



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

MOBILNÍ KAMERA REALIZOVANÁ PROSTŘEDKY ROS2

THESIS TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL ONDERKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR JANOUŠEK, Ph.D.

BRNO 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá middlewarem ROS2 a konkrétně je jejím cílem prozkoumat a demonstrovat možnosti tohoto systému. V práci byl vytvořen systém k ovládání rozšířeného robota Adept AWR. Kromě čistého ROS2 se práce také zabývá souvisejícími technologiemi jako Gazebo Simulátor do kterého byl přenesen fyziký robot a mapováním s navigací pomocí slam_toolbox a navigation2.

Abstract

Do tohoto odstavce bude zapsán výtah (abstrakt) práce v anglickém jazyce.

Klíčová slova

Robot Operating System 2, robotika, Gazebo Simulátor,

Keywords

Sem budou zapsána jednotlivá klíčová slova v anglickém jazyce, oddělená čárkami.

Citace

ONDERKA, Daniel. *Mobilní kamera realizovaná prostředky ROS2*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Janoušek, Ph.D.

Mobilní kamera realizovaná prostředky ROS2

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana X... Další informace mi poskytli... Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Daniel Onderka
12. dubna 2024

Poděkování

V této sekci je možno uvést poděkování vedoucímu práce a těm, kteří poskytli odbornou pomoc (externí zadavatel, konzultant apod.).

Obsah

1	Úvod	3
2	Použitý Hardware	4
2.1	HW Technologie	4
2.2	Adept AWR 4WD	6
2.3	Rozšíření Hardware komponent	10
2.4	Raspberry Pi 4b	11
3	Software pro řízení robota	13
3.1	Aktuální software	13
3.2	Seznámení s ROS2	13
3.2.1	Simultaneous Localization And Mapping	22
3.2.2	Navigation 2	22
3.2.3	Geometric Transformation Subsystem	22
4	Implementace	24
4.1	Uzly pro řízení komponent	24
4.2	Řízení robota na vyšší úrovni	29
4.3	Spouštěcí Soubory (Launch files)	33
4.4	Model robota a Gazebo Simulátor	35
4.5	ROS2 Control	38
4.5.1	Controller Manager	38
4.5.2	Model	39
4.5.3	Hw Plugin	39
4.5.4	Controllers	40
4.5.5	Integrace ros2 control s Gazebo simulátorem	40
4.6	Uživatelské rozhraní	43
4.7	Instalace	43
5	Závěr	44
	Literatura	45

Seznam obrázků

2.1	PWM signál pro různé hodnoty střídý	4
2.2	Open drain	5
2.3	Datové slovo sběrnice I2C	5
2.4	Full bridge ovladač motoru.	7
2.5	Schéma DC motoru	7
2.6	Vnitřní zapojení serva	8
2.7	Ultrazvukový senzor	9
2.8	Komunikační protokol pro WS2812 led	9
2.9	Struktura akcelerometru	10
2.10	Struktura akcelerometru	11
2.11	GPIO pinout pro Raspberry Pi	12
3.1	Vrstvy ROS2 systému	14
3.2	Struktura ROS2 Workspace	15
4.1	. . . . .	24
4.2	. . . . .	25
4.3	. . . . .	26
4.4	Zapojení BMS a nabíjecí desky	28
4.5	Výsledná rychlost po zintegrování tohoto grafu je -0.1496m/s	28
4.6	. . . . .	29
4.7	. . . . .	30
4.8	. . . . .	31
4.9	. . . . .	31
4.10	. . . . .	32
4.11	. . . . .	33
4.12	. . . . .	34
4.13	Základní postup volání lifecycle funkcí	39
4.14	Robot description bez a s daty z joint state publisheru	41
4.15	Zobrazení robota včetně jeho transformačních rámců v Rviz, fixed_frame je nastaven na odom a robot se tedy může pohybovat oproti počátku souřadného systému	41
4.16	. . . . .	42
4.17	. . . . .	43
1	Výsledný ROS2 systém bez slam navigace a gazebo	46

Kapitola 1

Úvod

Tato práce se zabývá tematikou robotiky. Primárním zaměřením je systém pro řízení robotů jménem Robot Operating System 2. ROS2 jak z názvu vyplývá je již druhá verze těchto nástrojů. V minulosti se originální ROS stal de facto standardem pro vývoj softwaru k řízení robotů. Většina práce tedy řeší převážně softwarovou stranu této problematiky. Obor robotiky jako takový se však pohybuje velice blízko hardwaru a tak se tato práce dotýká také některých hardwarových konceptů a principů potřebných k pochopení fungování použitých komponent.

Jak už bylo zmíněno hlavním zaměřením práce je samotný ROS2. Hlavní část práce se tedy snaží demonstrovat funkcionalitu a možnosti tohoto middleware. Obsahem této části je tvorba systému, který bude využívat nástroje ROS2 k ovládání robota. Jako hardware nad kterým bude celá práce implementována byla zvolena stavebnice Adept AWR 4WD. Kromě čistého ROS2 se práce zaměřuje také na související nástroje a systémy, které nějakým způsobem využívají nebo rozšiřují funkcionalitu ROS2. Prvním z nich je `ros2_control` knihovna pro řízení robotů. Následně je zasaženo využití lidar seznoru pro mapování a navigaci robota v prostoru. Jako poslední se práce také dotýká Gazebo simulátoru, pro vývoj a testování softwaru před použitím přímo na hardwarovém robotu.

První polovina této dokumentace se zaměřuje na vysvětlení teoretičtějších konceptů souvisejících s danou problematikou. Nejprve se zaměřuje na použitý hardware a principy fungování jednotlivých komponent. Následně přechází na samotný ROS2. Tato část se první podívá na to co ROS2 vlastně je a jak vnitřně funguje. Následně jsou pak vysvětleny koncepty, které používají vývojáři při interakci a vývoje výsledného ROS2 systému. Na konci teoretické části jsou ještě vysvětleny principy související s rozšířeními. Začátek praktické části nejprve ukazuje část výsledného systému která je implementována pouze s využitím ROS2. Zde se projdou uzly pro ovládání hardwarových komponent a vyšší uzly pro řízení celého robota. Dále pak následují jednotlivá rozšíření. Je zde zaměření na řízení motorů pomocí `ros2_control`, zprovoznění simulátoru a přemostění aby mohly `ros2` uzly řídit model v simulátoru. A jako poslední se řeší nastavení a získání potřebných dat ze zbytku `ros2` systému pro úspěšné mapování a navigaci.

Kapitola 2

Použitý Hardware

Celá práce je implementována nad existujícím hardwarem. Konkrétně se jedná o stavebnici Adept AWR 4WD. Její součástí jsou všechny použité motory, serva, čidla a další periferie. Mozkem, na kterém poběží software zajišťující ovládání těchto komponent, bude mikropočítač Raspberry Pi 4.

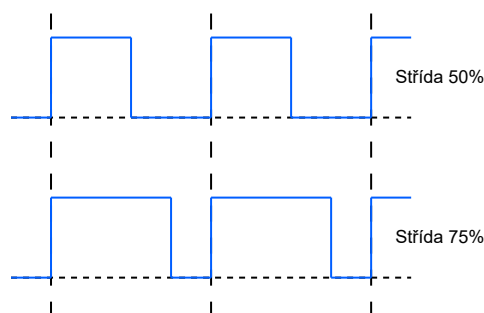
2.1 HW Technologie

Nejprve budou představeny obecné hardwarové technologie které jsou následně využívány některými z představovaných periférií.

Pulzně šířková modulace

Jedná se o techniku, která umožňuje vytvořit pseudo-analogový výstup s použitím číslicových výstupů. Mikrokontroléry jsou digitální zařízení a chtěly by tedy s okolním světem komunikovat pomocí jedniček a nul. Reálný svět tak ovšem nefunguje a proto je často potřeba převádět výstup z mikrokontroléru na analogový signál. Problém je v tom, že převod digitálního signálu na analogový je relativně dlouhá a neefektivní operace. Proto vznikla pulzně šířková modulace (PWM), která umožňuje relativně jednoduše simulovat analogový výstup. [2]

PWM využívá toho, že člověk nedokáže rozpoznat rychlé změny, například led dioda blikající na frekvenci 5000 Hz se člověku jeví jako by svítila permanentně. Mechanická zařízení také mívají relativně velkou latenci a dc motoru tedy nevádí, že místo konstantního analogového napětí dostává periodický číslicový signál. [2]

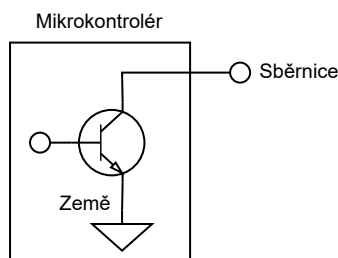


Obrázek 2.1: PWM signál pro různé hodnoty střídá

Při pohledu na klasický digitální signál který rovnoměrně střídá vysokou a nízkou úroveň by šlo říci, že se jedná o PWM signál se střídou 50%. Střída (duty cycle) udává poměr času, kdy je signál v logické jedničce, ku času, kdy je v nule. Součet těchto hodnot se musí rovnat délce jedné periody. Úpravou tohoto poměru lze simulovat analogový signál. [2]

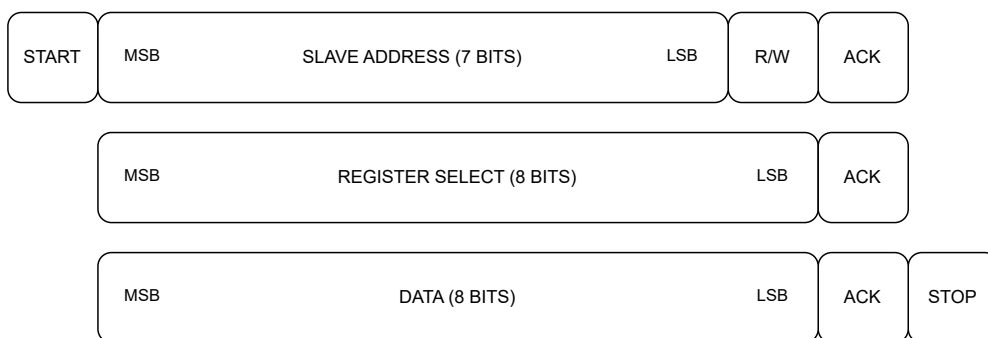
I2C

Je synchronní sběrnice, která se vyznačuje svou jednoduchostí a nízkou cenou. Využívá dva vodiče SDA (serial data) a SCL (serial clock). Oba vodiče jsou připojeny k napájecímu napětí pomocí pull-up rezistoru a bez vlivu jiného hardwaru tedy zůstávají v logické jedničce. Zařízení, která jsou na tuto sběrnici připojena, využívají open drain k úpravě aktuální napěťové úrovně. I2C pracuje s dvěma druhy zařízení, master a slave. Master zahajuje, řídí a ukončuje komunikaci na vodiči SDA a po dobu průběhu komunikace generuje hodinový signál na SCL. Typicky se jedná o mikrokontroler. Slave jsou pak ostatní zařízení s nimiž může master komunikovat, typicky různé periferie. [2]



Obrázek 2.2: Open drain

Přenos jednoho datového rámce zahájí master zařízení přivedením datové sběrnice do nuly. Následující komunikace se skládá z odeslání rámce o délce osmi bitů a potvrzení o úspěšném přenosu dat od přijímajícího zařízení. Toto potvrzení se nazývá ACK a je provedeno podržením datové sběrnice v hodnotě nula po dobu jednoho taktu. Opačný stav se nazývá NACK a indikuje že nastala chyba. Ukončení přenosu je provedeno navrácením datové sběrnice na hodnotu jedna. [3]



Obrázek 2.3: Datové slovo sběrnice I2C

Na obrázku lze vidět, jak může vypadat přenos jednoho datového slova. V prvním rámci je přenesena sedmi bitová adresa, identifikující slave zařízení se kterým chce máster navázat komunikaci. Osmý bit datového rámce indikuje směr, kterým budou posílány data. V dru-

hém rámci dojde k adresaci konkrétního registru na slave zařízení. A ve třetím, případně dalších, již probíhá samotné posílání dat mezi zařízeními. [7]

2.2 Adept AWR 4WD

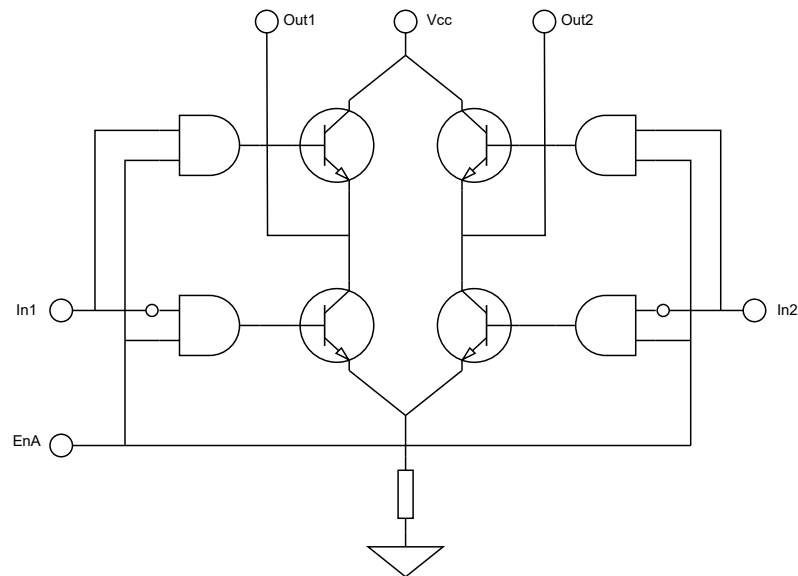
Pohyb tohoto robota zajišťují čtyři pevná kola a zatáčení je tedy realizováno diferenciálním způsobem. To znamená, že jednotlivá kola se mohou otáčet svou vlastní rychlostí a zpomalením kol na jedné straně oproti té druhé lze provést zatáčení robota. Velkou výhodou tohoto přístupu je možnost otáčení robota na místě. Nevýhodou pak budou složitější výpočty při potřebě zahrnout o nějaký přesně daný úhel.

Následující stránky popisují jednotlivé komponenty tohoto robota.

Robot HAT

HAT(hardware attached on top) je hardwarová deska, která slouží k rozšíření mikrokontroléru o další funkcionalitu. Tato konkrétní se k Raspberyy Pi připojuje pomocí GPIO(General purpose input output) pinů. Deska jako taková obsahuje rozšiřující čipy a rozhraní sloužící k ovládání připojených periférií.

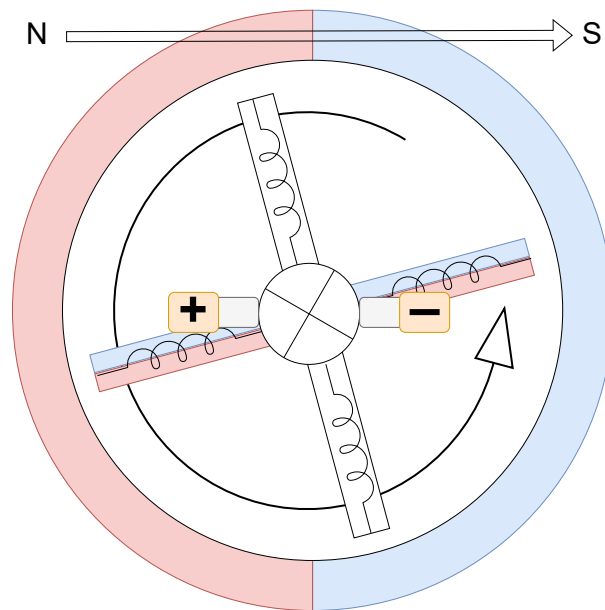
- PCA9685 [4]
 - generátor PWM signálu
 - 16 kanálů
 - 12 bitů rozlišení střidy (4096 možných hodnot)
 - je ovládaný přes I2C sběrnici
- L298P [9]
 - ovladač pro řízení dc motoru
 - základem je full bridge obvod
 - umožňuje roztočit motor oběma směry
 - pomocí PWM lze ovládat rychlost motorů
 - připojuje motor na externí napájení
- další rozhraní pro připojení periférií (sledování čáry, ultrazvukový senzor, led)



Obrázek 2.4: Full bridge konfigurace pro ovládání motoru. In1 a In2 určují směr otáčení. EnA je PWM signál určující rychlost otáčení. [9]

DC Motor

Pohyb celého autíčka zajišťují čtyři stejnosměrným proudem (direct current) napájené motory. Ovladač motorů L298P je umístěný na Robot HAT.



