><li>5. Vypracujte dokumentáciu k dosiahnutým výsledkom.</li><li>6. Vyhodnote dosiahnuté výsledky.</li></ol>
Termín odovzdania práce:	02. 06. 2023
Dátum schválenia zadania práce:	
Zadanie práce schválil:	

# SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program:	Robotika a kybernetika
Autor:	Filip Lobpreis
Bakalárska práca:	Vytvorenie Ovládača v prostredí ROS pre mobilného robota
Vedúci záverečnej práce:	Ing. Michal Dobiš
Konzultant:	Ing. Michal Dobiš
Miesto a rok predloženia práce:	Bratislava 2023

Mobilný robot vykonáva také pohyby aké mu zadáme. Preto aby tento spôsob bol čo najefektívnejší, musí byť čitateľný dobre tak ako pre robot tak aj pre užívateľa. Našou úlohou je vytvoriť také prostredie na ovládanie robota, tak aby bol kód efektívny a jednoduchý. Tým pádom bude čitateľný pre ľudí aj robota. Rozhodli sme sa pre ROS druhej verzie. To prečo a ako sme spravili jednotlive časti sa dočítate d'alej.

Kľúčové slová: ROS, BlackMetal, uzly, témy, služby, akcie

# **ABSTRACT**

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Programme:	Robotics and cybernetics
Author:	Filip Lobpreis
Bachelor's thesis:	Implementation of ROS Driver for Mobile Robot
Supervisor:	Ing. Michal Dobiš
Consultant:	Ing. Michal Dobiš
Place and year of submission:	Bratislava 2023

The mobile robot performs such movements as we give it. Therefore, for this method to be as effective as possible, it must be readable both for the robot and for the user. The major task is to create such an environment for controlling the robot, so that the code is efficient and simple. Thus, it will be readable by both humans and robots. We decided for ROS2. You can read more about why and how we made the individual parts in the next sections.

Keywords: ROS, BlackMetal, nodes, topics, services, actions

## **Pod'akovanie**

I would like to express a gratitude to my thesis supervisor.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 ROS</b>	<b>2</b>
1.1 Základné pojmy . . . . .	2
1.1.1 Témy . . . . .	2
1.1.2 Služby . . . . .	3
1.1.3 Akcie . . . . .	3
1.2 Parametre . . . . .	4
1.3 ROS1 . . . . .	4
1.4 ROS2 . . . . .	5
1.5 Rozdiely . . . . .	6
1.5.1 Štandard jazyka . . . . .	7
1.5.2 Inicializácia nody (uzla) . . . . .	7
1.5.3 Komunikácia . . . . .	7
1.6 Parametre . . . . .	7
1.6.1 Nodelet alebo komponent . . . . .	8
1.6.2 Kompilácia . . . . .	8
1.6.3 Vlákna . . . . .	8
<b>2 Robot a jeho ovládanie</b>	<b>9</b>
2.1 Hardware . . . . .	10
2.2 Komunikácia s robotom . . . . .	10
2.2.1 Logovanie . . . . .	11
2.2.2 Ovládanie . . . . .	11
2.3 Vysvetlenie kľúčov ret'azca . . . . .	12
2.4 Oprava chýb na robote . . . . .	13
2.4.1 Nesprávna funkcia . . . . .	13
2.4.2 Zašumený výstup . . . . .	14
<b>3 Implementácia ovládača</b>	<b>17</b>
3.1 Úvod do čítania grafu . . . . .	18
3.2 Uzly . . . . .	18
3.3 Vstup . . . . .	18
3.4 Komunikacia s robotom . . . . .	19
3.5 Odometria . . . . .	19

3.6 Zdielanie polohy . . . . .	19
<b>4 Filtrovanie zašumeného signálu</b>	<b>20</b>
<b>Záver</b>	<b>24</b>
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>25</b>

# Zoznam obrázkov a tabuliek

Obrázok 1.1	Vizualizácia témy v ROSe [1] . . . . .	2
Obrázok 1.2	Vizualizácia služby v ROSe [1] . . . . .	3
Obrázok 1.3	Vizualizácia akcie v ROSe [1] . . . . .	3
Obrázok 1.4	Porovnanie štruktúr ROS1 a ROS2 [3] . . . . .	4
Obrázok 2.1	Zobrazenie spodnej časti mobilného robota [5] . . . . .	9
Obrázok 2.2	Schéma zapojenia jednotlivých častí na robote . . . . .	11
Obrázok 2.3	Ustálené hodnoty rýchlosťi ľavého motora. . . . .	15
Obrázok 2.4	Ustálené hodnoty rýchlosťi pravého motora. . . . .	15
Obrázok 2.5	Prechodová charakteristika rýchlosťi kolies [5]. . . . .	16
Obrázok 3.1	Graf vykonávania programu na ovládanie robota pomocou ROS2. . . . .	17
Obrázok 4.1	Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách. . . . .	20
Obrázok 4.2	Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách. $\alpha = 0.9$ . . . . .	21
Obrázok 4.3	Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách. $\alpha = 0.7$ . . . . .	21
Obrázok 4.4	Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách. $\alpha = 0.75$ . . . . .	22
Obrázok 4.5	Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách. $\alpha = 0.8$ . . . . .	22
Obrázok 4.6	Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách. $\alpha = 0.8$ a frekvenciou 10Hz. . . . .	23

# Zoznam skratiek

<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>DDS</b>	Data Distribution Service
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IPC</b>	Inter Process Communication
<b>JSON</b>	JavaScript Object Notation
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>ROS</b>	Robot Operating System
<b>RTOS</b>	Real time operating system

# **Úvod**

Táto bakalárska práca popisuje ako naprogramovať ovládač pre mobilného robota pomocou druhej verzie Robotického Operačného Systému (ROS2). Ovládač obsahuje funkcie ROS2 napr. uzly, parametre, služby a témy. Hlavným cieľom tohto projektu je vytvoriť rozhranie tak, aby bolo možné ovládať robota pomocou jednoduchých príkazov cez ROS.

# 1 ROS

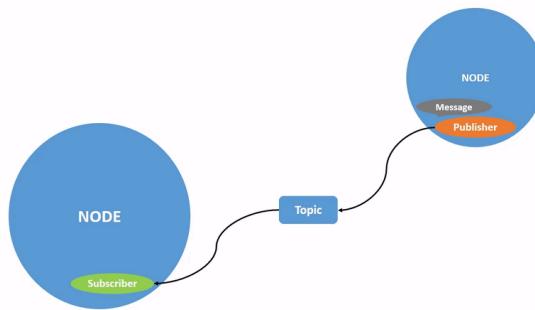
Robotický operačný systém (Robot Operating System) je súbor voľne dostupných softvérových knižníc a nástrojov, ktoré vytvárajú vhodné podmienky pre programátorov na písanie aplikácií pre mnohé druhy robotov. ROS má dve verzie. Vo všeobecnosti sa stretнемe s tým, že pod názvom ROS1 alebo ROS sa myslí ROS verzie 1. Pod názvom ROS2 sa myslí ROS verzie 2. Aby nenastali nejasnosti budeme v tomto dokumente označovať ROS verzie 1 ako ROS1 a ROS verzie 2 ako ROS2. V prípade, keď budme hovoriť o spoločných vlastnostiach a funkcionalitych, ROS1 a ROS2 budeme označovať dokopy ako ROS.

## 1.1 Základné pojmy

Komunikácia v ROSe je zabezpečená cez IPC (Inter Process Communication), TCP/IP UDP/IP komunikáciou pomocou troch zakladacích metód: **témy** (Topics), **služby** (Service) a **akcie** (Actions).

### 1.1.1 Témy

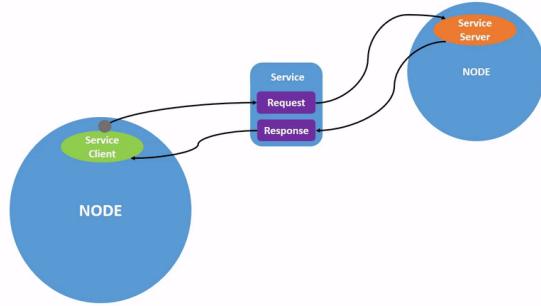
**Témy** sú sprostredkované pomocou IPC - Medzi procesová komunikácia z anglického Inter Process Communication. Je to najjednoduchší spôsob komunikácie. Vieme si ich prirovnáta k UDP/IP protokolu, s tým že neprebiehajú cez siet'. Definujeme si jedného poskytovateľa (publisher) a jedného alebo viacerých príjemcov (subscriber). Medzi týmito dvoma alebo viacerými účastníkmi sa následne posielajú správy (messages), ktoré sme si dopredu definovali.



Obr. 1.1: Vizualizácia témy v ROSe [1]

### 1.1.2 Služby

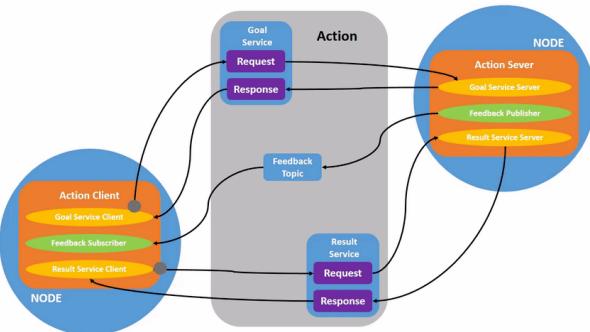
**Služby** sú sprostredkované pomocou TCP/IP protokolu. Poskytujú nám rovnaký spôsob komunikácie ako témy, až na to, že sa správy medzi servisom a klientom posielajú cez LAN (Local Area Network). Tieto správy sa posielajú oboma smermi. Služby sa využívajú pri komunikácii medzi viacerými zariadeniami.



Obr. 1.2: Vizualizácia služby v ROSe [1]

### 1.1.3 Akcie

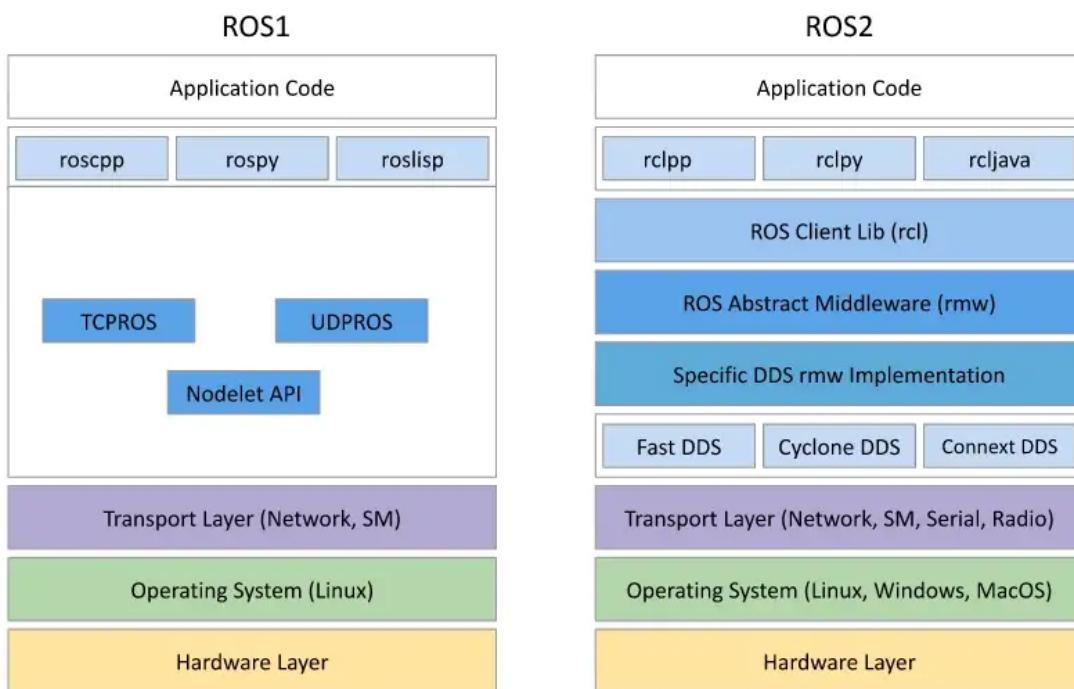
**Akcie** sú takiež sprostredkované TCP/IP protokolom. Sú najzložitejším spôsobom komunikácie. Tento spôsob bol pridaný do ROS1 až neskôr. V druhej verzii ROSu je tento typ komunikácie medzi troma základnými formami komunikácie uzlov. Sú založené na službách a prebiehajú asynchrónne [2]. Máju 3 stavy vid' Obr. 1.3. Najprv pošle klient serveru, akú akciu má vykonat', server mu potvrdí, že túto požiadavku dostal. Server začne následne vykonávať danú akciu a posielat' klientovi priebežné správy o priebehu vykonávania žiadanej úlohy. Ked' server skončí, pošle klientovi výsledok akcie a klient mu obratom potvrdí obdržanie výsledku.



Obr. 1.3: Vizualizácia akcie v ROSe [1]

## 1.2 Parametre

**Parametre** sú spôsob, ako môže komunikovať užívateľ so základnými nastaveniami uzlov bez potreby zmenenia kódu a jeho následnej kompliacie, čo pri väčších projektoch môže zabrať aj trištvrt hodiny. Konfigurácie sa definujú v *yaml* konfiguračnom súbore. V ňom si môžeme zadefinovať mená jednotlivých parametrov a ich základné hodnoty. Tie si programátor vie v programe vytiahnuť pomocou API, Application Programming Interface, (Aplikačné Programovacie Rozhranie) v ROSe.



Obr. 1.4: Porovnanie štruktúr ROS1 a ROS2 [3]

## 1.3 ROS1

ROS bol prvýkrát vydaný v roku 2007. Ide o softvér, ktorý sa začal využívať so zámerom zjednodušiť programovanie a ovládanie robotov. Od doby, kedy vznikol prešiel mnohými verziami a úpravami. Jeho neoddeliteľnou súčasťou sú štrukturovanie programu do uzlov (nodov), komunikácia medzi uzlami, podpora viacerých programovacích jazykov ako sú C, C++ alebo Python a vytváranie balíčkov dostupných širokej verejnosti.

Štrukturalizovanie základov ROS1 je spravené monoliticky čo najstabilnejším spôsobom. Na počiatku musí byť spustený hlavný program (roscore), ktorý zabezpečuje vytváranie jednotlivých uzlov. Komunikácia medzi uzlami je zabezpečená prostredníctvom prepojenia uzlov cez LAN/WLAN alebo IPC komunikáciu. Ak sú uzly spustené na iných zariadeniach, tak sa využíva

len komunikácia cez siet'. Roscore d'alej poskytuje parametre jednotlivým uzlom z parametromvého servera. Jeho najdôležitejšou úlohou je zabezpečenie komunikácie uzlov v programe.

Aj napriek mnohým výhodám má ROS1 aj nedostatky, ktoré sa t'ahajú už od jeho počiatkov. Sú to napríklad:

- Nepostačujúca distribuovanosť systému. Všetky uzly sa spoliehajú na funkčnosť roscore-u,
- ROS1 je písaný v starom štandarde, to vnáša do programu technologický dlh a bezpečnostné riziká,
- Kvalita komunikácie sa nedá ovplyvniť,
- Preddefinované vláknové moduly [4],
- Možnosť užívateľa predefinovať základne prvky ROS-u.

Kvôli takýmto problémom a nedostatkom sa začala vyvíjať nová verzia ROSu, ROS2. Tá mala vyriešiť tieto problémy a zlepšiť funkcionalitu prvej verzie. V roku 2025 sa skončí podpora poslednej distribúcie ROS1 menom *Noetic*. Preto je odporúčané začínať nové projekty v ROS2.

## 1.4 ROS2

Ako už bolo spomenuté zámerom vývoja ROS2 bolo zlepšenie funkcionality a bezpečnosti systému. Jeden z dôsledkov tohto vývoja je, že ROS2 nie je späť kompatibilný. Podstata toho, ako sú zoskupované uzly a ako spolu komunikujú je diametrálne odlišná od ROS1. Z tohto dôvodu bol vyvinutý takzvaný rosbridge, ktorý zabezpečuje kompatibilitu medzi verziami. Nie je to ale trvalé riešenie. Odporúčané je nástroj využívať a počas toho prepisovať kód z verzie 1 do verzie 2. Komunikácia prebieha v ROS2 rovnakým spôsobom ako v ROS1. Pomocou tém 1.1.1, služieb 1.1.2 a akcií 1.1.3.

Táto podobnosť končí na najvyššej vrstve. Ako sme videli na Obr. 1.4. Štruktúra ROS2 je rozdelená do viacerých vrstiev. Najdôležitejšie je pre nás vedieť, že komunikácia je spracovávaná modelom DDS (Služba distribúcie údajov) z anglického (Data Distribution Service). Tento model zlepšuje výkon, stabilitu a bezpečnosť modelu oproti ROS1. Je založený na TCP/IP a UDP/IP protokole. Z obrázku Obr. 1.4 vycítame aj lepšie rozloženie modulov. To zabezpečuje jednoduchšie prispôsobovanie systému pre nové funkcionality. Podpora operačných systémov sa v ROS2 rozšírila aj o Windows, Mac OS či RTOS (Operačné systémy reálneho času) z anglického Real time operating system. Operačné systémy nie sú jediné rozšírenie ohľadom

kompatibility. S ROS2 je možné programovať už aj v Jave či Matlabe. Tvorcovia mysleli aj na programátorov a pridali rozšírené možnosti testovania, debugovania či nasadzovania programu do reálneho využitia.

Testovanie prebieha pomocou používania Google testov. Debugovania je možné uskutočniť pomocou debuggera gnu-gdb. Pri spustení programu cez spúšťací súbor (launch file) je potrebné pridať príkaz na spustenie spomenutého debugovacieho programu.