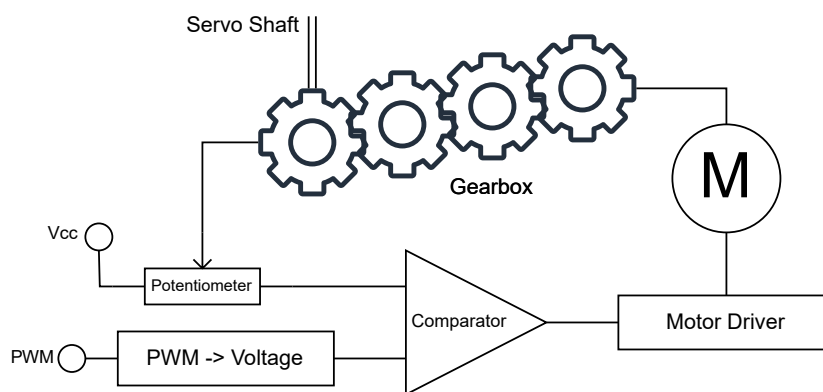
Obrázek 2.5: Schéma DC motoru

Elektrický DC motor se skládá ze dvou hlavních částí, stator a rotor. Stator je statická, vnější část, a typicky se jedná o permanentní magnet. Uvnitř statoru se pak nachází rotor, ten se skládá z elektromagnetů, které při zapnutí reagují se statorem (opačné póly se přitahují a stejné odpuzují) a dojde tak k částečnému pootočení. Při správném spínání

a vypínání těchto elektromagnetů lze motor rozběhnout. Toto střídání zajišťuje prstenec zvaný komutátor. Komutátor je rozdělen na několik od sebe odizolovaných částí, ke kterým jsou připojeny vývody elektromagnetů. S povrchem prstence jsou pomocí pružin v kontaktu dva kartáče. Tyto kartáče se již neotáčí a mohou tak být připojeny na zdroj napájení a zem. Komutátor se otáčí společně s rotorem a při tomto pohybu se kartáče postupně dotýkají různých částí komutátoru a spínají tak jednotlivé elektromagnety, ty zajistí pootočení rotoru a spnutí následujícího magnetu. [1]

Servo

Servo je komponenta na první pohled podobná DC Motoru. Na rozdíl od něj se však neotáčí celých 360 stupňů, ale bývá omezena na nějakou menší hodnotu, například 180 stupňů. Hlavním výhodou a důvodem pro použití serva je plná kontrola nad úhlem natočení jeho hřídele. [2]



Obrázek 2.6: Vnitřní zapojení serva

Při pohledu na vnitřní zapojení serva lze zjistit, že se prakticky jedná o klasický dc motor připojený na převodovku a rozšířený o elektroniku na jeho řízení. K nastavení úhlu serva se využívá PWM signál. Ten je první přeložený na napětovou úroveň, která je porovnávána s aktuálním natočením serva a výsledek udává směr, kterým se bude otáčet motor. Aktuální natočení serva je získáno využitím potenciometru zapojeného na výstupní hřídel serva. [2]

Ultrazvukový senzor hloubky

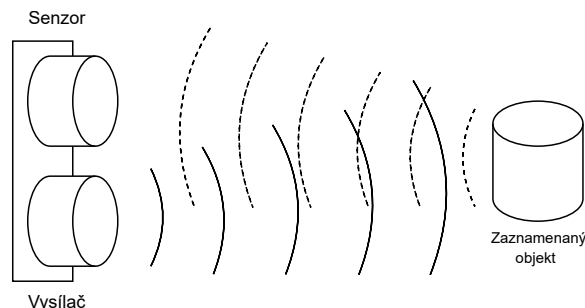
Slouží k určení vzdálenosti mezi robotem a překážkou. Funguje na principu radaru. Vyšle ultrazvukovou vlnu na frekvenci 40Khz a uloží si časovou značku. Následně poslouchá než se mu vrátí odražená vlna a opět si uloží značku. Pro výpočet vzdálenosti lze využít následující vzorec:

$$S = \frac{(T_2 - T_1) * V_S}{2}$$

Kde T_1 je moment kdy byla vyslána vlna T_2 kdy byla vlna přijata a V_S rychlost šíření zvuku ve vzduchu (cca 340m/s). Výsledek se pak dělí dvěma, protože doba $T_2 - T_1$ je rovna času k překážce a zpět.

Konkrétně se jedná o model hc-sr04, který dokáže změřit vzdálenost od 2cm do 400cm s přesností na 3mm. Ovládání senzoru je pak realizováno pomocí dvou jeho vývodů a to trig

a echo. Mikrokontroler vyšle pulz na trig vodiči. Ten zaktivuje senzor, který zahájí měření. To je realizováno osmi čtyřicetihercovými pulzy ze kterých vypočítá výslednou vzdálenost. Po dokončení výpočtu nastaví echo vodič do hodnoty jedna na dobu rovnou času mezi odesláním a zachycením ultrazvukového signálu. [2]



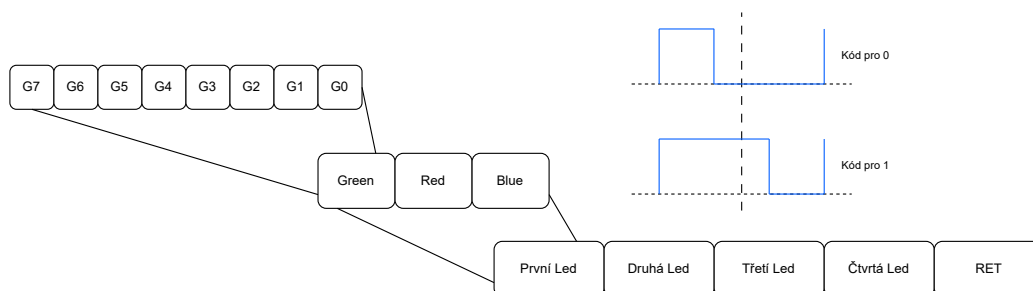
Obrázek 2.7: Ultrazvukový senzor

Třicestný senzor pro sledování čáry

Modul využívá fakt, že intenzita světla odraženého od povrchu je závislá na barvě dané plochy. Například černá barva pohltí téměř veškeré světlo, naopak bílá téměř vše odrazí. Používáno je infračervené záření, protože není ovlivněno okolními zdroji světla, odráží se od velkého množství materiálů a je přesné. Jedná se o třicestný modul a skládá se tedy ze setu tří vysílačů a senzorů. Pokud vysílač svítí a senzor nezaznamenává dostatečnou intenzitu odraženého světla, znamená to, že byla nalezena černá čára. [2]

WS2812 RGB LED

WS2812 je druh adresovatelných LED diod. Pojmem adresovatelných je myšleno, že není každá dioda připojena k mikrokontroleru zvláště, ale sdílejí jeden datový vodič pro nastavování barev. Prakticky to znamená, že pásek, který může obsahovat i stovky diod je připojený jen pomocí tří vodičů. Těmito vodiči jsou napájení, země a vstupní data. [10]



Obrázek 2.8: Komunikační protokol pro WS2812 led

Diody jsou na pásku zapojeny sériově. Každá dioda má DIN a DO port. Pokud dioda přijme data, která jí nejsou určena, přeposílá je dále. Komunikace vždy začíná klidovým stavem, datový vodič je v nule. Datové slovo se skládá z 24 bitových bloků pro každou diodu. Blok obsahuje tři osmi bitové hodnoty, jednu pro každou barevnou složku (MSB je

posíláno první). Diody pak fungují tak, že přijmou prvních 24 bitů, podle kterých nastaví svou barvu. Tuto část odeberou z datového slova a zbytek přeposílají na výstup. [10]

2.3 Rozšíření Hardware komponent

Lidar

Jedná se o senzor sloužící k měření vzdálenosti. Narozdíl od sonaru nebo radaru však využívá k tomuto účelu světlo a konkrétně laser.

Inertial Measurement Unit

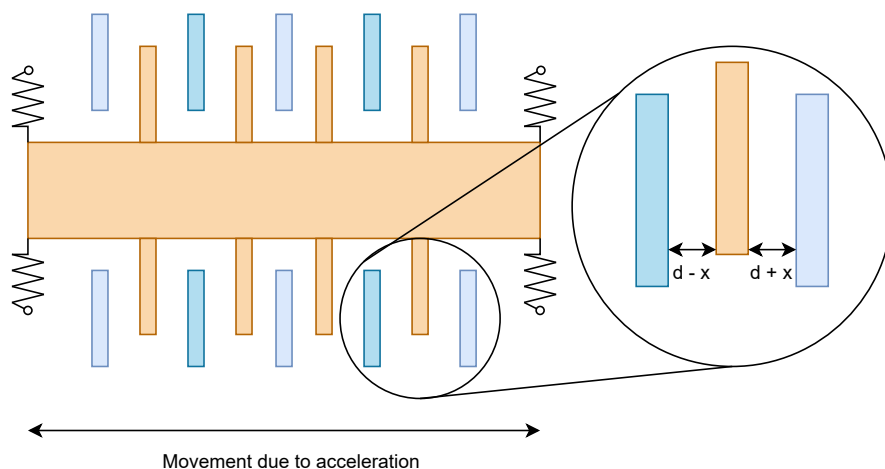
Jedná se o senzor sloužící k měření a určení pozice a orientace. Konkrétní použitý IMU senzor disponuje tříosým gyroskopem a akcelerometrem.

MEMS

Což znamená micro-electromechanical systems. Jak z názvu vyplývá jedná se o systémy využívající mechanické elementy ve velikostech typických pro elektronické součástky. Typicky se jedná o velikosti pod $100\mu m$.

Princip Akcelerometru

Akcelerometr na čipu je postavený na principu MEMS.



Obrázek 2.9: Struktura akcelerometru

Senzor pak funguje na tom principu, že střední část umístěná na pružinách má nějakou nezanedbatelnou váhu a vnější akcelerace tak způsobí pohyb relativně ke zbytku systému. Jak na pohyblivé tak na statické části se pak nachází desky tvořící části kondenzátoru. Pohyb střední části způsobí změnu kapacity těchto kondenzátorů kterou lze měřit.

Základní rovnice pro výpočet kapacity je následující:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

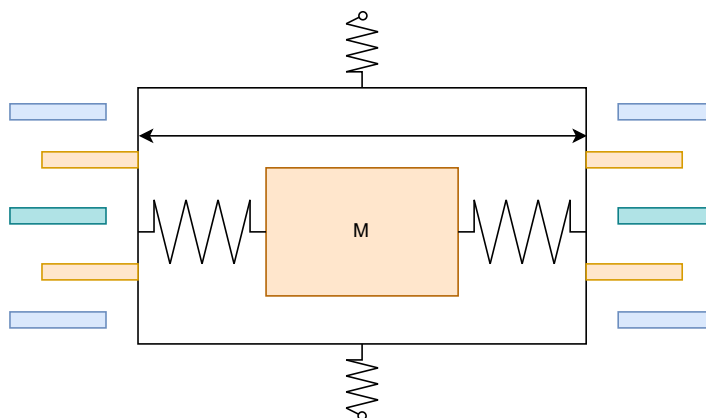
Kde C je výsledná kapacita ϵ je A plocha desek ϵ permitivita prostředí mezi nimi a d jejich vzdálenost.

Statické desky jsou zapojeny střídavě a rozdíl mezi jejich kapacitami pak odpovídá posunutí vnitřní části.

$$x \approx d \frac{\Delta C}{C_0}$$

Princip Gyroskopu

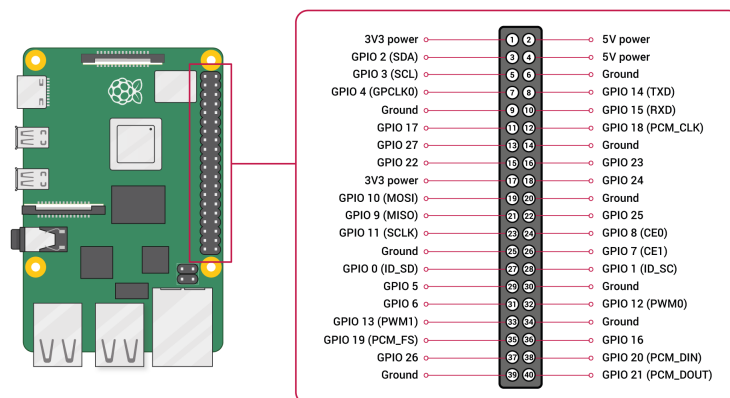
Gyroskop na čipu je využívá podobné principy jako akcelerometr. Skládá se ze dvou částí, vnitřní a vnější (senzorický) rám. Ve vnitřním rámu je umístěná pohyblivá část s nezanedbatelnou hmotností. Na rozdíl od akcelerometru není tato část v klidovém stavu statická ale je rozvíbována do harmonické oscilace podél osy x . Vnitřní rám je celý umístěn pohyblivě, pomocí pružin, uvnitř senzorického rámu. Při rotaci gyroskopu se bude vnitřní oscilující část snažit držet původní směr, ve kterém se pohybovala, což způsobí pohyb celého vnitřního rámu podél osy y . Tento pohyb je pak detekován pomocí změn kapacit kondenzátorů, stejně jako u akcelerometru.



Obrázek 2.10: Struktura akcelerometru

2.4 Raspberry Pi 4b

Jako mozek celého systému je použit mikropočítač Raspberry Pi. V porovnání s běžně používanými mikrokontroléry, sloužícími pro řízení vestavěných systémů, se jedná o výkonnější hardware, který zvládá i komplexnější operace, jako běh plnohodnotného operačního systému a zpracování obrazu. Konkrétně se jedná o verzi 4 model B s operační pamětí o velikosti čtyř gigabajtů. Tato verze obsahuje 64bitový procesor, ten je potřeba pro spuštění 64 bitového Ubuntu serveru, který je doporučeným operačním systémem pro požití ROS2 na Raspberry Pi. Komunikace s většinou použitých periférií je uskutečněna pomocí General Purpose Input Output (GPIO) pinů. Jedná se o číslicové vývody, které podle potřeby můžou fungovat jako vstup i výstup ze zařízení. Některé z nich pak mají ještě speciální funkce, například GPIO 2 a 3 můžou pracovat jako SDA a SCL připojení pro I2C komunikaci.



Obrázek 2.11: GPIO pinout pro Raspberry Pi

Camera

Přímo k Raspberry Pi je připojena oficiální rpi camera v3. Tento modul dokáže nahrávat video až v rozlišení 2304×1296 pixelů a 56 snímcích za vteřinu. Avšak pro zpracování, případně analýzu obsahu videa v reálném čase s těmito specifikacemi nemá Raspberry Pi dostatečný výkon. Prakticky budou využity nižší rozlišení a snímkovací frekvence. [5]

Kapitola 3

Software pro řízení robota

Jak už bylo řečeno, software poběží na Raspberry Pi. Jako primární programovací jazyk byl zvolen python, protože je jedním z oficiálních jazyků podporovaných ROS2 a také jsou v něm implementovány potřebné knihovny pro ovládání periférií.

3.1 Aktuální software

Robot Adept AWR 4WD je dodáván s ukázkovým softwarem. Ten je implementován v jazyce Python a využívá knihovny třetích stran sloužící k nízkourovňovému ovládání hardwarových komponent. Aby byl robot responzivní je celá implementace řešena s použitím python modulů pro realizaci multithreadingu.