ROS2 má necentralizovanú štruktúru, a preto pri spúšťaní programov už nie je potrebné mať spustený roscore. Ak teda spadne jeden uzol všetky ostatné uzly budú fungovať nadľahčie. V ROS1 sme vedeli ovplyvniť počet uchovaných správ komunikácie pokým nepretiekol zásobník, ktorý ich uchovával na neskôršie použitie. V ROS2 vieme implementovať túto schopnosť použitím takzvanej *QoS* triedy (kvalita komunikácie), z anglického Quality of Service. Pomožou tejto triedy vieme aj zmeniť kvalitu komunikácie. Vieme si zadefinovať, či by sme radšej stratili niektoré správy, ale dostali by sme všetky rýchlo. Alebo aby sa zabezpečilo, že dostaneme všetky správy, ktoré boli vyslané, aj keby to trvalo dlhšie. Dokonca si vieme zadefinovať maximálny čas, ktorý budeme čakať na ďalšiu správu.

Ak by bol užívateľ veľmi schopný programátor a potreboval by si zmeniť triedy, ktoré definujú základnú funkcionality ROS-u, tak aj toto je možné. Jednou z takýchto funkcionality je, že užívateľ si vie preddefinovať triedu, ktorá bude alokovať miesto na (IPC) komunikáciu (medziprocesovú komunikáciu). K tomuto bodu je dodat, že tento prípad je špecifický a väčšina programátorov sa s takýmto možnosťou do kontaktu nedostane.

Pri všetkých týchto zlepšeniach nemôžeme zabudnúť spomenutú aj nasledovnú nedostatok. Keďže ROS2 je mladší ako ROS1 nájdeme k nemu menej dokumentácie. Pridaním veľkého počtu funkcionality začal vznikať problém pre začiatočníkov s porozumením niektorých kódov. Avšak tento problém je nedostatkom, ktorý časom zanikne. V čase písania tejto práce pribudli na stránke dokumentácie minimálne 2 strany popisujúce pokročilejšie Funkcionality druhej verzie ROSu.

## 1.5 Rozdiely

Čo je určite dobrou správou pre všetkých programátorov, ktorí robili v prvej verzii a sú zvyknutí na jej štandardy a funkcionality. Tak tito sa nemajú čoho obávať. Prechod z ROS1 na ROS2 je dosť priamočiary. Čo sa zmenilo je spôsob písania kódu, ale koncepty ostali všetky rovnaké. V tejto sekcii nebudem písat konkrétnie kódy, budeme len opisovať čo je podobné a čo zasa rozdielne medzi verziami spomínaného systému. Keďže celý projekt bol písaný v programovacom jazyku C++ tak sa aj tieto zmeny budu týkať hlavne jazyka C++.

### **1.5.1 Štandard jazyka**

Pokým ROS1 bola písaná v štandarde C++03 tak ROS2 je už písaná v novom štandarde. A to hlavne C++11, ale používa aj nejaké časti z C++14 a C++17. To zahŕňa inicializovanie templatov a ich používanie. Tým, že ROS2 je stále nová a stále vyvýjajúca sa platforma, tak môžeme očakávať aj časti kódu, ktoré budú podporovať najnovší C++ štandard a to štandard z rokov 2020 a 2023.

Definície a deklarácie templatov sú na knihu samú o sebe, preto do detailov nebudeme zachádzat'. Stačí nám vedieť', ako ich inicializovať'. V prvej verzii sme definovali všeobecného publishera (publikovateľa) a definovali sme mu len cez akú tému má posielat' správy. V druhej verzii naväzujeme publishera na špecifický tip správy akú posielame. Nemôže sa teda stať', že takýto program by sme skompilovali a následne, keď ho spustíme, tak by spadol z dôvodu, že čítame iný typ správy ako posielame.

### **1.5.2 Inicializácia nody (uzla)**

Tak isto ako v prvej verzii aj v druhej verzii musíme definovať uzol (node). Rozdiel je v tom, že prvá verzia obsahovala NodeHandle (Ovládač uzla) a druhá verzia obsahuje priamo Node (Uzol). V druhej verzii je zaužívaným štandardom túto nodu predediť a použiť polymorfizmus pri objekte, ktorý bude existovať počas celej doby vykonávania programu. Pri prvej verzii tomu tak nebolo. Tam sme museli vytvoriť už spomenutý NodeHandle. Ten sa nemusel využiť ako base trieda a nemusel ani existovať počas celého behu programu.

### **1.5.3 Komunikácia**

DDS (Služba distribúcie údajov) je protokol strednej vrstvy (middleware) implementovaný nad UDP [2]. Na implementáciu tohto protokolu je použitý protokol z IoT (internet vecí) (Internet of Things) sféry. Je to protokol MQTT. DDS je používaný v ROS2 na komunikáciu medzi uzlami. Je to systém správ publikovania (publish) / odoberania (subscribe), ktorý umožňuje uzlom komunikovať medzi sebou bez toho, aby poznali identitu ostatných uzlov. Druh komunikácie je v ROS2 rozšírený ešte o akcie vid' 1.1.3.

## **1.6 Parametre**

ROS1 používa parametrový server, ktorý sa nachádza v roscore-e. Každý uzol si mohol vytiahnuť parametre, ktoré boli zapísané v konfiguračnom súbore. ROS2 žiadny roscore nemá, preto sa parametre musia distribuovať iným spôsobom. Parametre v druhej verzii ROSu patria jednotlivým uzlom. To znamená, že jednotlivé parametre sa dajú vytiahnuť len daným uzlom. Tieto parametre taktiež existujú len počas existencie daného uzlu. Parametre sú ďalej distribuované pomocou už spomínaného DDS protokolu. V prípade, že sa tieto parametre nepodari

vytiahnut' z konfiguračného súboru. Či už z dôvodu, že daný súbor neexistuje, alebo iného dôvodu, tak sa aplikujú základné hodnoty, ktoré si zvolil užívateľ pri používaní funkcie na ich zistovanie.

### 1.6.1 Nodelet alebo komponent

ROS1 ponúka možnosť definície uzlov ako uzlík (nodelet). Je to definovanie uzlu ako zdielanej knižnice (shared library). Je to spôsob ako ulahčiť prácu CPU. Keď sa definuje uzol ako uzlík, tak jeden proces môže spracovať programy z viacerých takýchto uzlíkov. Táto funkcia sa nachádza aj v ROS2. Volá sa komponent (component). Vylepšením oproti nodeletom je zjednotenie aplikačnej implementácie (API). Pokým nodelet-y mali vlastný spôsob implementácie v ROS1 tak v ROS2 je implementácia uzla a komponentu rovnaká. Pri komponente sa musí len naviac definovať, že daný komponent existuje pomocou makra. Použitie komponentov zjednoduší prácu CPU a používa sa hlavne v zariadeniach, ktoré majú obmedzený výkon výpočtovej techniky. Sú to napríklad mikroprocesory, ktoré ovládajú roboty.

### 1.6.2 Kompilácia

Zmenou verzii sa zmenil aj spôsob komplikácie programu. ROS1 bol komplikovaný pomocou `catkin build` systému. Catkin je založený na programe `cmake`. Jeho nastavenie dependencií je konfigurované pomocou súboru `package.xml`. ROS2 prešiel na viac nastaviteľný systém `Colcon`. Tento systém je na rozdiel od catkin-u založený na Python-e a jeho dependencie sa nastavujú pomocou `setup.py` súboru. V prípade colcon-u si môžeme definovať spôsob komplikácie to znamená, že môžeme nastaviť, ako sa budú spracovať dependencie. Ponúkané možnosti sú `catkin_make`, `catkin_make_isolated`, `catkin_tools` a `ament_cmake`. Jednou s najviac používaných možností je `ament_cmake`. Je založený na programe `cmake` a spolupracuje so systémom `colcon`. Z tohto dôvodu mu vieme definovať dependencie pomocou `xml` súboru ako tomu bolo v ROS1 pričom možnosť definície pomocou Python skriptu ostáva. Je to jeden zo spôsobov, ako zmeniť rozdiel medzi ROS1 a ROS2.

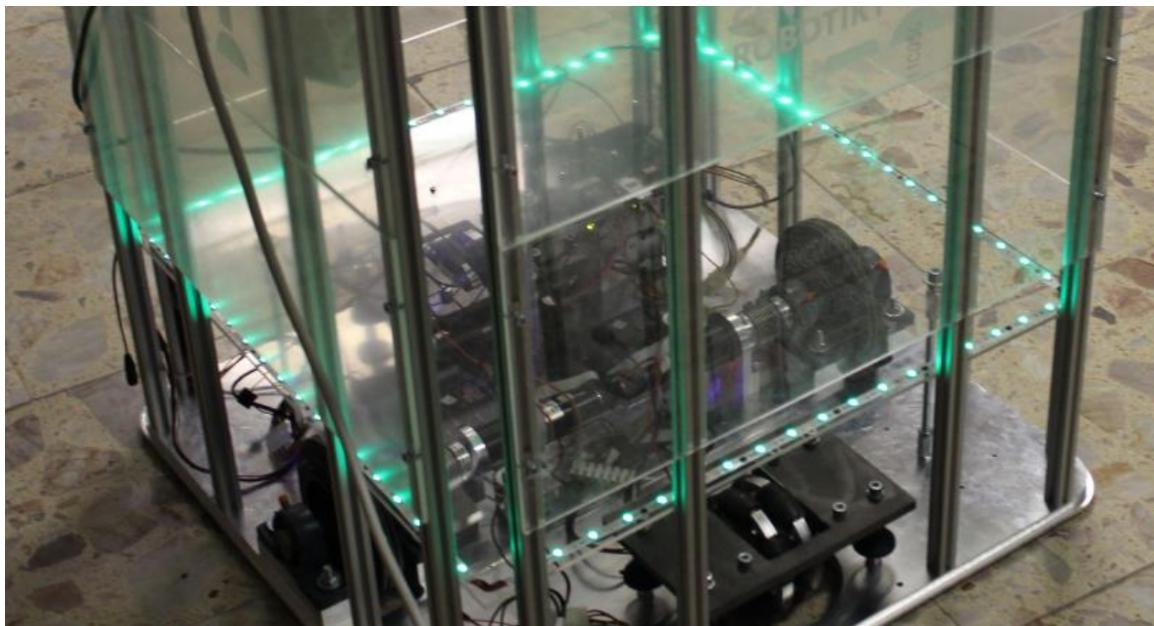
### 1.6.3 Vlákna

ROS1 dovoľuje programátorom vybrať si medzi jedno vláknovým a viac vláknovým vykonávaním programu. Tvorcovia ROS2 si dali zaležať na modularite aj tejto oblasti kódu. V druhej verzii ROS-u si vieme zadefinovať typ vykonávania programu separátne pre každý uzol a vieme si tento typ zadefinovať aj sami [4].

## 2 Robot a jeho ovládanie

Robot, s ktorým sme pracovali bol výsledkom tímového projektu viacerých študentov z roku 2019. Pri vysvetľovaní a opisovaní robota sa budeme odvolávať na dokumenty, stránky a kód, ktorý napísali. Všetky tieto údaje si sprístupnené na mobilnom robote v záložke § (HOME) /Desktop/Blackmetal [5].

Robot je v tvare kvádra. Jeho šírka je 60cm a je vyzdvihnutý nad zem o 1.5cm. Nachádza sa na kolesách o polomere 8cm. Jeho kostra, až na ocelové pláty, ktoré držia robot, je spravená z hliníku. Konkrétnie z hliníkových tyčí, ktoré sú pospájané plexisklovými plátkmi. Jeho podobizeň vidíme na nasledujúcom obrázku.



Obr. 2.1: Zobrazenie spodnej časti mobilného robota [5]

Na obrázku ďalej vidíme olemovanie robota pásmom s LED-kami. Tie svietia nasledovným spôsobom. Ked' sa robot nehýbe všetky LED-ky svietia na zeleno. Ked' sa robot pohne do nejakej strany, LED-ky znázornia jeho pohyb tým, že svietia na strane, do ktorej sa robot hýbe. Ked' nastane situácia, kedy počítač ovládajúci motory prestane komunikovať s Arduinom, ktoré sa stará o detekciu stavov robota tak LED-ky začnú blikat červeno-modrými farbami.

Ako bolo spomenuté LED-ky znázorňujú pohyb robota. Ten sa pohybuje za pomocí diferenciálneho podvozku s dvoma podpornými všesmerovými kolesami. Motory robota sú pripojené na meniče. Tie sú ovládané priamo príkazmi z počítača.

## 2.1 Hardware

Hardware robota sa skladá z:

- kontrolnej dosky Arduino Uno,
- Počítača ADVANTECH MIO-5272 [6]  
Počítač obsahuje operačný systém Ubuntu 16.04.
- Extension board MIOe-210 [7]
- Meniče MAXON EPOS 24/5 (s číslom 275512) [8]  
Sú napájané jednosmerným napäťom 11 - 24 V a 5 A.
- Enkódery MAXON Encoder MR Type L (s číslom 225787) [9]  
Rozlíšenie enkóderov je 1024 impulzov s troma kanálmi.
- Motory MAXON RE 40 (s číslom 148867) [10]  
Motory s výkonom 150W. Maximálna rýchlosť je 12 000 rpm a efektivita 91%.
- Prevodovka MAXON Planetary Gearhead GP 42 C (s číslom 202120) [11]  
Redukcia prevodovky je 43:1. Jej účinnosť je 72%.

Ovládanie robota je zabezpečené externými počítačmi

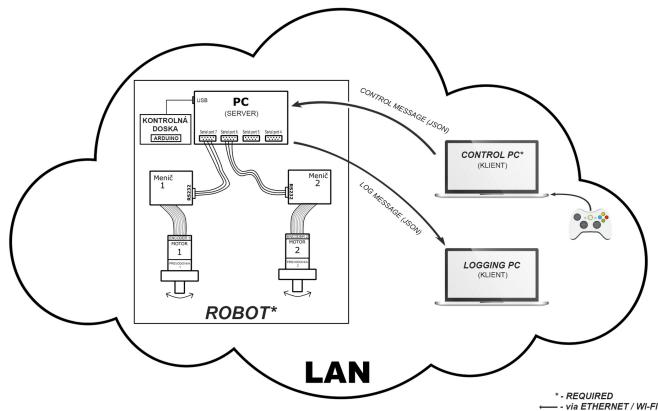
- Control PC (Kontrolný počítač) – Počítač posielajúci príkazy na robot cez TCP/IP protokol.
- Logging PC (Logovací počítač) – Počítač prijímajúci stav robota cez TCP/IP protokol.

Tieto počítače sú len reprezentácia servera. V realite to môže byť jeden a ten istý počítač.

Na obrázku Obr. 2.2 vidíme zapojenie jednotlivých častí robota. Čo sme nespomenuli a je na obrázku je XBox ovládač je to kvôli tomu, že tímový projekt bol zameraný na ovládanie robota pomocou tohto ovládača. My ho ale používat' nebudeme.

## 2.2 Komunikácia s robotom

S robotom sa vieme spojiť pomocou dvoch portov. Jeden port je otvorený na prijímanie požiadavok (requestov) a ten druhý je na monitorovanie stavu robota. Port 664 je otvorený pre tisíc užívateľov, ktorí môžu len sledovať stav robota. Druhý port je na prijímanie requestov 665 a je otvorený len pre jedného užívateľa.



Obr. 2.2: Schéma zapojenia jednotlivých častí na robote

### 2.2.1 Logovanie

Spomínaný port 664 je otvorený jednému užívateľovi. Ked' sa užívateľ pripojí začne dostávať nepretržite správy typu **JSON** (JavaScript Object Notation), ktoré hlásia stav robota. Správy, ktoré dostávame sú nasledujúceho formátu

```
{"state":1,"direction":1}
```

Hodnoty sa pri stave (state) a ani pri smere (direction) nemenia. Sú to stále jednotky. Pokým robota nezastavíme bud' príkazom, stlačením tlačidla vypnutia alebo zablokováním jedného z kolies, tak sa tieto správy budú posielat'. Môžeme potom začať polemizovať o tom či by nebolo lepšie už tieto správy využiť na to čo reálne spomenutý **JSON** reťazec ukazuje. A to udávať smer a stav robota. Momentálne tieto správy slučia len na to, aby sme vedeli, že tento robot je aktívny a vie primáť a spracúvať informácie.

### 2.2.2 Ovládanie

Port 665 je sprístupnený na prijímanie a odosielanie požiadavok a ich odpovedí. Príkazy sa na počítač posielajú cez siet' z externého počítača vo formáte **JSON**. Študenti, ktorí navrhovali systém posielania požiadavok (request) a odpovedí (response) robili tieto správy ručne. Preto nastávajú situácie, kedy robot pošle správu, ktorá nespadá do štandardu písania **JSON** textu. Z tohto dôvodu sme nemohli použiť už existujúci kód (parser), ktorý by nám zjednodušil prehľadávanie týchto správ. Podla dokumentácie sa robot mal ovládať správami typu [12]

```
{"UserID":1,"Command":3,"RightWheelSpeed":50,"LeftWheelSpeed":50}
```

Význam jednotlivých parametrov:

- **UserID** – Znázorňuje ID užívateľa, ktorý je pripojený na robot. Predvolená hodnota je 1.
- **Command** – Číselná hodnota znázorňujúca príkaz, ktorý ma robot vykonat'
  0. Prázdny príkaz slúžiaci na overenie spojenia
  1. Núdzové zastavenie
  2. Normálne zastavenie
  3. Príkaz nastavujúc rýchlosť kolies mobilného robota
  4. Prázdny príkaz
  5. Prázdny príkaz
  6. Príkaz pýtajúci si aktuálnu rýchlosť pravého a ľavého kolesa. Tento príkaz neboli sprave navrhnutý v kóde robota. Vracal nám žiadanú hodnotu namiesto aktuálnej. Museli sme ho prepísat'.
  7. Pripravenie motorov robota
  8. Príkaz pýtajúci si aktuálnu pozíciu pravého a ľavého kolesa.
- **RightWheelSpeed** – Nastavenie rýchlosť pre pravé koleso
- **LeftWheelSpeed** – Nastavenie rýchlosť pre ľavé koleso

Z tohto kusu kódu je jasné, že sa majú posielat' celé čísla a na základe tohto vstupu sa bude robot hýbať. Čo sme zistili až po skompilovaní a spustení tímového projektu je, že sa majú posielat' desatinné čísla z intervalu 0 až 1. Toto nebolo písané v dokumentácii, ktorá nám bola dodaná na začiatku programu. Môžeme preto príklad prepísat' na reťazec, ktorý by fungoval

```
{"UserID":1,"Command":3,"RightWheelSpeed":0.50,"LeftWheelSpeed":0.50}
```

## 2.3 Vysvetlenie kl'účov ret'azca

### UserID

Táto možnosť je v momentálnom stave robota nevyužitá. Počet zariadení, ktoré sa môžu pripojiť na port, cez ktorý sa dá robot ovládať je 1. Je to ale dobrá možnosť na rozšírenie kódu. Keď sa budú môcť pripojiť viacerí užívatelia, tak sa bude musieť vyriešiť, koho príkaz bude mať akú prioritu.