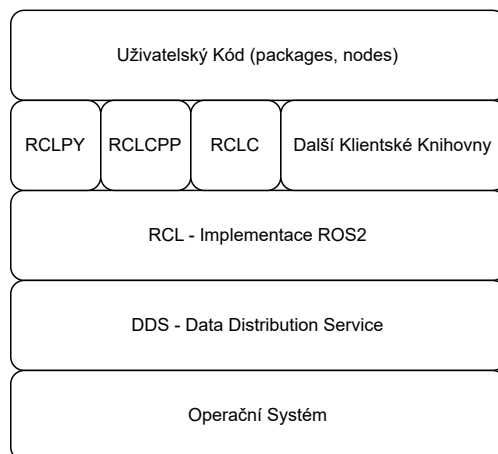
3.2 Seznámení s ROS2

ROS2 je middleware sloužící k vývoji a řízení robotů. Middleware je softwarová vrstva běžící nad operačním systémem. Jejím úkolem je rozšíření operačního systému o další funkcionalitu. Typickou součástí middlewaru bývají knihovny, ovladače, vývojové a monitorovací nástroje. Může také specifikovat doporučené metodologie pro vývoj. ROS2 je již druhá verze tohoto softwaru, která rozšiřuje a opravuje neduhy první verze. Původní ROS1 je považován za de-facto standart pro vývoj robotických aplikací. Tato práce využívá ROS2 distribuci jménem iron. Distribuce v ROS2 lze popsat jako set operačního systému, knihoven a dalších aplikací, které jsou otestovány a je zaručeno, že jsou navzájem kompatibilní. Velkou výhodou ROS je fakt, že se jedná o open source projekt. Díky tomu kolem něj vznikla velká komunita vývojářů, ale i firem a dalších institucí, které tvoří mnoho souvisejícího obsahu. Existuje tedy velké množství knihoven, dokumentací a návodů které usnadňují vývojářům práci. [6]

Vrstvy ROS2

Na nejvyšší úrovni, se nachází programátor, který interaguje s klientskými knihovnami pro vývoj ROS2 aplikací. Tyto knihovny jsou oficiálně dvě a to rclpy pro python a rclcpp pro C++. Existují také implementace pro další programovací jazyky (rclc, java, C#), které jsou však udržovány komunitně. Všechny klientské knihovny pak využívají RCL. To je jádrem celého ROS a obsahuje implementaci všech ROS2 funkcionalit. Je napsáno v jazyce C a jeho součástí je rozhraní, pomocí kterého poskytuje svou funkcionalitu ostatním klientským knihovnám. Díky tomuto přístupu se uzly implementované v pythonu budou chovat

stejně jako ty implementované v c++. Z toho pak také vyplývá, že uzly implementované na různých klientských knihovnách spolu mohou bez problémů komunikovat. Poslední vrstvou je data distribution service. DDS je komunikační vrstva implementována na UDP protokolu sloužící k předávání informací mezi procesy. Má charakteristiky systémů reálného času, zajišťuje kvalitu a zabezpečení komunikace. Také umožňuje vyhledávání uzlů bez potřeby centralizovaného serveru (vyhledávání je realizováno s využitím multicastové komunikace, zprávy zasílané mezi jednotlivými uzly pak využívají klasický unicast). [6]



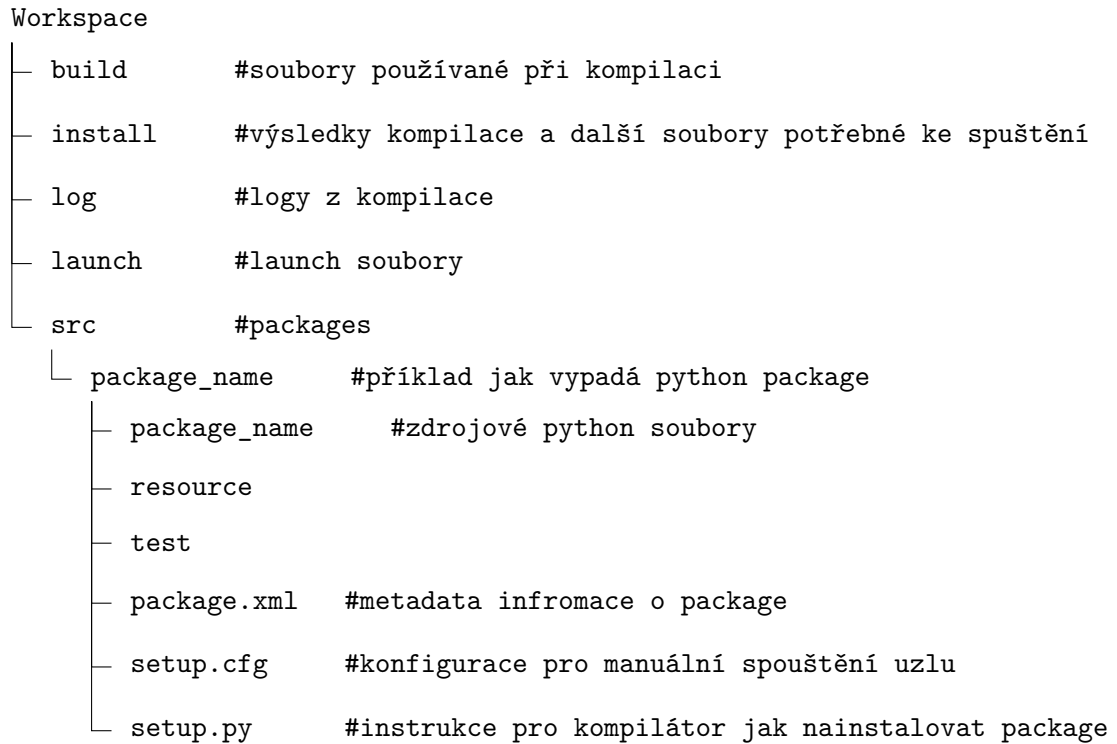
Obrázek 3.1: Vrstvy ROS2 systému

Vývoj v ROS2

Nejvyšší organizační jednotkou v ROS2 je workspace. Jedná se o složku, která slouží k organizaci zdrojových souborů, jejich instalaci a následné spouštění. ROS2 se také kvalifikuje jako workspace a před použitím musí být nejprve aktivován. K tomu v linuxu slouží příkaz **source**. Aktivace workspace je akumulativní, to znamená, že v jeden moment může být aktivních několik workspace najednou. Typicky se první aktivuje základní ROS2 instalace, která tvoří takzvanou underlay vrstvu. Vývojový workspace aktivovaný jako druhý, se pak nazývá overlay. Pokud má overlay nějaké závislosti, měly by být uspokojeny v underlay. Zdrojové soubory v rámci workspace jsou pak organizovány do packages. Package může obsahovat zdrojové soubory, knihovny a definice zpráv. Packages na sobě mohou navzájem záviset (např: package která využívá interface závisí na jiné která tento interface definuje). [6]

Node

Celý ROS2 systém je složený z uzlů (node), které mezi sebou navzájem komunikují. Každý uzel je vlastní výpočetní jednotka, která by měla plnit jeden specifický úkol. Tento přístup je podobný objektově orientovanému návrhu a ROS2 jej také využívá. Implementačně je uzel objekt, který dědí ze třídy **Node**. Uzly v ROS2 většinou nepotřebují běžet permanentně, ale pouze v momentě, kdy nastane nějaká událost, kterou je potřeba obsloužit. Z toho důvodu existuje v ROS2 metoda **spin()**, která uspí vykonávání uzlu, dokud jej není potřeba opět využít. Aby ROS2 šetřil výpočetní prostředky, využívá dva přístupy k určení, kdy bude potřeba uzel vzbudit. Prvním je iterative execution, ten se používá u uzlů, které vykonávají svou činnost pravidelně na nějaké předem dané frekvenci. Například se může jednat o



Obrázek 3.2: Struktura ROS2 Workspace

výpočetní uzel, který pravidelně každých x mikrosekund provede výpočet podle hodnot senzorů a odešle výsledek. Druhý je event oriented execution. Zde dochází k vyvolání řídicího cyklu jako důsledek nějaké události, typicky se jedná od příchozí zprávu z subscription, service nebo action. Frekvenci spouštění těchto uzlů pak lze odvodit od frekvence příchozích zpráv. Typicky se může jednat o uzel přijímající snímky z kamery na kterých provede výpočet a vrátí odpověď. Frekvence výpočtu je dána příchozími snímky, pokud snímky přestanou přicházet, uzel se nebude spouštět. [6] [8]

Algoritmus 1: DEFINICE A POUŽITÍ NODE OBJEKTU

```

1: class CustomNode(Node):
2:     def __init__(self):
3:         super().__init__('node_name')
4: def main(args):
5:     rclpy.init(args=args)
6:     node = CustomNode()
7:     rclpy.spin(node)
8:     node.destroy_node()
9:     rclpy.shutdown()

```

Topic

Je základním a také nejčastěji používaným způsobem pomocí kterého spolu ROS2 uzly komunikují. Topic si lze představit jako analogii hardwarové sběrnice. Prakticky se jedná o přesně pojmenované místo, do kterého může n uzlů posílat data (Publish) a m poslouchat co bylo posláno (Subscribe). Zprávy posílané do topicu mají přesný formát a jsou posílány asynchronně. Příkladem použití může být topic, do nějž posílá data uzel ovládající kameru a několik dalších uzlů které tyto data potřebují jej mohou číst. [6]

Algoritmus 2: SUBSCRIBER NODE

```
1: self.create_subscription(Interface, "topic_name",
    self.callback_function, queue_size)

2: def callback_function(self, msg):
3:     value = msg.item
```

Tento kód ukazuje, jak se může uzel přihlásit v odebrání zpráv z topicu. Nejprve je potřeba (typicky v konstruktoru třídy) zavolat zděděnou metodu sloužící k inicializaci nějaké ROS2 funkcionality. V tomto případě se jedná o `create_subscription`. Jako parametry potřebuje jméno, interface, callback funkci a délku fronty. Interface definuje formát zpráv a délka fronty je použita v případě, že uzel nezvládá přijímat zprávy dostatečně rychle. Callback funkce je pak zavolána pokaždé když do topicu přijde nová zpráva. Druhým parametrem callback funkce je předán objekt, který ve svých attributech obsahuje hodnoty dané zprávou. [8]

Algoritmus 3: PUBLISHER NODE

```
1: self.publisher = self.create_publisher(Interface, "topic_name",
    queue_size)

2: output = Interface()
3: output.item = some_value
4: self.publisher.publish(output)
```

Odesílání zpráv do topicu demonstruje tento kód. Jeho struktura je podobná předchozímu příkladu. Odeslání zprávy demonstrují řádky 2–4. Nejprve dojde k inicializaci objektu interface, stejného datového typu jako ten, který používá topic. Tento objekt je následně naplněn daty a pomocí metody `publish()` předem vytvořeného publisheru odeslán. [8]

Service

Service funguje na stejném principu jako klient-server komunikace známá z počítačových sítí. Jedná se tedy o synchronní komunikaci, kde jeden uzel poskytuje nějakou službu a ostatní si na ni mohou poslat požadavek. Od service uzlu se typicky předpokládá okamžitá odpověď, aby nedošlo k narušení řídicího cyklu volajícího uzlu. [6]

Algoritmus 4: SERVICE SERVER

```
1: self.srv = self.create_service(Interface, "service_name",
    self.callback_function)
2: def callback_function(self, request, response):
3:     value = request.item
4:     response.item = some_value
5:     return response
```

Změnou oproti předchozím příkladům je přidání nového parametru do callback funkce. Tato funkce má nyní dva důležité parametry, request a response. Request obsahuje konkrétní hodnoty požadavku na server a response je potřeba naplnit výsledky a vrátit z funkce. [8]

Algoritmus 5: SERVICE CLIENT

```
1: self.cli = self.create_client(Interface, "service_name")
2: while not self.cli.wait_for_service(timeout_sec=1.0):
3:     pass
4: def send_request(self):
5:     self.req = Interface.Request()
6:     self.req.item = some_value
7:     self.future = self.cli.call_async(self.req)
8:     rclpy.spin_until_future_complete(self, self.future)
9:     response = self.future.result()
10:    value = response.item
```

Service client narozdíl od topic subscriberu závisí na tom, aby existoval server, který je schopný odpovídat na jeho požadavky. Tato podmínka vyplývá z faktu, že service server by měl odpovídat na dotazy téměř okamžitě a service klient tedy předpokládá, že vždy dostane odpověď. Pokud by neexistoval server, klient by při požadavku skončil v nekonečném čekání. Proto je hned v konstruktoru implementována kontrola, které nedovolí vytvoření uzlu dokud není přítomen server. Čekání na odpověď od serveru, je pak implementována pomocí funkce `spin_until_future_complete()` [8]

Action

Jedná se o rozšířenou verzi service. Akce z pravidla vykonává déle trvající požadavek. Například provedení řídicího manévru robota, který je prováděn v reálném světě a z pohledu uzlu se nejedná o krátkodobou záležitost. Akce, na rozdíl od service, dokáže v průběhu vykonávání své činnosti odesílat průběžné aktualizace o aktuálním stavu zpět volajícímu uzlu. Implementačně akce funguje jako dva service a jeden topic. Cílový (goal) service slouží k zaslání požadavku na server a jeho potvrzení. Výsledkový (result) pak vrací výsledek operace. V průběhu akce pak server posílá aktualizace do topicu. [6]

Algoritmus 6: ACTION SERVER

```
1: self.action_server = ActionServer(self, Interface, "action_name",
   self.callback_function)
2: def callback_function(self, goal_handle):
3:     goal_handle.request.item
   // odeslání zpětné vazby volajícímu
4:     feedback = Interface.Feedback()
5:     feedback.item = some_value
6:     goal_handle.publish_feedback(feedback)
   // úspěšné ukončení požadavku
7:     goal_handle.succeed()
8:     result = Interface.Result()
9:     result.item = some_value
10:    return result
```

Action server využívá stejné postupy jako předchozí ukázky, pouze jich kombinuje více dohromady. V rámci callback funkce může odesílat průběžně zpětnou vazbu a nakonec jako návrat z funkce předá výsledek. [8]

Algoritmus 7: ACTION CLIENT - ZASLÁNÍ POŽADAVKU

```
1: self.action_client = ActionClient(self, Interface, "action_name")
2: def send_goal(self):
3:     goal_msg = Servo.Goal()
4:     goal_msg.item = some_value
5:     self.action_client.wait_for_server()
6:     self.goal_future = self.action_client.send_goal_async(goal_msg,
   self.feedback_callback_function)
7:     self.goal_future.add_done_callback(self.response_callback_function)
```

Při pohledu na implementaci action klienta lze dobře vidět vnitřní implementace akcí. První funkce `send_goal()` vypadá podobně jako service client. Dojde zde k zaslání požadavku na server a následné čekání na odpověď. Čekání tentokrát není aktivní, aby nedošlo k uvážnutí, ale je realizováno pomocí callback funkce. Součástí dotazu je také topic pro zasílání aktualizací. [8]

Algoritmus 8: ACTION CLIENT - REAKCE NA PŘIJMUTÍ NEBO ZAMÍTNUTÍ POŽADAVKU

```
1: def response_callback_function(self, future):
2:     goal_handle = future.result()
3:     if not goal_handle.accepted:
4:         return
5:     self.result_future = goal_handle.get_result_async()
6:     self.result_future.add_done_callback(self.result_callback_function)
```

Druhá `response_callback_function` pak zpracuje výsledek požadavku (přijmutí nebo zamítnutí) a pošle požadavek na result service, který nakonec vrátí výsledek. [8]

Algoritmus 9: ACTION CLIENT - CALLBACK FUNKCE

```
1: def feedback_callback_function(self, msg):
2:     feedback = msg.feedback
3:     value = feedback.item
4: def result_callback_function(self, future):
5:     result = future.result().result
6:     value = result.item
```

Interface

Interface slouží k určení přesného formátu jednotlivých zpráv, které jsou posílány mezi uzly. ROS2 obsahuje mnoho již vytvořených a vývojáři po celém světě používaných formátů. Tento přístup podporuje znovupoužitelnost vytvořeného kódu a šetří práci. Díky tomu může být software pro ovládání konkrétního kusu hardware naimplementován pouze jednou s využitím standartního rozhraní a všichni ostatní jej pak mohou využít ve svých systémech. Pokud však standartní interface nevyhovuje potřebám, lze si naimplementovat vlastní. K definici konkrétního formátu slouží tři druhy souborů. [6]