### **Command: 4**

Tento príkaz je prázdny. My sme ho ale neskôr prepísali na príkaz, cez ktorý sa dá nastaviť žiadaná pozícia kolies robota (natočenie). Táto funkcia nie je v takom stave ako sme si priali. Je to spôsobené hlavne nedostačujúcim dokumentáciou enkóderov na robote. Síce sme našli v dokumentácii funkciu, ktorá by mala túto možnosť povolovať. Čo sa ale stane pri poslaní príkazu je to, že kolesá sa začnú točiť rýchlosťou 0.5 metra za sekundu.

### **Command: 8**

Príkaz na zistovanie polohy kolies neboli originálne naprogramované na robote. Pridali sme ho za cieľom presného dostania sa robota na preddefinované miesto. Táto funkcia nefunguje správne rovnako ako v predchádzajúcim príklade, keď si vypýtame polohu kolies od robota, dátu ktoré obdržme sú, že jedno koleso je priamo nastavené na hodnotu, ktorú sme si vyžiadali a to druhé koleso vráti náhodnú hodnotu. Počas toho sa ale kolesá robota stále točia.

### **RightWheelSpeed/LeftWheelSpeed**

Nastavovanie rýchlosťi pravého a ľavého kolesa nie sú povinné parametre. Musíme ich zadávať len v prípade posielania rýchlosťí cez príkaz s číslom 3 alebo 4.

## **2.4 Oprava chýb na robote**

### **2.4.1 Nesprávna funkcia**

Ako bolo spomenuté vyššie, pri poslaní príkazu s číslom 6 nám robot vráti aktuálne rýchlosťi kolies. Počas skúšaní tejto funkcionality sme narazili na problém. Keď sme sa robota spýtali na jeho rýchlosť dostali sme reťazec, ktorý obsahoval náhodne veľké čísla. Tieto čísla sa menili, keď sme zadávali nejaké hodnoty pre rýchlosťi kolies aby sa robot hýbal.

```
{"LeftWheelSpeed":236223201280 "RightWheelSpeed":4294967296}
```

Tu vidíme príklad obdržanej spravy. Ako si môžeme všimnúť. Pri tomto type správ nie je dodržaná správna forma reťazca typu JSON. Namiesto ':' máme '=' a medzi argumentmi sa nenachádza čiarka. Jeden z nápadov, ktorý sme mali bolo premeniť tieto čísla na desatinné čísla, keďže sme mu posielali taký formát čísel. Problém je v tom, že keď posielame request na nastavenie rýchlosťi kolies, tak kód na robote funguje tak, že si ich premení na celé čísla v rozsahu 0 až 1000. To je hodnota, na ktorú nastaví rýchlosť otáčania kolies respektíve rýchlosť otáčania motora. Na druhú stranu, keď si vypýtame od robota rýchlosťi kolies. On zoberie informáciu z enkóderov a pošle nám to bez spracovania. Aj napriek týmto poznatkom sa nám nepodarilo získať z týchto dát žiadané rýchlosťi.

Po dôkladnom preštudovaní kódu sme zistili, že hodnoty ktoré nám posielala robot nie sú

ani vytahované z enkóderov správnou funkciou. Preto sme ju zmenili a začali sme dostávať hodnoty, s ktorými by sa mohlo dať pracovať.

Funkcie z knižnice zabezpečujúce komunikáciu z enkóderov motorov pochádzajú z firmy Maxon [13]. Funkcie, ktoré končia koncovkou ‘Target’ majú návratné hodnoty reprezentujúce žiadané hodnoty. Funkcie s koncovkou ‘Is’ vracajú aktuálne hodnoty. Z tohto dôvodu sme museli prepísať funkciu, ktorá sa vykonávala, keď sme chceli získať aktuálne hodnoty rýchlosťi motora poslaním príkazu 6.

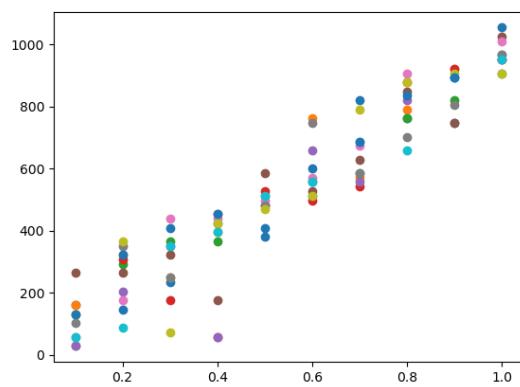
```
BOOL VCS_GetTargetVelocity(
    HANDLE KeyHandle,
    WORD NodeId,
    long* pTargetVelocity,
    DWORD* pErrorCode);

BOOL VCS_GetVelocityIs(
    HANDLE KeyHandle,
    WORD NodeId,
    long* pVelocityIs,
    DWORD* pErrorCode);
```

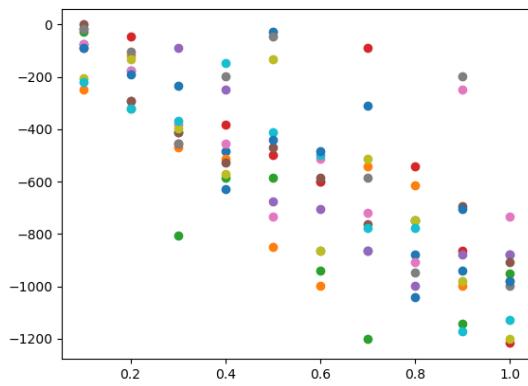
Ako môžeme vidieť v týchto predpisoch funkcií, bolo treba zmeniť názov funkcie a ostatné parametre ostali rovnaké. Nebolo treba meniť implementáciu kódu.

#### 2.4.2 Zašumený výstup

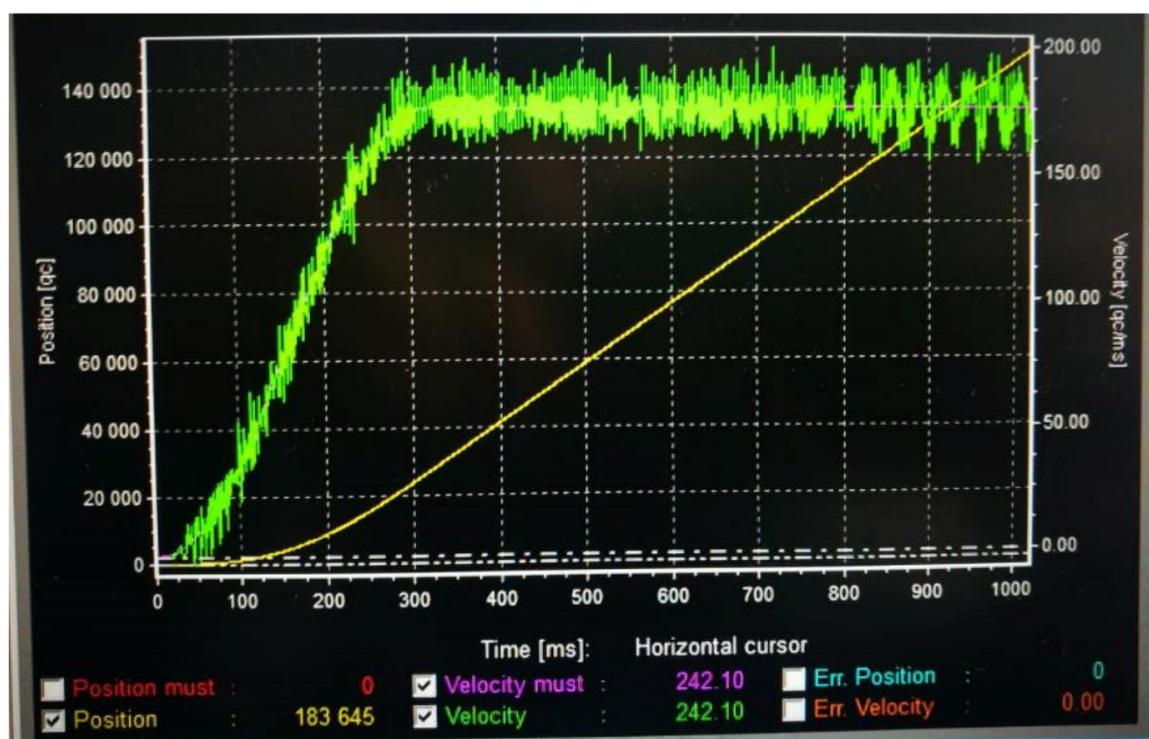
Po prepísaní funkcie na získavanie rýchlosťí robota sme spravili pári meraní, aby sme zistili, aké presné informácie o rýchlosťach motorov dostávame. Aby nám robot neodbiehal postavili sme ho na vyvýšené miesto, tak aby sa kolesá nedotýkali zeme. V takomto postavení sa robot nepohnie z miesta a my môžeme bez problémov odmerať prechodové a prenosové charakteristiky rýchlosťi pravého a ľavého motora.