Prvním jsou `.msg` zprávy. Tento formát je využívám topicky. Jedná se o seznam, kde je každá položka definována jako dvojice datový typ a název (případně komentář).

```
int32 angle #comment
string direction
```

Druhým je `.srv`. Slouží pro definici request/response zpráv pro komunikaci se servicem. Tento soubor obsahuje dvě části, požadavek a odpověď, každá je tvořena seznamem položek a jsou odděleny řádkem `---`.

```
int32 a
int32 b
---
int64 sum
```

Poslední je `.action` soubor. Slouží pro komunikaci s action serverem. Definice se skládá ze tří seznamů, jeden pro požadavek, druhý pro odpověď a poslední pro stavové aktualizace.

```
float32 goal_angle
---
bool response
---
float32 current_angle
```

Parametry

ROS2 uzly lze spouštět s parametry. Typicky slouží k nastavení hodnot (předání konfiguračního souboru) za běhu programu bez potřeby zásahu do zdrojových kódů. Příkladem může uzel, sloužící k obsluze periferního zařízení a parametrem jsou mu předány čísla GPIO pinů na které je dané zařízení připojeno. [6]

Algoritmus 10: PARAMETERS

```
// deklarace parametru, typicky v konstruktoru
1: self.declare_parameter('parameter_name', 'default_parameter_value')

// získání hodnoty parametru
2: param =
    self.get_parameter('parameter_name').get_parameter_value().string_value

// nastavení hodnoty parametru
3: new_param = rclpy.parameter.Parameter(
4:     'parameter_name',
5:     rclpy.Parameter.Type.STRING,
6:     'default_parameter_value'
7: )
8: new_param_list = [new_param]
9: self.set_parameters(new_param_list)
```

Launch File

ROS2 systém se skládá z velkého množství navzájem komunikujících uzlů, a protože spouštění každého uzlu zvlášť by bylo pracné a zdlouhavé, existují launch soubory, které tuto práci usnadňují. Tyto soubory můžou být napsány v pythonu, yaml nebo xml. Čtyři hlavní úkoly, které launch soubory plní, jsou spouštění uzlu, volání dalšího launch souboru, nastavení parametrů a proměnných prostředí. Prakticky se launch soubory píší minimálně na dvou úrovních. Na nižší úrovni se využívají jako součást package, kde slouží k spouštění jednotlivých uzlů. Jejich úkolem je nastavit uzel tak, aby nebylo potřeba modifikovat zdrojový kód. Typicky tak nastavuje správný namespace, předávají parametry, konfigurační soubory a případně dochází k přemapování jména topicu. Launch soubory vyšších úrovní pak slouží ke spuštění několika uzlů zároveň a využívají k tomu launch soubory nacházející se v packages. [6]

Config soubory

Konfigurační soubory se typicky umísťují do složky `config` v kořenovém adresáři balíku a používají formát `.yaml`.

Algoritmus 11: LAUNCH FILE

```
1: def generate_launch_description():
2:     return LaunchDescription([
3:         // spuštění konkrétního uzlu
4:         Node(
5:             package='package_name',
6:             executable='node_name',
7:             namespace='namespace_name',
8:             parameters=[{
9:                 'param_name' : param_value,
10:            }],
11:         ),
12:         Node(
13:             package='package_name',
14:             executable='node_name',
15:             remappings=[
16:                 ('topic_name', 'different_topic_name'),
17:             ],
18:             // zavolání dalšího launch souboru
19:             IncludeLaunchDescription(
20:                 PythonLaunchDescriptionSource([
21:                     PathJoinSubstitution([
22:                         FindPackageShare('package_name'),
23:                         'launch',
24:                         'node_name.py'
25:                     ])
26:                 ]),
27:             )
28:     ])
```

Algoritmus 12: CONFIG FILE

```
    // parametry pro konkrétní uzel
1: node_name:
2:   ros__parameters:
3:     int_param: 16
4:     double_param: 3.14 #comment
5:     string_param: "radians"

    // wildcard, parametry pro všechny uzly
6: /**: ...
```

Formáty pro popis Robotů

V robotice se často objevuje potřeba definovat strukturu a fyzikální vlastnosti robotů, objektů případně prostředí, ve kterém se nachází. Nejzjevnějším případem jsou simulátory

ale existují i jiné použití kde programy potřebují znát aktuální stav, odometrii robota, a k tomu je nejprve potřeba znát jeho strukturu.

Unified Robotics Description Format

XML Macro

Xacro lze použít na jakékoli XML soubory, ale primárně se používá k generování URDF souborů. Cílem tohoto formátu je zjednodušení URDF souborů, které se při popisu složitějších robotů stávají dlouhé a náchylné na chyby. Xacro tedy přidává funkce sloužící k eliminaci těchto nedostatků. První z nich je možnost definovat konstanty, v urdf se často opakují stejné hodnoty na několika místech, jednoduchým případem může být definice vizuální a kolizní části <link> elementů které bývají často totožné.

```
<xacro:property name="wheel_radius" value="0.035" />
```

Na konstanty pak navazuje vkládání matematických výrazů, místo statických hodnot.

```
<cylinder radius="$${wheel_diameter/2}" length="0.1"/>
```

Hlavní funkcionalitou tohoto formátu jsou však makra. Ty umožňují zaobalit blok kódu a přiřadit mu identifikátor pomocí kterého lze takové makro vkládat na další místa v kódu. Makra mohou brát na vstupu také parametry. V těle makra lze pak tyto parametry vkládat a v kombinaci s matematickými výrazy vytvářet komplexní definice.

```
<xacro:macro name="identifikator" params="name mass:=default_value">
```

Posledním rozšířením které xacro oproti urdf přináší je možnost rozdělení definice robota do více souborů.

```
<xacro:include filename="components.xacro"/>
```

Simulation Description Format

SDF je formát založený na XML. Jak z názvu vyplývá, slouží k popisu robotů, ale také světu ve kterých se budou následně pohybovat. Jedná se o primární formát využívaný Gazebo simulátorem.

3.2.1 Simultaneous Localization And Mapping

3.2.2 Navigation 2

3.2.3 Geometric Transformation Subsystem

Jedná se o subsystém ROS2, který realizuje geometrické transformace mezi jednotlivými částmi robota. Vztah mezi dvěma objekty lze definovat pomocí posunu (translation) a otočení (rotation). Matematicky jsou tyto složky reprezentovány maticemi, které po spojení vytváří výslednou transformační matici. Vzhledem k tomu, že roboti se skládají z velkého množství částí, které jsou na sebe navzájem zavěšeny a zároveň se jejich relativní pozice neustále mění, není vhodné počítat tyto vztahy manuálně a proto existuje TF.

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{A \rightarrow B}^{xx} & R_{A \rightarrow B}^{xy} & R_{A \rightarrow B}^{xz} & T_{A \rightarrow B}^x \\ R_{A \rightarrow B}^{yx} & R_{A \rightarrow B}^{yy} & R_{A \rightarrow B}^{yz} & T_{A \rightarrow B}^y \\ R_{A \rightarrow B}^{zx} & R_{A \rightarrow B}^{zy} & R_{A \rightarrow B}^{zz} & T_{A \rightarrow B}^z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{pmatrix}$$

Matice pro manuální výpočet transformace

Základním prvkem se kterým TF pracuje je takzvaný frame, neboli rám. Rám reprezentuje nějakou část robota jako senzor, kolo a podobně. Tyto rámy jsou uspořádány do stromové struktury, kde má každý uzel vždy jednoho předka. Podle konvence je kořenem robota z pravidla `base_link`, který se nachází v jeho středu. Dalším běžným rámem je `odom`. Ten reprezentuje vztah mezi aktuální pozicí robota a počátkem souřadného systému.

Pro předávání dat mezi uzly jsou využívány dva topicy.

- `/tf` - dynamické transformace pro komponenty připojené přes serva, motory
- `/tf_static` - statické transformace pro komponenty pevně připevněné na jiné části

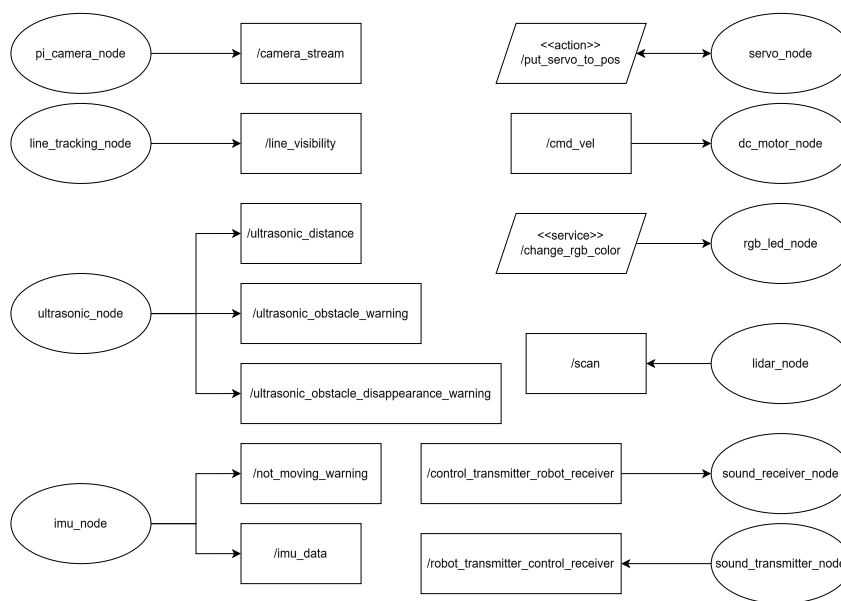
ROS2 uzly neinteragují s těmito topicy stejně jako s běžnými topicky ale pomocí speciálních objektů k tomu sloužícím. Pro zasílání nových dat do TF systému slouží `TransformBroadcaster`. Ten se používá vesměs stejně jako klasický publisher. Pro získání dat z tf systému pak slouží `TransformListener`. Ten neslouží k jednoduchému čtení zpráv posílaných v topicu, ale umožňuje dotazování se tf systému na konkrétní transformace. Dotaz se skládá z specifikování dvou rámců, mezi kterými je transformace hledána. Tyto dva rámce nemusí být v tf stromu přímí potomci. Cesta od jednoho k druhému může vést přes několik uzlů, ale dokud jsou navzájem dosažitelné, tak tf vrátí výslednou transformaci. Druhou částí dotazu je čas, ten je potřebný protože, pokud je cesta mezi rámy delší může se i během několika milisekund výrazně změnit výsledná transformace a použití aktuálního času tak není vhodné. Specifikování času také umožňuje získávat pozice z minulosti.

Kapitola 4

Implementace

4.1 Uzly pro řízení komponent

Každá hardware komponenta má nějaké rozhraní přes které s ní lze komunikovat a buď zadávat příkazy nebo získávat data. Proto je pro každou z komponent implementován uzel, který toto rozhraní využije a zpřístupní tak ovládání nebo získaná data zbytku ROS2 systému.



Obrázek 4.1:

Komponenty součástí adept kitu

Základem robota je stavebnice adept s základními komponentami.

Motory

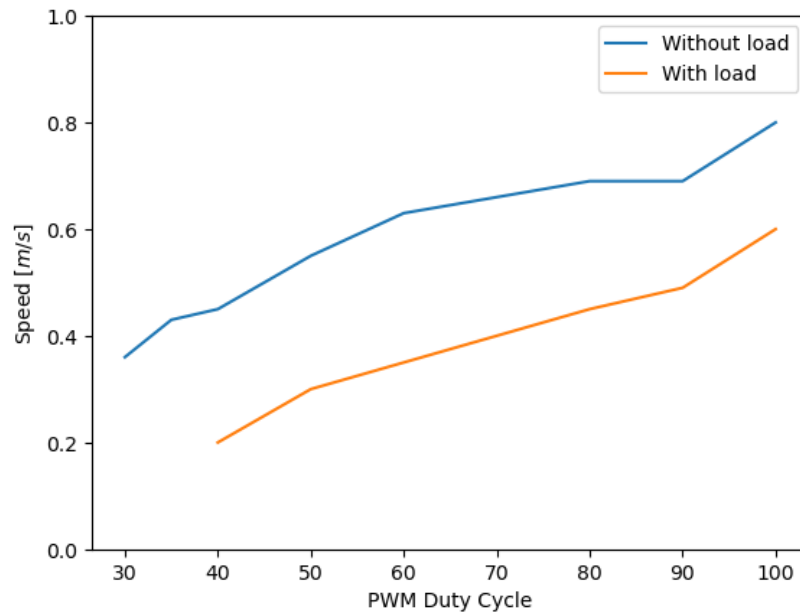
Robot disponuje čtyřmi stejnosměrnými motory. Řízení je tedy realizováno diferenciálním způsobem. V ROS systému je ovládání motoru realizováno uzlem `dc_motor_node`. Tento uzel přímo ovládá GPIO piny, pomocí kterých řídí h-bridge obvod. Co se týče interakce s

ROS2 systémem, tento uzel poslouchá topic jménem `cmd_vel` command velocity. Jedná se o standartní topic pro posílání příkazu na pohyb robota. Zprávy v tomto topicu jsou typu Twist. Pro robota s diferenciálním pohonem je tedy důležitá lineární x složka a angulární z. Pomocí nich lze spočítat výsledná rychlost otáčení pro kola na jedné a druhé straně.

$$\omega_L = \frac{V - \omega * b/2}{r}$$

$$\omega_R = \frac{V + \omega * b/2}{r}$$

Kde ω_L a ω_R jsou výsledné rychlosti motorů v $[rad/s]$. V je zadaná lineární a ω angulární složka v $[m/s]$ a $[rad/s]$. b je rozpětí mezi koly a r poloměr kola v $[m]$.



Obrázek 4.2:

Servo

Adept AWD 4WD využívá pouze jedno servo, a to na ovládání úhlu natočení kamery. Konkrétně se jedná o model Adept AD002. Generování PWM signálu pro ovládání zajišťuje čip PCA9685, který je součástí Robot HAT. V softwaru je k jeho řízení využita knihovna `Adafruit_PCA9685`. Vzhledem k tomu, že použité servo má větší rozsah pohybu, než kolik je místa pro kameru, zajišťuje uzel kontrolu minimálního a maximálního natočení aby nedošlo k poškození robota. Z pohledu ROS2 systému tento uzel demonstruje jednoduchý action server. Server přijme požadavek, postupně otáčí servo do cílové pozice a průběžně odesílá informaci o aktuálním úhlu serva.

Kamera

Zachytávání snímků kamery je realizováno pomocí knihovny OpenCV. Aby bylo možno dosáhnout relativně krátké odezvy při přehrávání videa není obraz zaznamenáván v nativním rozlišení a snímkovací frekvenci kamery, ale byly použity snížené hodnoty. V základním

konfiguraci je použito rozlišení 960 na 540 pixelů a snímkovací frekvence 20hz. Pro přenos snímků v ROS2 systému je použita zpráva vestavěného typu `CompressedImage`. Před odesláním jsou ještě data zakódována do jpeg formátu pomocí nástrojů knihovny `opencv`.