Obr. 2.3: Ustálené hodnoty rýchlosi l'avého motora.

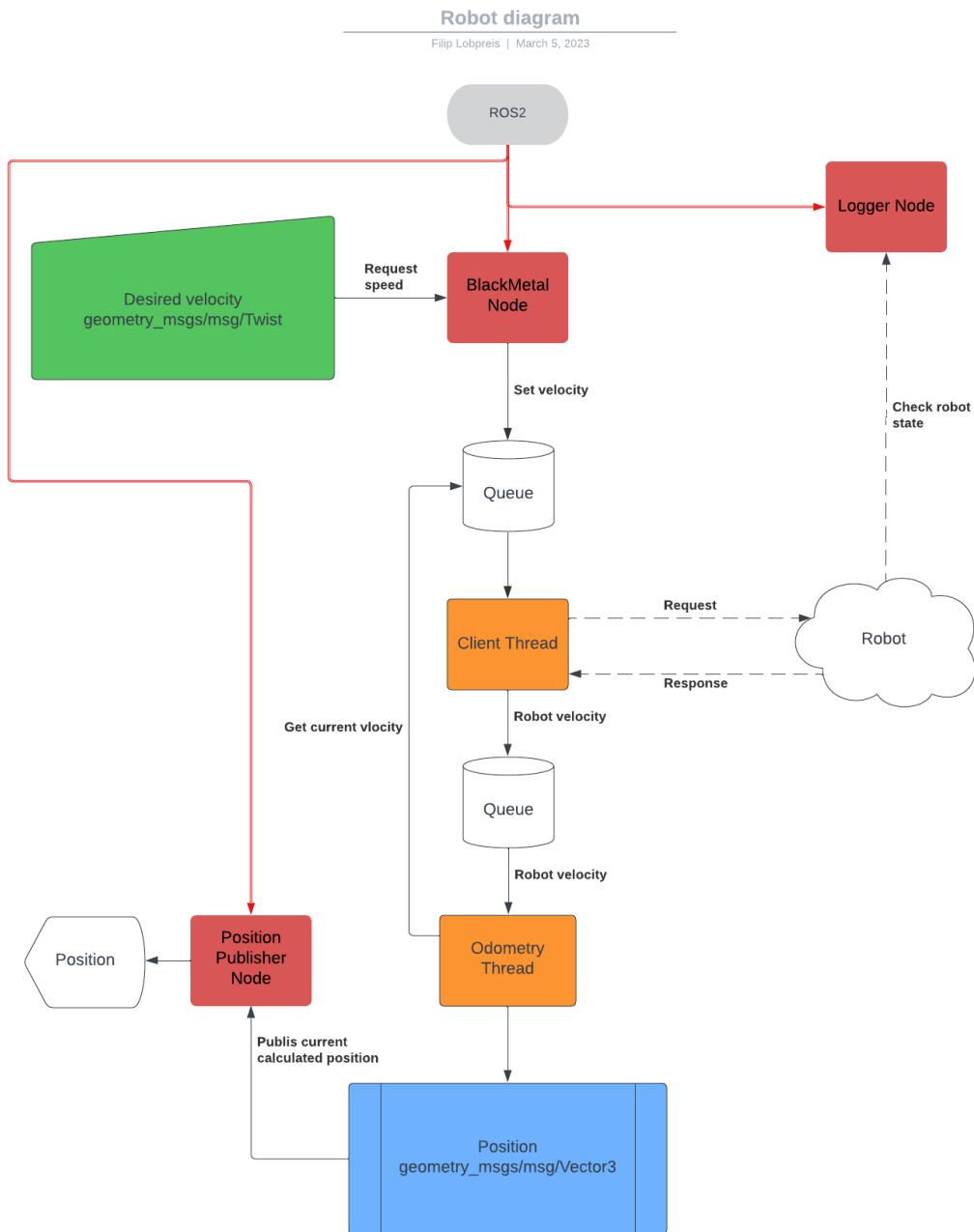


Obr. 2.4: Ustálené hodnoty rýchlosi pravého motora.



Obr. 2.5: Prechodová charakteristika rýchlosť kolies [5].

### 3 Implementácia ovládača



Obr. 3.1: Graf vykonávania programu na ovládanie robota pomocou ROS2.

## 3.1 Úvod do čítania grafu

Na obrázku Obr. 3.1 môžeme vidieť viacero objektov rôznych farieb. Objekty zobrazené červenou farbou sú uzly spracovávané a vytvárané v rámci ROS2. Každý tento objekt sa vykonáva v osobitnom procese. Objekty zobrazené oranžovou farbou sú objekty, ktoré majú svoje vlastné vlákno. Tieto objekty boli vytvorené uzlom BlackMetal. Dátové štruktúry Queue, zobrazené bielou farbou sú vytvorené tak aby zabezpečovali bezchybnú komunikáciu medzi viacerými vláknenami. Objekt so zelenou farbou je vstup do programu. Je zadávaný užívateľom a reprezentuje žiadanú rýchlosť robota. Modrý objekt je výstupom programu. Je to téma, na ktorý sa publikuje aktuálna pozícia robota. Robot samotný je zobrazený bielou farbou vo forme malého obláčika. Prerušované čiary na diagrame znázorňujú siet'ovú komunikáciu programu a robota. Červené dvojité čiary udávajú, ktoré objekty patria ROS-u. Nakoniec čierne plné čiary reprezentujú tok dát medzi objektami.

## 3.2 Uzly

Na obrázku Obr. 3.1 môžeme vidieť postup vykonávania programu na ovládanie robota BlackMetal pomocou ROS2. Na začiatku programu sa vytvoria 3 uzly. Prvý uzol **Position Publisher Node** je uzol, na ktorý sa publikuje vypočítaná pozícia robota. Počíta sa na základe obdržaných dát z enkóderov robota. Uzol **Logger Node** slúži na zaznamenávanie stavu robota 2.2.1. Posledný uzol **BlackMetal Node** ovláda robota na základe zadaných dát užívateľom.

## 3.3 Vstup

Uzol *BlackMetal Node* vytvorí príjemcu, ktorý počúva na téme *geometry\_msgs/msg/Twist*. Tento vstup je vo forme príkazu zadaného v príkazovom riadku. Vyzerá nasledovne:

```
ros2 topic pub /cmd_vel geometry_msgs/msg/Twist
  "linear:
    x: 0.0,
    y: 0.0,
    z: 0.0,
  angular:
    x: 0.0,
    y: 0.0,
    z: 0.0" -1
```

Tento príkaz publikuje jednu správu (-I) o lineárnych a uhlových rýchlosťach na tému */cmd\_vel* Táto sprava je typu *geometry\_msgs/msg/Twist*. Je následne spracovaná a uložená do

rady *Queue*. Tato rada je prioritne založená. To znamená, že požiadavka s nižším kódom ma vyššiu prioritu. Požiadavky a ich kódy moceme vidieť v sekciu 2.2.2.

### 3.4 Komunikacia s robotom

Ako je naznačené na Obr. 3.1, klient si vo svojom vlastnom vlákne vytiahne prvú spravu z rady a pretransformuje ju do formy JSON. Tento typ spravy môžeme vidieť v 2.2.2. Príkaz je poslaný robotu a ten obratom dá vedieť, či danú požiadavku obdržal. Ak tato správa žiadala rýchlosť kolies, tak robot d'ľalšou správou odpovie na danú požiadavku. Typ tejto odpovede môžeme vidieť v 2.4.1. V tomto prípade sa správa spracuje a uloží sa do d'ľalšej rady.

### 3.5 Odometria

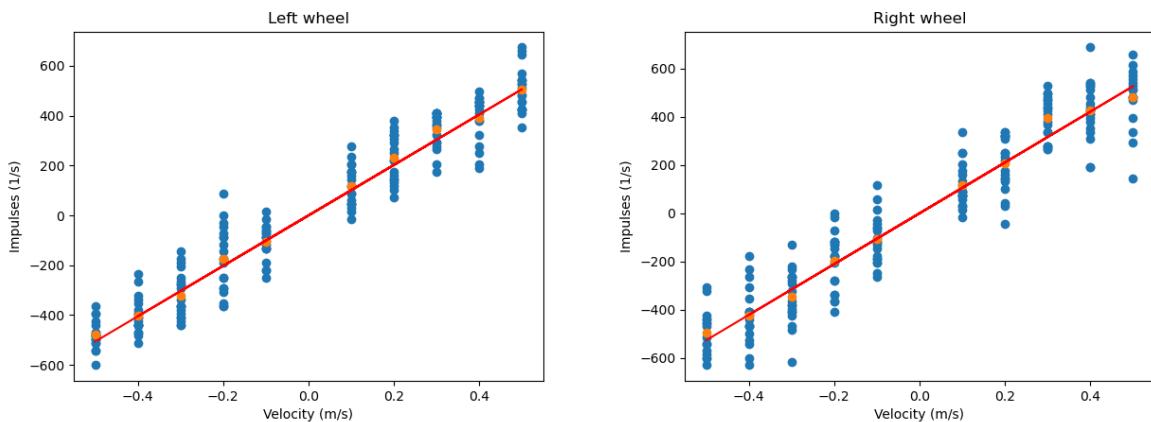
Odometria, počítanie polohy na základe rýchlosť kolies, sa vykonáva rovnako ako komunikácia s robotom v separátnom vlákne. Tu je potreba si uvedomiť jednu skutočnosť. To je tá, že keď posielame žiadosť na nastavenie rýchlosť kolies robota, tak robot si hodnoty v žiadosti prepočíta a dátia dá následne enkóderov. Keď si ale tieto rýchlosť vyžiadame z enkóderov, tak sa robot týchto dát nechytá a my si ich musíme prepočíta na metre za sekundu. Zároveň si tento objekt neustále pýta od robota rýchlosť kolies. Ako sme už spomenuli v 3.4, tieto spravy majú nižšiu prioritu ako nastavenie rýchlosť kolies alebo bezpečnostné zastavenie robota. Preto sa môže stat, že správy posielané robotu nebudú dodržiavať presne stanovenú frekvenciu v čase keď mu bude užívateľ posielat príkazy.