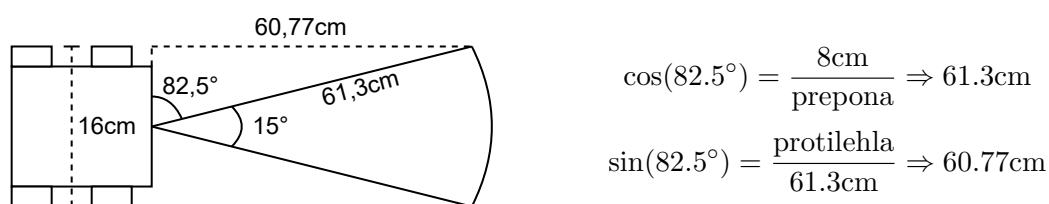
Formát	Base64	Image	CompressedImage
Velikost zprávy:	0,24 MB	1,56 MB	0,17 MB

Před finálním rozhodnutím o použití `CompressedImage` formátu bylo experimentováno také se zprávami typu `Image`. Tento typ obsahuje více rozšiřujících informací o přenášeném obrázku jako jeho rozměry, použité kódování a podobně. Na první pohled se tedy zdá jako vhodnější formát. Protože se však jedná o snímky kamery přenášené mezi dvěma různými zařízeními pomocí wifi připojení přináší tento objemově větší formát příliš velké zpoždění, které překonává použitelné hranice pro streamování. Na počátku vývoje byl použit ještě třetí možný přístup, který však nevyužívá ROS2 funkcionality a proto byl později změněn. Tím je zakódování přenášených snímků do `base64` formátu a následné přenesení jako jednoduchou `string` zprávu. Tento přístup se ukázal jako zcela funkční a dosahující podobných výsledků ve zpoždění jako má `CompressedImage`.

Ultrazvukový senzor

Ovládání ultrazvukového senzoru je relativně jednoduché a je tedy realizováno pomocí práce s GPIO piny. Získání aktuální vzdálenosti se skládá z odeslání pulzu na trig pin. Následně se počká dokud senzor nezačne na echo pin odesílat odpověď. V ten moment se uloží časová značka a počká se dokud se echo pin nevrátí zpět na nízkou hladinu. Pak se uloží druhá značka. Interval mezi těmito dvěma momenty lze následně přepočítat na vzdálenost.

Do ROS2 systému tento uzel odesílá kromě pravidelného updatu aktuální vzdálenosti také dvě další informace. Tou první je jednoduché varování o detekci překážky nacházející se přímo před robotem. Druhá zpráva pak doplňuje tu první v ohledu detekování překážek které můžou stále vést ke kolizi ale senzor je již nedetekuje.



Obrázek 4.3:

V tomto případě se jedná o překážky které zmizí ze skeneru ve vzdálenosti menší než 61cm ale ještě nejsou detekovány klasickým způsobem, který informuje o překážkách ve vzdálenosti menší než např: 20cm. Druhá zpráva tedy informuje o tom, že nějaká překážka zmizela ze radaru v této potenciálně nebezpečné vzdálenosti.

Sledování čáry

Posledním praktickým senzorem kterým adept robot disponuje je třicetný senzor na sledování čáry. Komunikace s mikrokontrolerem je realizována pomocí GPIO vstupů, na které jsou připojeny tři vývody z modulu. Každý z nich reprezentuje jeden set vysílače a senzoru.

Jednička na výstupu indikuje, že čára byla detekována. Uzel který tyto data čte je velice jednoduchý. Získává aktuální stav senzoru pomocí GPIO knihovny a tyto hodnoty následně odesílá do ROS2 topicu.

Led

Adept sada disponuje ještě několika adresovatelnými led diodami. Aby na robotu nezůstal hardware, který nelze ovládat, byl nakonec implementován i uzel k jejich řízení. Z ROS2 pohledu se jedná o klasický service server, ten přijímá příkazy s RGB barevnou hodnotou podle které nastavuje ledky. Ovládání ledek využívá modul `rpi_ws281x`. Problém s tímto modulem nastává v tom, že vyžaduje sudo oprávnění. Zde je dobré poukázat na fakt, že ROS2 jako takový nevyžaduje zvýšená oprávnění pro svůj běh. A vlastně na to není připravený, protože uzly spuštěné se zvýšenými oprávněními nedokáží komunikovat s těmi co tyto oprávnění nemají a naopak. Tento problém je nakonec vyřešen separátním skriptem, který je spuštěn jako `subproces` z ROS2 uzlu. V sudoers souboru je tomuto skriptu nastaveno automatické spouštění se zvýšenými právy a bez potřeby zadávat heslo. Jedná se o velice neelegantní řešení a vzhledem k tomu že se nejedná o jakkoli důležitou funkcionalitu je v instalačním skriptu separátně volitelná.

Rozšíření

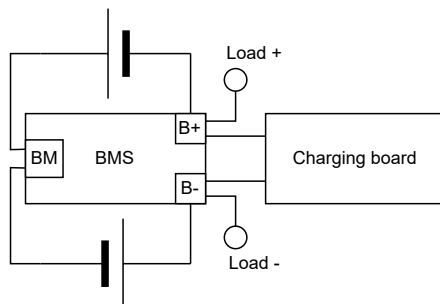
Kromě komponent které byly součástí stavebnice Adept Awr 4WD je výsledný robot rozšířený o další přídatky.

Nabíjení

V originální konfiguraci je napájení realizováno pomocí dvou sériově zapojených 18650 baterií. V tomto zapojení baterie poskytují napájení až 8V a 4A. Součástí adept kitu jsou kolébky na baterie, které je přímo připojí k zátěži. Nabíjení baterií je tedy realizováno externě. Protože je tento přístup nepohodlný, prvním rozšířením robota je přidání bms a nabíjecí desky. Nejrozšířenějším způsobem nabíjení 18650 baterií je deska s čipem TP4056. Tyto desky jsou hojně dostupné, v různých konfiguracích s různými vstupy napájení a ochranami. Problémem je, že tyto desky jsou vhodné pro nabíjení jedné 18650 baterie. Potenciálně lze použít více desek na nabíjení baterií v paralelním zapojení. Ale pro sériově zapojené baterie jsou tyto desky nevhodné. Lepší přístup je tedy přes využití Battery Management System. Jedná se o desku zajišťující ochranu baterií a obsahuje také bod pro připojení mezibodu mezi bateriemi aby mohla správně balancovat nabíjení jednotlivých baterií. V kombinaci s touto deskou se dále využije samotná nabíjecí deska, ta musí dodávat dvojnásobné napětí protože seriové zapojení napětí počítá.

Inertial Mesurement Unit - IMU

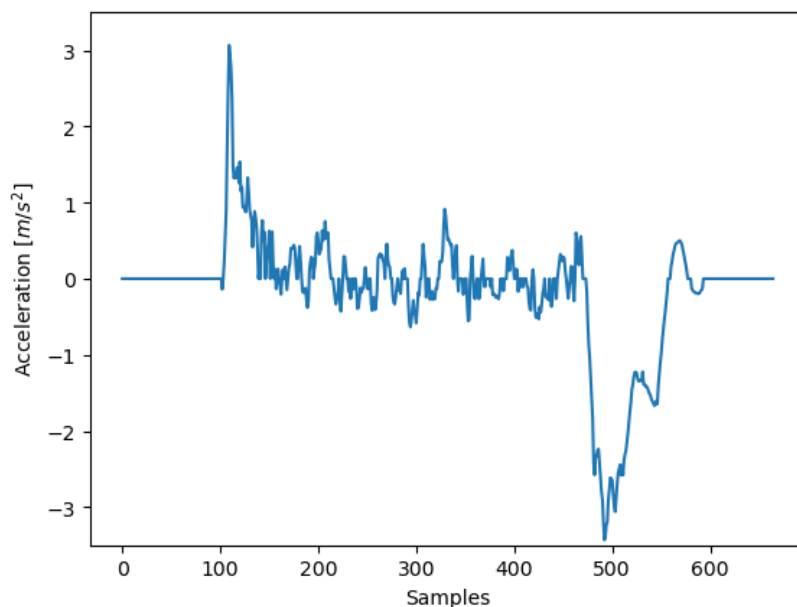
Druhým rozšířením oproti originální stavebnici je přidání IMU senzoru. Konkrétně se jedná o model MPU5060. Ten disponuje tříosým akcelerometrem a gyroskopem. Uzel na jeho ovládání, využívá knihovnu třetí strany `mpu6050-raspberrypi`. Získaná data je nejprve potřeba vyčistit. Přímou v hardwaru je implementována dolní propust, sloužící k eliminaci vibrací a jiných nechtěných vlivů. Nastavuje se zápisem do konfiguračního registru na adrese `0x1A`, což lze provést využitím knihovní funkce `set_filter_range`. Získaná data se nadále čistí softwarově. Protože se jedná o levný senzor, tak není zcela přesný a čtené hodnoty



Obrázek 4.4: Zapojení BMS a nabíjecí desky

obsahují malé odchylky i v době, kdy by měly být nula. Proto se v softwaru aplikuje offset, který posune výsledky blíže k reálným hodnotám. Dalším krokem může být získaná data průměrovat mezi více vzorky a dosáhnout tak ještě většího utlumení výkyvů.

Do ROS2 systému tento uzel nejprve odesílá aktuální hodnoty senzoru a to pomocí zpráv typu Twist. Následně také posílá varování o kolizi, to detekuje v momentě, kdy `cmd_vel` topic obsahuje příkaz pohybu, ale imu senzor čte výrazně odlišná data. Jako poslední tento uzel ještě odesílá odometrii. Odometrie udává transformaci aktuální pozice robota vůči počátku. Uzel tedy pravidelně čte hodnoty senzoru a integruje je, aby získal absolutní pozici robota. Největším problémem u získávání odometrie byl vliv gravitace na akcelerometr a fakt, že stejné zrychlení a zpomalení se ně vždy rovná. Gravitační vede na špatné hodnoty zrychlení v případě, že je robot nakloněn v nebo proti směru pohybu. Různé hodnoty akcelerace a decelerace je pravděpodobně způsobená rychlou změnou, kterou senzor nestihne vzorkovat dostatečně rychle.



Obrázek 4.5: Výsledná rychlost po zintegrování tohoto grafu je -0.1496m/s

Tento graf zobrazuje případ kdy došlo k špatnému zaznamenání zpomalení a výsledná rychlost je následně záporná. Důležité je zmínit že případy kdy dochází k špatnému měření

nejdou časté (cca každé 10). Z grafu je také vidět, že když se robot pohybuje je měření ovlivněno vibracemi motorů. Při testování se tento jev neprojevil dostatečně aby ovlivnil funkcionálnítu.

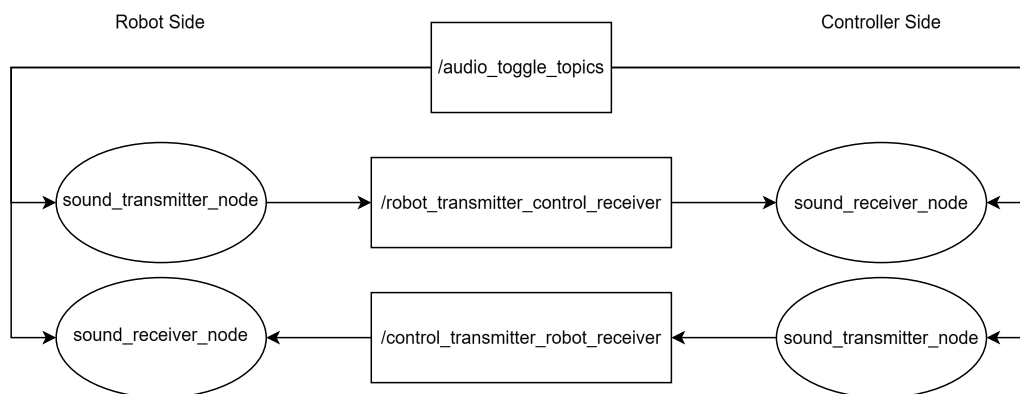
Ve finální verzi jsou tyto vlivy převážně eliminovány použitím dat z `cmd_vel` topicu a díky kterým lze zastavit změny v odometrii když robot nemá příkaz se pohybovat.

Light Detection And Ranging - Lidar

Posledním a zároveň nejzajímavějším rozšířením je lidar. Konkrétním použitým modelem je LD 19 D 300. Tento senzor slouží k měření vzdálenosti a to v celých 360 stupních okolo robota. K jeho ovládání je využit již existující uzel, upravený jen o menší změny. Výstupem jsou zprávy typu `LaserScan`.

Přenos zvuku

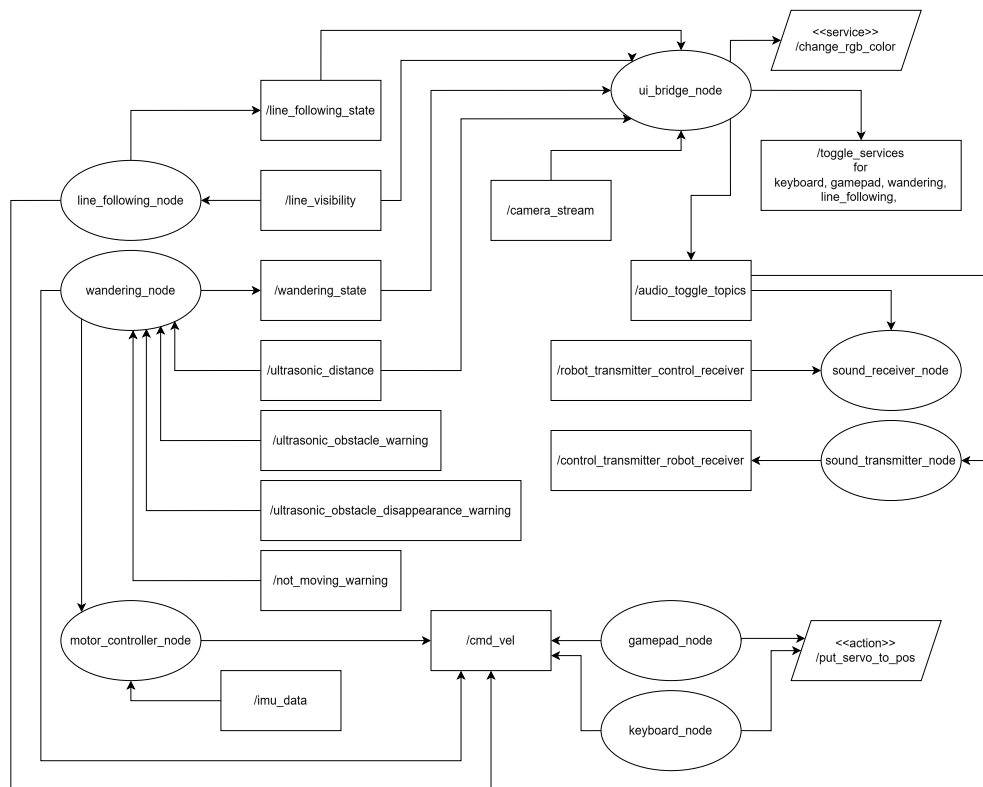
Mozkem robota je mikropočítač Raspberry pi 4 na kterém běží Ubuntu server. Jedná se tedy o téměř plnohodnotný počítač, ke kterému není problém připojit periferie jako reproduktory a mikrofon. Operační systém tak zajišťuje jakékoli ovládání připojeného hardwaru a případný uzel pro práci se zvukovými zařízeními se může zajímat čistě o záznam / přehrávání a přenos dat na další zařízení. K tomuto účelu lze využít například python modul `sounddevice`, který složí k záznamu a přehrávání zvuku. Konkrétně byly využity `Stream` třídy, pro kontinuální záznam, přehrávání a zpracování dat. Co se týče přenosu těchto dat pomocí ROS2 topicu, neexistuje standardní typ zprávy pro tento účel definovaný. Je potřeba si tedy vytvořit vlastní. Zvuková data lze přenášet pomocí pole o prvcích typu `float32`. S využitím této knihovny a `ros2` zprávy lze vytvořit dvojici uzlů, kde jeden plní roli záznamníku a odesílatele dat zatímco druhý přijímače a přehrávače. Oba uzly jsou ještě doplněny o zastavovací mechanismus.



Obrázek 4.6:

4.2 Řízení robota na vyšší úrovni

Po vyřešení všech uzlů sloužících k řízení jednotlivých komponent následuje sekce zabývající se ovládáním robota jako celku na vyšší úrovni. Uzly realizující tyto činnosti se nacházejí v balíku `controllers`.