### 3.6 Zdielanie polohy

Ďalšiu vec, ktorú je treba vysvetliť ku grafu Obr. 3.1 je zdielanie polohy. Odometria po každom prepočítaní polohy robota publikuje tuto informáciu na tému */position* tato sprava je typu *geometry\_msgs/msg/Vector3*. Obsahuje 3 hodnoty, ktoré sú x, y a z. Súradnice reprezentujú aktuálnu polohu robota.

## 4 Filtrovanie zašumeného signálu

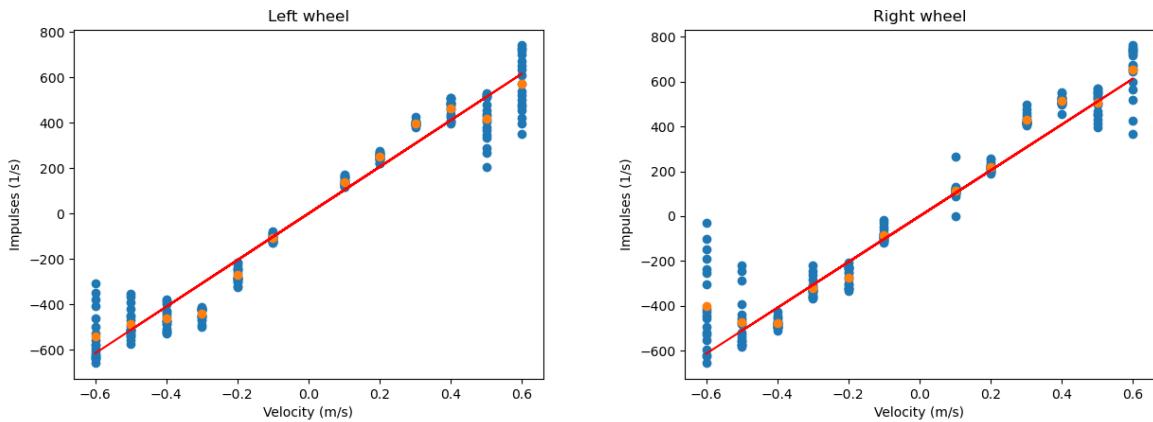
Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, rýchlosť kolies sa dajú získať z enkódarov. Tieto dátu sa posielajú v sprave, ktorá pripomína JSON formát. Z týchto vzoriek poslaných robotom nevieme priamo vypočítať polohu. Musíme si tieto dátu premeniť z impulzov za sekundu  $\frac{1}{s}$  na metre za sekundu  $\frac{m}{s}$ . Tento prevod nebude jednoznačný, pretože jazdy enkódery posielajú dátu inak zašumené. Preto je potrebne zistiť, ako sa zmení rýchlosť pri zmene impulzov za sekundu. Tento prevod je možné získať z merania, kde po nastavení rýchlosť zoberieme veľa dát z enkódarov a zistíme, ako sa zmení rýchlosť pri zmene impulzov za sekundu. Prvý nápad na získanie čo najlepšej prevodovej charakteristiky bol cez všetky dátu položiť lineárnu regresiu. To sa ukázalo ako zlé riešenie, lebo dátu, ktoré dostávame majú veľký rozptyl. Jednou z nasledujúcich úvah bolo spraviť klízavý priemer. Toto riešenie malo tiež svoje chyby a to v tom, že zmeny zaznamenaných impulzov za sekundu sa zmenili v závislosti od rýchlosťi a smeru. V tomto bode sme vyskúšali počítať biometriu z obdržaných dát. Táto implementácia bola veľmi nepresná. Tento pokus nám potvrdil, že potrebujeme filter obdržaných impulzov. Výsledky pokusu, kde sme zistovali prevodovú charakteristiku z impulzov za sekundu na rýchlosť v SI jednotkách nájdeme na nasledovných grafoch.



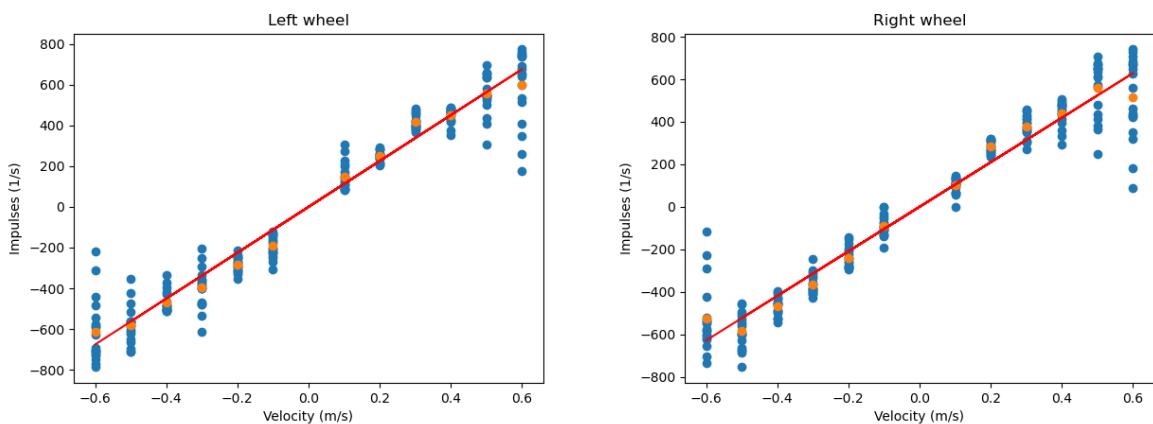
Obr. 4.1: Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách.

Implementovali sme si preto dolnopriepustný kvadratický filter. Jeho parameter  $\alpha$  sme získali viacerými meraniami. Začali sme najsilnejším filtrom s hodnotou  $\alpha = 0.9$ .

Ako môžeme vidieť na obrázkoch Obr. 4.2 a Obr. 4.1 aplikácia filtra výrazne pomohla proti sumu signálu. Problémom pri silnom filtri je to, že ak na začiatku merania dostaneme zlu hodnotu, tak sa tato hodnota ďalej mení na správnu. Tento problém sme riešili postupným menením parametra filtru. Ďalšiu hodnotu sme použili  $\alpha = 0.7$ .

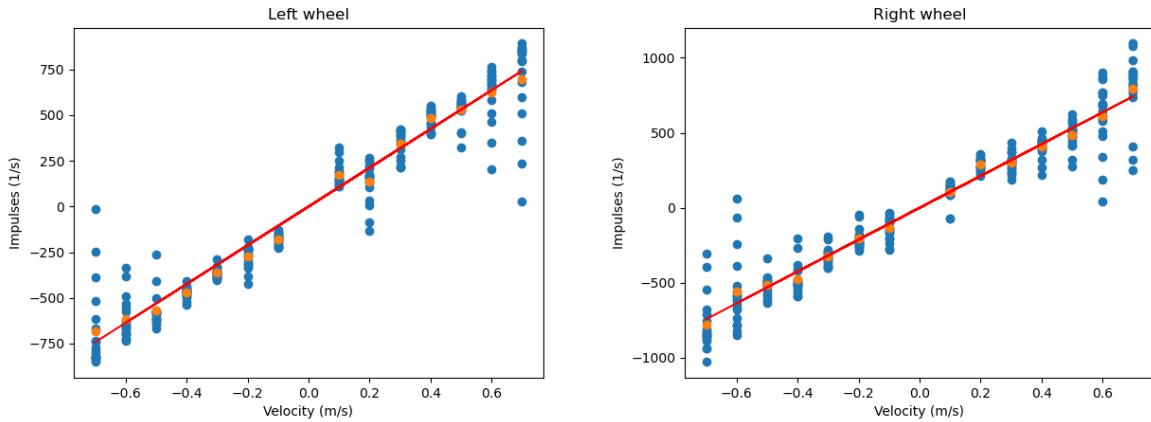


Obr. 4.2: Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách.  $\alpha = 0.9$ .