Obrázek 4.7:

Distribučnost

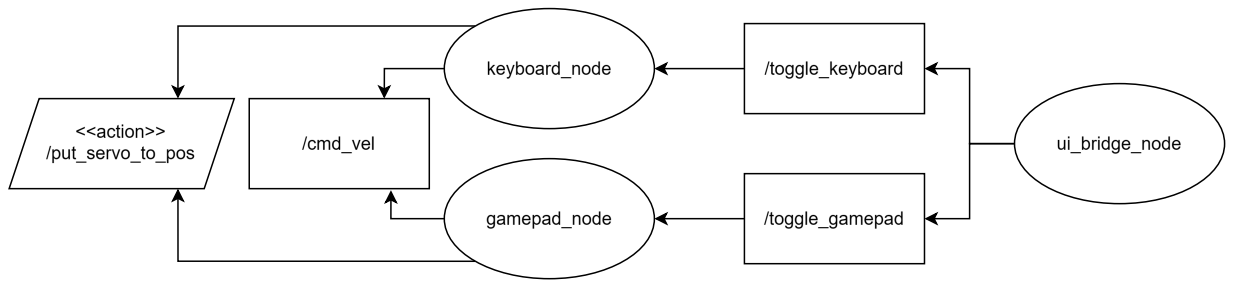
Distribučnost systému ROS2 umožňuje uzlům běžícím na různých zařízeních spolu navzájem interagovat a komunikovat. Jakékoli řídicí systémy vyžadující vyšší výpočetní výkon tak nemusí běžet přímo na robotu ale mohou být bez problému přesunuty na stacionární zařízení. Z uživatelského pohledu je distribučnost zcela v režii ROS2. Uživatel tak nemusí nic složitě nastavovat, jedinou podmínkou je, aby byly zařízení běžící uzly navzájem dosažitelná v lokální síti a měly nastavené stejné DOMAIN_ID.

Manuální řízení

Pro manuální řízení je systém vybaven dvěma uzly. První čte vstupy z klávesnice. Využívá k tomu modul `pynput`. Druhý pak s pomocí `pygame` knihovny získává vstupy ovladače. Oba uzly ovládají motory a servo pomocí jejich specifických rozhraní. Na obou uzlech se také nachází service servery pro příjem příkazů sloužících k zastavení nebo spuštění smyček které zajišťují zachytávání vstupu od uživatele.

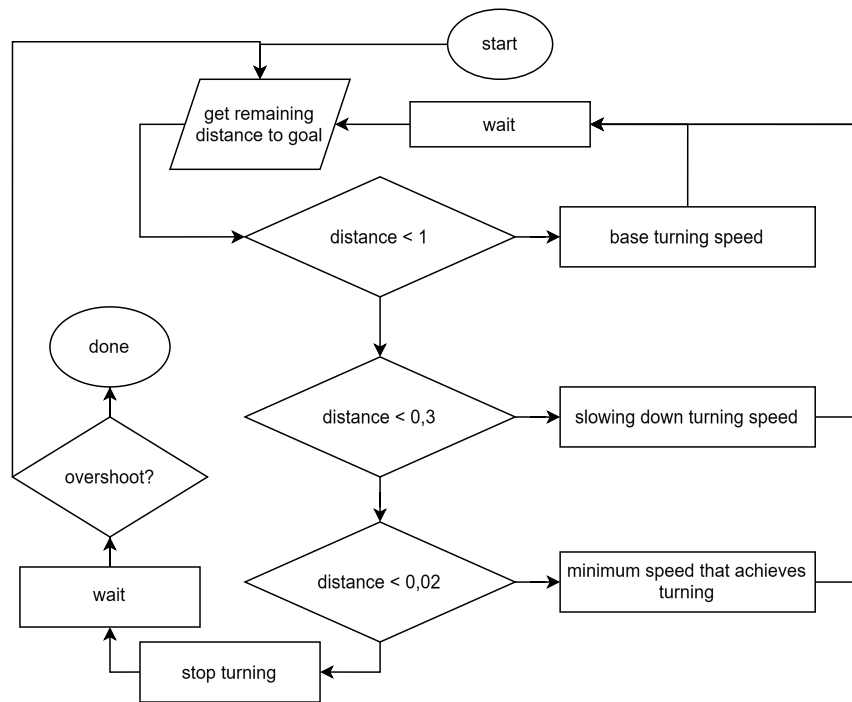
Pomocný uzel pro přesné otáčení robota

Vzhledem k tomu že použité motory nejsou opatřeny enkodéry, je, bez využití dalších senzorů, jakékoli otáčení velice nepřesné. Motorům lze samozřejmě zadat konkrétní rychlost na určitý časový interval a dostat se tak na přibližně správnou orientaci. Ale opravdu se jedná jen o přibližný úhel z důvodů externích vlivů a nepřesností. Například setrvačnost hraje velkou roli při otáčení o úhly menší než 90° nebo při vyšším využití prostředků mik-



Obrázek 4.8:

rokontroléru můžou být reakce na příkazy zpožděné. Proto byl vytvořen tento uzel, který využívá gyroskopická data z imu senzoru, aby zajistil, že se robot může v případě potřeby otáčet o přesně dané úhly. V ROS2 systému se jedná o action server. Přijímá požadavky a následně zasílá příkazy na `cmd_vel` topic. Podle hodnot získaných z imu pak postupně snižuje rychlost otáčení v závislosti na vzdálenosti od cílového úhlu.



Obrázek 4.9:

Z pohledu demonstrace ROS2 funkcionality tento uzel využívá pokročilejší funkce action serveru mezi které patří možnost předat action serveru vlastní callback funkce pro určité události. Ve většině případů se využívá pouze execute callback ve kterém by měla proběhnout většina funkcionality daného action serveru. Tento konkrétní uzel však potřebuje pro své správné fungování data z imu senzoru. Aby se však vyvolávala callback funkce daného subscriberu musí se uzel točit (spin), což je akce která neprobíhá, když dochází k vykonávání funkce. A proto tento uzel využívá dalších callback funkcí. Jednou z nich je `handle_accepted_callback`, která se vyvolá po přijmutí cíle. V tomto případě je použita jako začátek vykonávání požadavku. Další funkcí je `goal_callback`, která má za úkol rozhodnout zda příchozí požadavek bude přijmut, nebo zamítnut. Úpravou tohoto serveru

je, že pokud probíhá obsluha nějakého požadavku, budou jakékoli nově příchozí zamítnuty. To z toho důvodu, že po dokončení aktuálně prováděného úkolu bude orientace robota jiná než když byly tyto požadavky zaslány a nebudou s největší pravděpodobností již platné.

Algoritmus 13: ACTION SERVER CALLBACKS

```

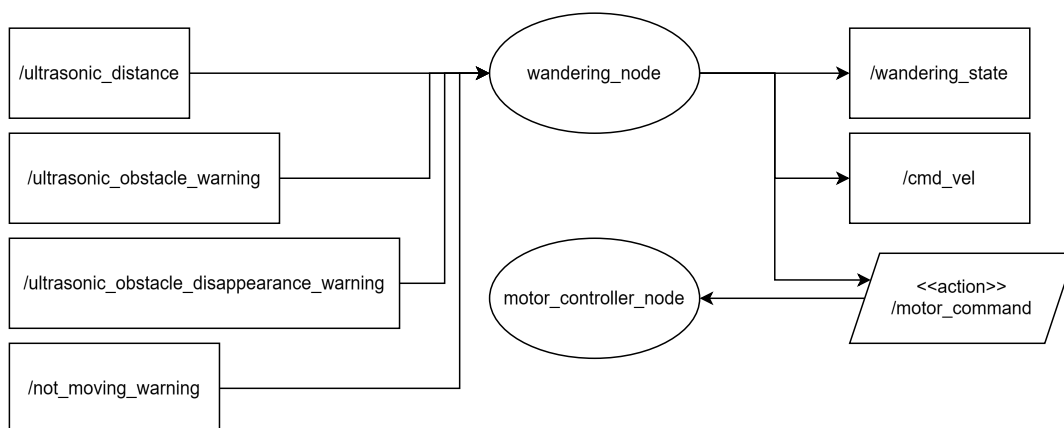
1: self.action_server = ActionServer(self, MCC, self.commands_topic,
2:   goal_callback=self.goal_callback,
3:   handle_accepted_callback=self.handle_accepted_callback,
4:   execute_callback=self.execute_callback,
5:   cancel_callback=self.cancel_callback)
6: def goal_callback(self, goal_request):
7:     if self.goal_handle is not None and self.goal_handle.is_active:
8:         return GoalResponse.REJECT
9:     else:
10:         return GoalResponse.ACCEPT

```

Bloudění

Náhodné bloudění robota po místnosti je základním autonomním pohybem. Cílem tohoto režimu je náhodný pohyb robota v prostoru, s cílem vyhýbat se překážkám.

Co se týče senzorů využívá tento režim pouze ultrazvukový senzor a imu. Ultrazvukový senzor je umístěný na přední straně robota a zvládá tedy detekovat překážky přímo před robotem. Úhel jeho záběru je přibližně 15 stupňů a nelze tedy počítat s tím že nalezne všechny překážky, typicky se jedná o překážky u kterých by došlo ke kolizi s koly robota.

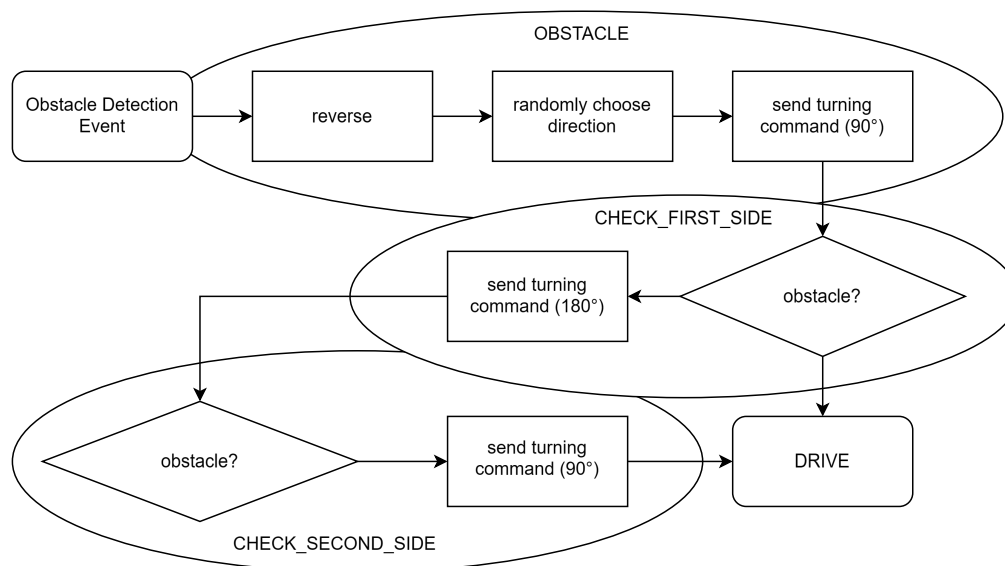


Obrázek 4.10:

Samotný kód je pak implementován využitím konečného automatu. V základu se opravdu jednalo o konečný automat, v průběhu vývoje však bylo potřeba reagovat na externí události, případně čekat na vykonání nějaké činnosti a tak finální verze se od pravidel pro konečné automaty poměrně výrazně odchýlila.

Tento režim má tři hlavní chování. Tím prvním je klasická jízda v před. Druhý pak řeší překážky nacházející se přímo před robotem. Detekování a přechod do tohoto stavu zajišťuje buď zpráva od ultrazvukového senzoru o překážce nacházející se příliš blízko, nebo

zpráva od imu senzoru varující o tom, že `cmd_vel` vyslala příkaz o pohybu vpřed avšak akcelerometr změnu nezaznamenal, což implikuje, že se robot opírá o nějakou překážku. Tyto události zajistí přechod do stavu `OBSTACLE`. Následující stavy pak realizují vyhnutí se překážce. Nejprve se vždy vycouvá zpět a následně se náhodně rozhodne strana na kterou se robot otočí. Pokud je zde volno pokračuje přechází se zpět do jízdy vpřed. Pokud ne, tak se zkontroluje stejným způsobem i druhá strana a případně se robot vrací zpět tím směrem odkud přijel.



Obrázek 4.11:

Posledním chováním je skenování překážek v 90 stupňovém úhlu před robotem. Začíná přechodem do stavu `SCAN_START`. Skenovací procedura je vyvolána buď detekováním překážky, která zmizela z ultrazvukového senzoru ale může stále vést ke kolizi, nebo se vyvolává pravidelně v případě použití `carefull` režimu. Skenování pak provede šest měření v úhlu od 45 do -45 stupňů před robotem a pokud detekuje překážku tak se otočí na $\pm 45^\circ$ a pokračuje v jízdě vpřed.

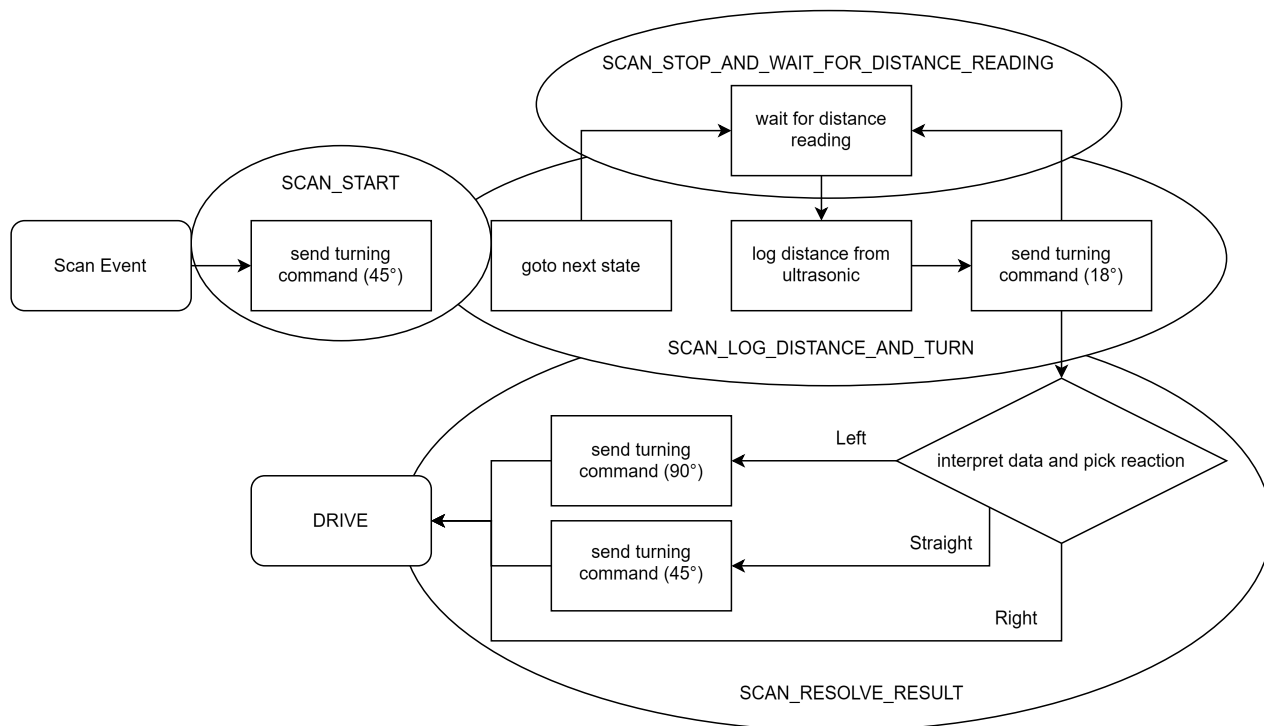
Sledování čáry

Sledování čáry je v robotice známý úkol a na vyšších úrovních se v této disciplíně pořádají závody. Avšak v základním provedení se jedná o jednoduchý úkol. Tato funkcionalita je implementována hlavně z toho důvodu, že robot disponuje senzorem, který je k sledování čáry určený.

Základem kódu je konečný automat. Senzor disponuje třemi senzory a automat tedy bude obsahovat s 2^3 stavů. Z tohoto počtu jsou dva stavy koncové a to 101, protože se jedná o nevalidní stav a 000 indikující ztrátu čáry. Mezi všemi ostatními lze navzájem přecházet. Následující stav se volí podle aktuálních hodnot senzorů.