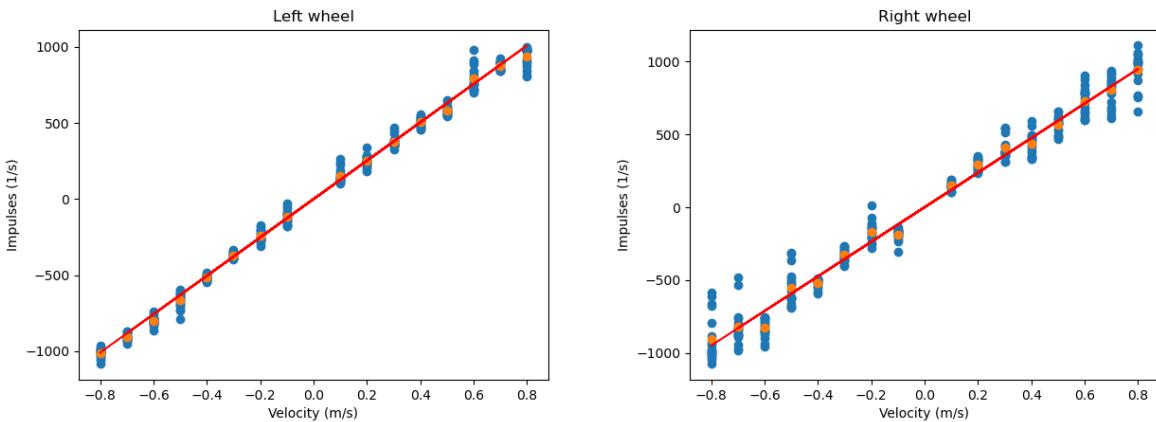
Obr. 4.3: Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách.  $\alpha = 0.7$ .

Pri použití hodnoty  $\alpha = 0.7$  sme zistili, že sa hodnoty rýchlosť aj pri aplikácii filtra výrazne menili. Spravili sme preto ďalšie meranie, kde sme použili hodnotu  $\alpha = 0.75$ .



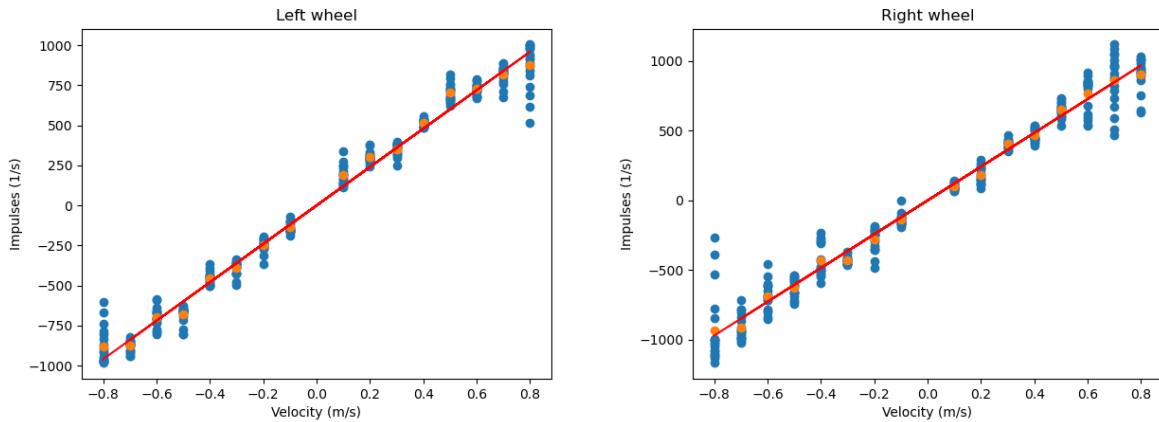
Obr. 4.4: Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách.  $\alpha = 0.75$ .

Použitie silnejšieho filtra súčasťom pomohlo rýchlejšiemu ustáleniu hodnoty, ale skúsili sme ešte silnejší filter s hodnotou  $\alpha = 0.8$ .



Obr. 4.5: Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách.  $\alpha = 0.8$ .

Ako môžeme vidieť na Obr. 4.5 ustálenie hodnôt je veľmi jednoznačne. Vybrali sme si preto filter s hodnotou  $\alpha = 0.8$ . Zatiaľ všetky dátá čo sme merali holo s frekvenciou 4Hz (1 vzorka za 250 milisekúnd). Pre presnejší výsledok sme tuto frekvenciu ešte zvýšili. Z testov robota sme vyzorovali, že najsilnejšia frekvencia, ktorú môže robot sprostredkovať je 10Hz (1 vzorka za 100 milisekúnd). Spravili sme si preto test na prevod rýchlosť ešte raz s rovnakou hodnotou  $\alpha = 0.8$ , ale s frekvenciou 10Hz.



Obr. 4.6: Získanie prevodu z impulzov na rýchlosť v SI jednotkách.  $\alpha = 0.8$  a frekvenciou 10Hz.

Najlepšia možná hodnota tohto parametru nám vyšla  $\alpha = 0.8$ . Pri implementácii tohto filtra sme museli myslieť na dôležitú vec. Ked' sa zmenia jednorazovo impulzy na hodnotu 0 a hned' späť, tak nám táto vzorka pokazí výsledok. Musíme preto túto vzorku ignorovať. Ďalšia prekážka, ktorú sme mali pred sebou bola zmena rýchlosťi. Obyčajná implementácia filtra by nám spomalila zmenu vypočítanej rýchlosťi a teda aj veľkú odchýlku v polohe. Tento problém sme opravili prestavením počiatočnej hodnoty filtra na prvú hodnotu po zmene rýchlosťi. Toto riešenie sa ukázalo ako najlepšie so skúšaných riešení.

# Záver

V prvej časti bakalárskej prace bolo našou úlohou zoznámiť sa s robotom a neimplementovať ovládač na neho pomocou ROSu. V stave v akom sme ho dostali sme museli opraviť niektoré softvérové chyby na robote. Tie sa týkali hlavne komunikácie s robotom. V tejto práci sme sa dostali do stavu, kedy vieme robotu poslať, akou rýchlosťou sa majú hýbať jednotlive kolesa a on nám dáva spätnú väzbu, že akou rýchlosťou naozaj ide. To ale ešte nefunguje, tak ako má kvôli zašumenému signálu. V druhej časti bakalárskej prace by sme chceli opraviť alebo aspoň zredukovať toto zašumenie. Poprípade nájsť iný spôsob na kontrolovanie pozície robota v priestore.

# Zoznam použitej literatúry

1. *ROS2 documentation* [online] [cit. 2022-12-23]. Dostupné z : <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>.
2. RICO, Francisco Martín. *A Concise Introduction to Robot Programming with ROS2*. 1. vyd. Chapman a Hall/CRC Press, 2023. ISBN 978-1-003-28962-3.
3. *ROS2 from the Ground Up* [online] [cit. 2022-12-23]. Dostupné z : <https://medium.com/@nullbyte.in/ros2-from-the-ground-up-part-1-an-introduction-to-the-robot-operating-system-4c2065c5e032>.
4. *Changes between ROS 1 and ROS 2*. Dostupné tiež z: <http://design.ros2.org/articles/changes.html>.
5. BC. MAREK PACALAJ, BC. TOMÁŠ KÚTIK, BC. DOMINIK GULA, BC. DÁVID PAVLIČ, BC. DANIEL ĎURKOVIČ. *Mobilný podstavec pre robota*. 2019.
6. *MIO-5272* [online] [cit. 2022-12-26]. Dostupné z : [https://www.mouser.sk/datasheet/2/638/MIO-5272\\_DS\(01.17.18\)20180118153722-1570123.pdf](https://www.mouser.sk/datasheet/2/638/MIO-5272_DS(01.17.18)20180118153722-1570123.pdf).
7. *MIO-210* [online] [cit. 2022-12-26]. Dostupné z : [https://advownload.advantech.com/productfile/PIS/MIOe-210/Product%20-%20Datasheet/MIOe-210\\_220\\_230\\_110\\_120\\_PWR1\\_DS\(03.26.14\)20140327095019.pdf](https://advownload.advantech.com/productfile/PIS/MIOe-210/Product%20-%20Datasheet/MIOe-210_220_230_110_120_PWR1_DS(03.26.14)20140327095019.pdf).
8. *EPOS2 Positioning Controllers* [online] [cit. 2022-12-26]. Dostupné z : [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/root/8831294472222/2018EN-457-458-459-461.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8831294472222/2018EN-457-458-459-461.pdf).
9. *Encoder MR Type L, 256–1024 CPT, 3 channels, with line driver* [online] [cit. 2022-12-26]. Dostupné z : <https://innodrive.ru/downloads.php?file=/wp-content/uploads/files/maxon/sensor/15032-EN-21-479.pdf>.
10. *Details RE 40 Ø40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt* [online] [cit. 2022-12-26]. Dostupné z : <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/re/re40/148867>.
11. *Details Planetary Gearhead GP 42 C Ø42 mm, 3 - 15 Nm, Ceramic Version* [online] [cit. 2022-12-26]. Dostupné z : <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/gear/planetary/gp42/203120>.
12. BC. MAREK PACALAJ, BC. TOMÁŠ KÚTIK, BC. DOMINIK GULA, BC. DÁVID PAVLIČ, BC. DANIEL ĎURKOVIČ. *Dokumentacia k softwaru robota BlackMetal*. 2019.

13. MAXON. *EPOS Command Library: Document ID: rel6806*. 2019.