4.3 Spouštěcí Soubory (Launch files)

Každý uzel ve výsledném systému má k sobě vytvořený spouštěcí soubor. Ve většině případů se jedná o jednoduché soubory jejichž úkolem je načtení a předání konfiguračního souboru



Obrázek 4.12:

spouštěnému uzlu. Některé parametry je vhodné změnit také při spouštění uzlu. Spouštěcí soubory které toto umožňují musí tento parametr explicitně definovat.

```
ros2 launch lauch.py param_name:=value
```

Ve složce `ros2_ws/launch` se nachází hromadné spouštěcí soubory. Ty mají za úkol využít nižších spouštěcích souborů k nastartování větší části systému zároveň. Díky této hierarchické struktuře už není potřeba řešit předávání všech parametrů a lze se zaměřit jen na to důležité. Pokud jsou volány soubory, které parametry explicitně definují, lze je v tento moment přepsat, stejně jako by to udělal uživatel z příkazové řádky. Příkladem využití této funkcionality je řídicí uzel `wandering_node`. Pokud je tento uzel spuštěn manuálně, předpokládá se, že v systému žádný jiný řídicí uzel neběží. Může tedy zahájit vykonávání hned po inicializaci, aniž by jeho příkazy kolidovaly s dalšími řídicími uzly. V případě, že je však volán jako součást hromadného spouštění, přepíše se výchozí hodnota parametru `start_right_away` a všechny řídicí uzly tak budou po inicializaci čekat na další příkaz.

```

IncludeLaunchDescription(
  launch_goal,
  launch_arguments={'start_right_away': 'false'}.items()
)

```

Jednoduché podmíněné spouštění využívá `adeept_robot_launch.py`. Rozhoduje se zde který uzel bude použit pro řízení motorů. Cíli spouštěcího souboru lze do proměnné `condition` přidat podmínku. Jedná se o speciální třídy (`Ifcondition`, `Unlesscondition`), kterým se v konstruktoru předává `true` / `false` výraz, jehož hodnotu lze získat například z parametru. Podmíněné spouštění může být i komplexnější a to kombinací s `PythonExpression`. Tato

třída je použita v `gazebo_simulation_launch.py` souboru, kde se porovnáním hodnoty parametru určuje, který svět bude spuštěn.

```
IncludeLaunchDescription(  
    launch_goal,  
    condition=IfCondition(  
        PythonExpression([  
            '''', world_select_val, '''', ' == "wandering"  
        ])  
    )  
)
```

Komplexnější spouštěcí soubory často potřebují větší kontrolu nad tím, kdy dojde ke provedení jednotlivých cílů. V případě, že je potřeba pouze opozdit provedení některého z cílů lze využít `TimerAction`. Jedná se o třídu, která spustí daný cíl až po předem stanoveném časovém intervalu. Tato funkce je využita při spouštění `ros2_control` v souboru `diffdrive_launch.py`, kde slouží k zpoždění „spawn“ ovladače až po dokončení inicializace pluginu.

```
TimerAction(  
    period=10.0,  
    actions=[  
        Node()  
    ]  
)
```

K přesnějšímu řízení pak slouží event handlers. Ty umožňují přesnější kontrolu nad tím, kdy dojde k vykonání jednotlivých cílů. Typickými událostmi jsou spuštění a ukončení procesu, případně, pokud se jedná o lifecycle uzly, také reakce na přechody do konkrétních stavů. Obsluha událostí je využita přímo v balíku gazebo simulace v souboru `gazebo_world_launch.py`. Je zde celý řetěz těchto obsluh, které postupně spustí simulaci, přeloží `xacro` model na `urdf`, „spawnou“ jej do simulace a po jejím ukončení ještě uklidí vygenerovaný `urdf`.

```
RegisterEventHandler(  
    OnProcessStart(  
        target_action=simulator,  
        on_start=convert_xacro  
    )  
)
```

4.4 Model robota a Gazebo Simulátor

Použití simulátoru při vývoji softwaru na řízení robotů je časté a užitečné. Umožňuje vyvíjet a testovat software s bez vlivů reálného světa nebo pracovat i bez fyzického přístupu k robotu. Tato práce využívá novou `ignition` větev Gazebo simulátoru.

Před tím, než lze začít využívat výhody simulátoru, je nejprve potřeba vytvořit model robota a světy ve kterých se bude pohybovat. Nativním formátem který Gazebo využívá je `sdf`. V tomto formátu jsou definovány světy.

Definice světa

Definice světů se skládá ze dvou základních částí. Nejprve se zpravidla definují obecné vlastnosti jako parametry simulace, fyzikální charakteristiky světa a pluginy. Druhou částí je pak samotná definice objektů, které se budou ve světě nacházet. Ty mohou být složené z jednoduchých tvarů, které lze definovat přímo v souboru.

```
<box>
  <size>8 0.1 0.2</size>
</box>
```

Druhou možností je využít `<mesh>` tag pro vložení komplexnějších objektů. Umožňuje totiž vložit soubor obsahující model vytvořený například v Blenderu. Poslední možností je využití oficiální fuel knihovny, která obsahuje mnoho uživateli vytvořených modelů, které lze jednoduše vložit do světa.

Definice modelu

Pro definice modelu existuje několik použitelných formátů. První možností je využít stejně jako pro světy formát `sdf`. Tímto způsobem lze zapsat definici modelu ve stejném souboru jako zbytek světa, nebo využít `<include>` tag pro vložení externího souboru. Druhým a z důvodu kompatibility s dalšími ROS2 funkcionalitami častěji používaným formátem je `urdf`, potažmo `xacro`. V této práci je model robota definován ve `xacro` formátu.

Obecná definice

Společné pro všechny zmíněné formáty je základní struktura složená z `<link>` a `<joint>` prvků. Linky reprezentují fyzické části robota jako jeho tělo či kola. Joint(kloub) pak tvoří nějaký vztah mezi linky. Jointy mohou být fixní nebo různými způsoby pohyblivé. K tomu aby model něco dělal slouží `<plugin>` tagy. Ty umožňují přiřadit částem robota funkcionality definovanou pluginem. V gazebo existuje mnoho vestavěných pluginů jako `DiffDrive` pro řízení diferenciálního pohonu nebo `JointController` pro ovládání kloubů s chováním podobným servu. Naopak pro získávání informací ze simulátoru slouží `<senzor>` tagy. Gazebo podporuje řadu různých senzorů. Typicky se jedná o komplexnější senzory jako lidar a hloubkové kamery. Naopak jednodušší senzory typu ultrazvukový, či sledování čáry nejsou v repertoáru. V implementaci bylo tedy potřeba využít těch podporovaných k simulaci těch nepodporovaných. Ultrazvukový senzor vzdálenosti je tedy ve výsledném modelu nahrazen lidar senzorem s omezeným úhlem a počtem paprsků. Modul pro sledování čáry je pak realizován pomocí kamer s rozlišením jeden pixel který je v kódu převeden na grayscale hodnotu a pomocí thresholdingu rozhodnut výsledek.

Xacro Specifika

Jak už bylo řečeno, výsledný model je definován ve formátu Xacro. Pro delší definice je tento formát velmi vhodný, protože použití čistého URDF, vede na dlouhý, repetitivní a na chyby náchylný XML kód. Jednou z nejčastěji opakovaných sekcí v URDF kódu je téměř totožná definice fyzikálních vlastností `<link>` elementu. Obsahuje určení váhy, setrvačnosti, a tvaru pro vizuální, kolizní část robota. S použitím XACRO lze tuto část definovat jako makro s několika parametry a následně jedním řádkem vkládat do složitějších definic, kde by tato část jen překážela. Díky matematice se jako součást makra vypočítají i matice setrvačnosti,

kterou je jinak potřeba počítat ručně. Podobné makro je pak také definováno pro `<joint>` elementy. Tyto základní komponenty se následně využívají v rámci definice senzorů. Hlavní soubor se díky této struktuře stává krátkým a přehledným, odkud lze jednoduše a rychle nalézt konkrétní komponenty robota a provádět na nich změny.

Algoritmus 14: MACRO WITH PARAMS

```

1: <xacro:macro name="box_link"params="name mass x y z material:=red">
2:   <link name="$name">
3:     <inertial>
4:       <mass value="$mass"/>
5:       <inertia ixx="$(1/12) * mass * (y*y+z*z)"ixy="0.0"ixz="0.0"
6:         iyy="$(1/12) * mass * (x*x+z*z)"iyz="0.0"
7:         izz="$(1/12) * mass * (x*x+y*y)"/>
8:     </inertial>
9:     <visual>
10:      <geometry>
11:        <box size="$x $y $z"/>
12:      </geometry>
13:      <material name="$material"/>
14:    </visual>
15:    <collision>
16:      <geometry>
17:        <box size="$x $y $z"/>
18:      </geometry>
19:    </collision>
20:  </link>
21: </xacro:macro>

```

Výsledný Xacro soubor je před použitím v simulátoru nejprve potřeba přeložit do URDF formátu. K tomu slouží příkaz `xacro [in.xacro] > [out.urdf]`. Modely definované v URDF se do světa „spawnují“ a to až po spuštění simulace. Slouží k tomu gazebo service jménem `/world/name/create` a příkaz `ign service`.

ROS Gazebo Bridge

Komunikaci mezi Gazebo simulátorem a zbytkem ROS2 systému zajišťuje oficiální nástroj `ros_gz_bridge`. Tento most na jedné straně interaguje s gazebo reprezentací topiců a servisů. Na druhé straně se pak tváří jako ROS2 uzel. Spouští se pomocí příkazu:

```
ros2 run ros_gz_bridge parameter_bridge /topic_name@gazebo_msg_type@ignition_msg_type
```

Pro efektivnější použití lze předat bridge uzlu config soubor s definicí více topiců které budou přemostěny.

```

- ros_topic_name: "ros_chatter"
gz_topic_name: "gz_chatter"
ros_type_name: "std_msgs/msg/String"
gz_type_name: "gz.msgs.StringMsg"
direction: IGN_TO_ROS # BIDIRECTIONAL or ROS_TO_IGN

```


Zařízení kompatibility

Po přemostění topiců mezi gazebem a ROS2 systémem bylo potřeba ještě některé z nich upravit, tak aby měly stejný formát jako ty získané z fyzikých komponent. Ve většině případů se jedná o jednoduché přemapování jmen topicu nebo změna typu zprávy.

- Kamera

Data z gazebo kamery jsou typu Image, který je pro použití na jednom zařízení zcela dostačující a nevzniká zde žádné výrazné zpoždění, ale pro zajištění kompatibility s daty posílanými z robota musí být tyto zprávy překódovány do CompressedImage formátu.

- Sledování Čáry

Jak už bylo řečeno line tracking senzor je simulován pomocí tří jednopixelových kamer. Je tedy potřeba je po přemostění do ROS2 nejprve spojit do jedné zprávy. Následně můžou být získaná RGB data převedena do grayscale zobrazení a podle výsledné hodnoty aplikovat thresholding který rozhodne výsledek o viditelnosti čáry.

- Měření vzdálenosti

Uzel pro ovládání ultrazvukového senzoru kromě čistého vysílání získaných dat musí ještě doplnit posílání varovacích zpráv.

- Servo

Příkazy pro servo přicházejí od action klientů. Dochází tedy k simulaci action serveru nejen z důvodu kompatibility ale i proto, že simulátor by dokázal měnit úhel serva v nulovém čase, což by nedávalo smysl.

- Motory

Příkazy pro ovládání motorů jsou pouze přemapovány na jiné jméno topicu.

4.5 ROS2 Control

ROS2 Control je framework implementující teorii řízení. V minulé sekci byl představen uzel který zařizuje řízení dc motorů s cílem realizovat diferenciální pohyb robota. Tvorba vlastního uzlu k tomuto účelu je zcela validní přístup, avšak nějaký podobný uzel bude potřebovat každý mobilní robot. A proto existuje ros2 control, který má za cíl zjednodušit tvorbu řídicích systémů.

4.5.1 Controller Manager

Je hlavní řídicí jednotkou, která zajišťuje navázání ovladačů(controllers) a hardwarových pluginů (drivers). Manager se spouští pomocí uzlu `ros2_control_node`. Jako první krok po spuštění potřebuje získat informace o robotu, kterého bude ovládat. Ty hledá v `robot_description` topicu. Konkrétně z něj získá seznam kloubů a ros2 control rozhraní, kterými tyto klouby disponují. Příkazové rozhraní `command_interface` slouží k posílání dat směrem k hardwaru, například nastavení rychlosti(velocity) otáčení motoru. Stavové rozhraní `state_interface` pak slouží k získávání informací z dané komponenty zpět do ros2 systému, může se jednat například o výstup enkodéru motoru. Další inicializačním krokem je zpracování konfiguračního souboru. Ten obsahuje seznam použitelných ovladačů a jejich nastavení. V tento

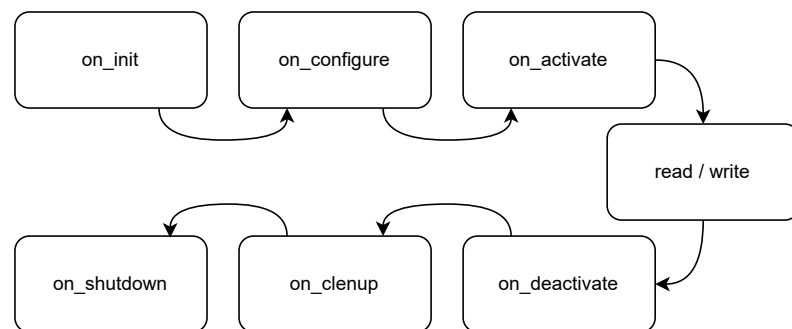
moment bude manager čekat na spuštění některého z ovladačů definovaných v konfiguračním souboru, aby mohlo dojít k jeho navázání na kompatibilní hardwarové rozhraní. Tímto krokem je vše připraveno a může započít ovládání robota. U příkladu ovládání robota s diferenciálním podvozkem je využit, již implementovaný ovladač, který zajišťuje výpočty týkající se kinematografie. Hardware plugin se pak stará pouze o ovládání motorů pomocí gpio rozhraní.

4.5.2 Model

Aby Control Manager věděl, se kterými částmi robota bude pracovat, musí být upravena `urdf` definice. Konkrétně je potřeba přidat `<ros2_control>` tag. V jeho obsahu je jako první vybrán konkrétní hardware plugin, který bude zajišťovat řízení komponent. Jsou zde také zapsány parametry, které budou při spuštění předány danému pluginu. Dále jsou vybrány klouby a jejich rozhraní se které bude tento plugin a potažmo `ros2 control` ovládat.

4.5.3 Hw Plugin

Hardware Plugins jak z názvu vyplývá jsou části kódu které budou v `ros2 control` ekosystému zajišťovat komunikaci s hardware komponentami. Narozdíl od `controllerů`, u kterých lze často využít existující implementace protože se požadované funkcionality často opakují. U hardware pluginů existuje mnoho různých komponent s různými rozhraními a, tak je často potřeba si napsat vlastní. Pro psaní pluginů se používá jazyk `C++`. Struktura jako taková je podobná lifecycle uzlům `ROS2`. Tato třída musí definovat speciální metody, které se volají v průběhu inicializace / destrukce objektu.



Obrázek 4.13: Základní postup volání lifecycle funkcí

- `on_init`
 - načtení parametrů definovaných v `urdf` modelu
 - kontrola, že klouby zadané v `urdf` odpovídají očekávání
- `on_configure` / `on_cleanup`
 - připravení a nastavení hardwaru
 - například nastavení gpio pinů, nastavení jejich směru, inicializace pwm
- `on_activate` / `on_deactivate`
 -

- `export_state_interfaces / export_command_interfaces`
 - nabídne rozhraní definované v `urdf` a inicializované v pluginu k spárování s ovladači
- `read`
 - získává hodnoty z hardwaru a ukládá je do vnitřních proměnných aby se jejich hodnoty mohly dostat k ovladačům
- `write`
 - podle hodnot z vnitřních proměnných zasílá příkazy hardwarovým komponentům

4.5.4 Controllers

Ovladače se definují pomocí konfiguračního `yaml` souboru, který následuje stejná pravidla jako konfigurace pro kterýkoli jiný `ros2` uzel. Nejprve se zadávají parametry pro samotný `controller_manager`. Zde se volí ovladače, které bude možné načíst. Dále pak následují konfigurace specifické pro jednotlivé ovladače.

4.5.5 Integrace `ros2 control` s Gazebo simulátorem

Slouží k tomu balíček `gz_ros2_control`. Struktura `ros2 control` zůstává i pro simulátor stále stejná. Hlavní změnou je použití jiného hardware pluginu, který místo ovládání fyzické komponenty zajišťuje řízení modelu v Gazebo Simulátoru. Aby však mohl ovládat simulační prostředí musí být `urdf` popis robota rozšířen o načtení dalšího Gazebo pluginu. Posledním rozdílem či zjednodušením je to, že spouštění Controller Manageru je součástí inicializace simulátoru a není tedy potřeba jej zapínat externě.

Algoritmus 15: PLUGIN LOAD

```
1: <plugin filename="control-system.so"name="GazeboSimROS2ControlPlugin»
2:   <parameters>$(find package_name)/config/controllers.yaml</parameters>
```

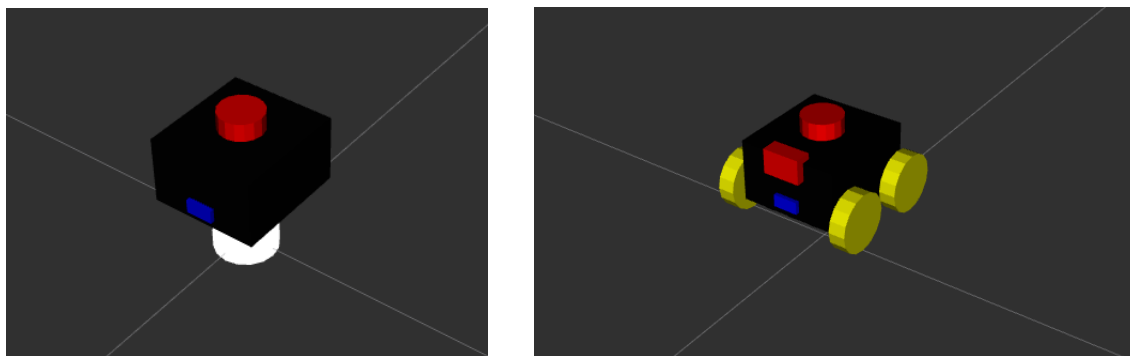
Navigace a mapování

Před zahájením mapování je nejprve potřeba vytvořit několik uzlů, které budou poskytovat informace o aktuální pozici robota, jeho struktuře a podobně.

Model

Pro správné fungování mapování je nejprve potřeba převést reálného robota na model ve formátu `urdf`. Podrobněji se o tvorbě modelu robota mluví v

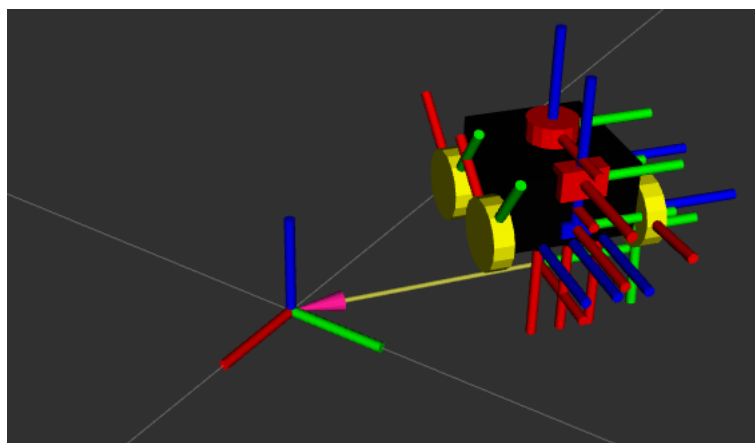
Samotná `urdf` definice však nestačí. Její informace je potřeba interpretovat a převést tak aby je dokázal využívat zbytek ROS2 systému. O to se stará uzel jménem `robot_state_publisher`. Tento uzel na vstupu vezme `urdf` definici modelu. Výstup pak posílá do dvou topiců. Nejprve odesílá geometrické transformace do `/tf` subsystému. Aby mohl posílat aktuální transformace robota poslouchá také `joint_states` topic, na kterém očekává informace o aktuálních rotacích jednotlivých kloubů. Kromě geometrických transformací pak odesílá také celý `urdf` popis na `robot_description` topic.



Obrázek 4.14: Robot description bez a s daty z joint state publisheru

Odometrie

Druhým krokem k mapování a lokalizaci je získání aktuálních souřadnic, orientace a rychlosti robota. K tomu slouží odometrie. Odometrická data lze získat několika způsoby. Jedním z často používaných a také poměrně přesných přístupů je využití dat získaných z enkodérů motorů kol a následný výpočet vzdálenosti, kterou urazily jednotlivá kola diferenciálního podvozku. Vzhledem k tomu, že použitý robot nedisponuje motory s enkodéry byl v této práci využit druhý přístup. Tím je zpracování dat získaných z imu senzoru. Integrací dat z akcelerometru a gyroskopu lze získat aktuální pozici a natočení vůči počátku. Nevýhodou tohoto přístupu je její menší přesnost a akumulace chyb vedoucí k postupnému vzdalování těchto dat od reality. Postupná akumulace chyby u odometrie vzniká u všech přístupů a ostatní části ROS2 systému realizující mapování a navigaci tak s touto skutečností počítají. V této práci tuto funkcionalitu zajišťuje uzel `imu_node`, který výsledná data odesílá jako `odom` frame do `tf` subsystému.



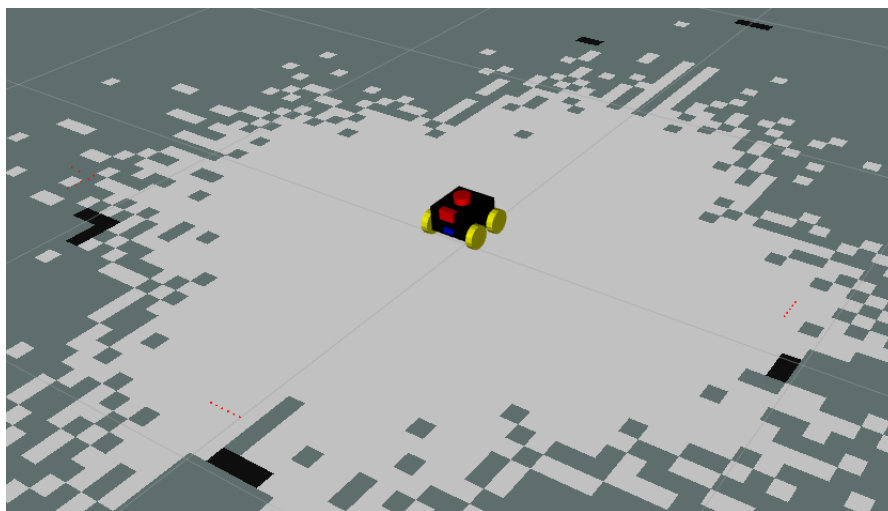
Obrázek 4.15: Zobrazení robota včetně jeho transformačních rámců v Rviz, `fixed_frame` je nastaven na `odom` a robot se tedy může pohybovat oproti počátku souřadného systému

Mapování

Posledním krokem k úspěšnému mapování je získání dat o okolním prostředí. To zajišťuje lidar senzor umístěný na robotu. Aby bylo možné data získané z lidarů správně vizualizovat

v rviz musí existovat transformace mezi rámem lidarů a base frame robota. Pokud je lidar součástí definice modelu, postará se o tuto transformaci `robot state publisher`.

Mapování jako takové pak zajišťuje perfektní knihovna `slam_toolbox`. Jedná se o komplexní soubor nástrojů souvisejících se SLAM. Tato práce využívá `async_slam_toolbox_node`. Jedná se o online, async mapování. Online znamená, že uzel pracuje nad aktuálními daty, knihovna totiž umožňuje také tvorbu mapy z před zaznamenané historie. Async pak zajišťuje zpracování vždy nejnovějších dat, což zlepšuje latenci, ale může vést k přeskočení některých scanů. Vzhledem k tomu, že slam je komplexní problém, existuje mnoho nastavitelných parametrů. Ty se předávají při spouštění pomocí konfiguračního souboru. V demo příkladech se nahází ukázkový config soubor, který byl jen s menšími modifikacemi využit i v této práci. Hlavní změnou je zvýšení rozlišení vytvářené mapy. Vývojáři knihovny předpokládají její využití v průmyslu a základní hodnoty tedy pracují s předpokladem, že robot je větší a pohybuje se ve velkých halách. Uzel pak odesílá výslednou mapu ve standardním formátu `nav_msgs/OccupancyGrid` do `/map` topicu.



Obrázek 4.16:

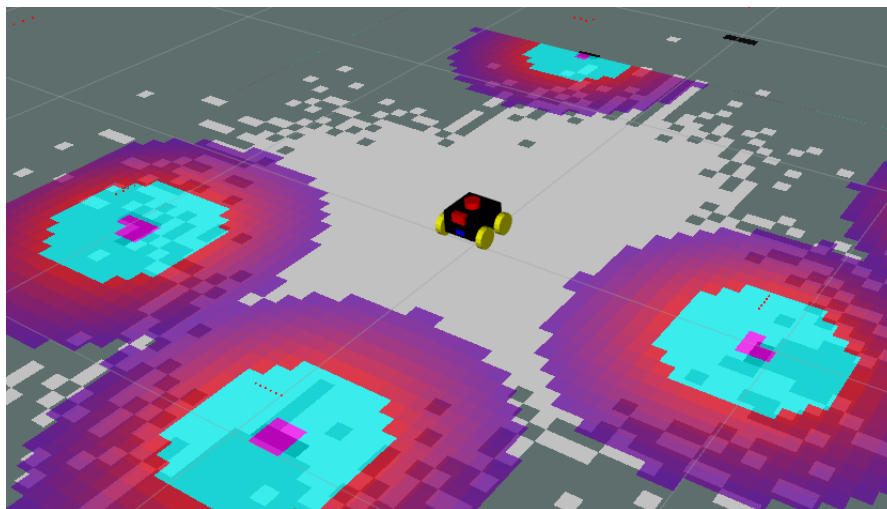
Navigace

Pro navigaci byla využita knihovna Navigation 2. Nav2 je v podstatě samostatný ROS2 systém skládající se z několika navzájem spolupracujících uzlů. Principiálně je Nav2 založen na behaviorálních stromech.

Z vnějšího pohledu uzly Nav2 poslouchají topic `/scan` (lidar data) `map` (slam mapa) a transformace z tf systému, primárně ty související s `odom` rámem. Zobrazitelným výstupem je několik costmap. Jedná se o upravenou mapu z `map` topicu obohacenou o ceny jednotlivých polí. Tyto ceny jsou používány plánovacím serverem (jeden z uzlů Nav2) k určení optimální cesty k cíli. Příkaz pro zahájení navigace je přijímán action serverem se jménem `/navigate_to_pose`.

Uživatel může ovlivnit chování Nav2 systému pomocí konfiguračního souboru. Ten je poměrně komplexní a umožňuje nastavovat velké množství parametrů a dokonce vyměňovat řídicí plugíny. V porovnání s slam konfigurací zde bylo potřeba změnit hodně parametrů. Protože použité motory nedokážou vyvinout menší rychlost než 0.2m/s bylo potřeba upravit minimální rychlosti. Stejně jako u slam konfigurace je robot menší a pohybuje se v menších

prostorách, byly proto zmenšeny inflation vzdálenosti. Ty jsou okolo překážek a určují ceny jednotlivých polí při plánování cesty.



Obrázek 4.17:

4.6 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní na straně stacionárního zařízení využívá knihovnu Qt, konkrétně její python verzi PyQt5. Rozhraní jako takové je odděleno od ostatních řídicích funkcionalit a pouze zajišťuje zobrazování informací získatelných z topiců a odesílání příkazů ostatním uzlům. Zbytek ROS2 systému je tedy plně ovladatelný z prostředí příkazové řádky. Co se týče implementace tak ROS2 i qt mají svůj vlastní execution loop, což vytváří problém, protože pokud jeden z nich neběží, tak daná část nefunguje. Jednou možností řešení je použití více procesů. To však vede na problémy se synchronizací. Lepší a také použitý přístup tedy je řídit oba cykly manuálně.

```
while controllers.user_interface.global_variables.executeEventLoop:
    rclpy.spin_once(node, timeout_sec=0.001)
    app.processEvents()
```

ROS2 část zajišťuje komunikaci se zbytkem systému. Obsahuje subscribery na topicity ze kterých volá qt funkce na zobrazení získaných dat. Kromě těch pak obsahuje také funkce sloužící k zasílání příkazů na servery či odesílání dat do topiců. Ty jsou volané z qt části. Qt část se pak stará čistě o zobrazování získaných dat nebo volání ROS části v reakci na uživatelské akce.

4.7 Instalace

Výsledný systém je komplexní a obsahuje mnoho závislostí které vyžaduje pro jeho správnou funkcionalitu.

Kapitola 5

Závěr

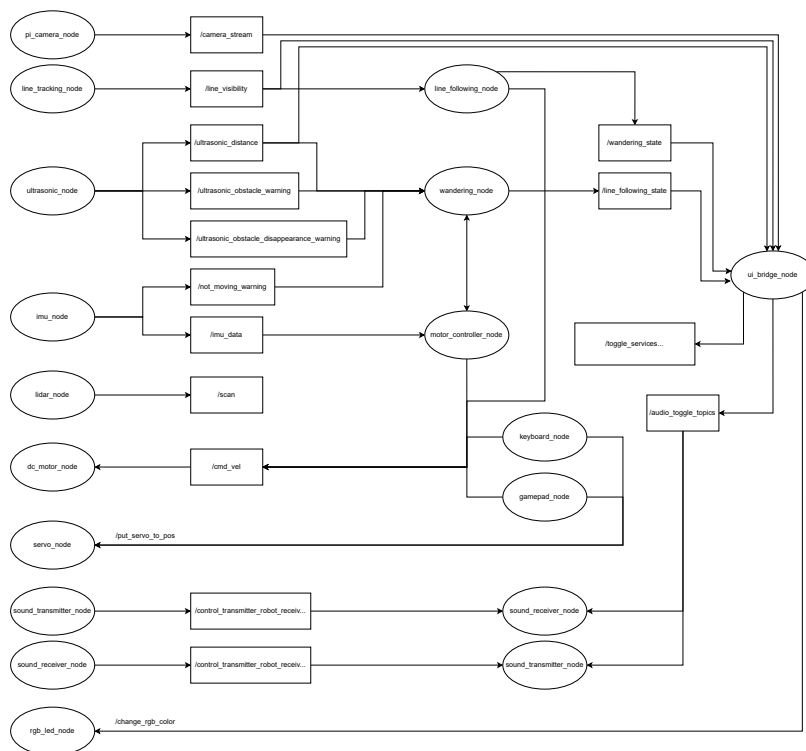
Cílem práce bylo vytvořit ROS2 systém pro ovládání robota Adept AWR 4WD a demonstrovat na něm možnosti ROS2. Tohoto cíle bylo dosaženo a implementovaný systém tak může fungovat jako ukázka možností ROS2. V rámci implementace bylo využito všech důležitých funkcionalit a konceptů používaných v ROS2. Dokumentace pak funguje jako vysvětlení jednotlivých funkcionalit případně jako rozcestník při hledání příkladu konkrétní funkcionality.

Práce pak nad rámec původního cíle demonstruje také použití dalších souvisejících nástrojů. Jedním z nich je Gazebo Simulátor, díky kterému lze jednoduše vyvíjet a testovat ROS2 uzly i bez fyzického robota. Dále pak demonstruje použití frameworku `ros2_control` pro řízení motorů robota. Nakonec pak bylo hardwarové vybavení robota rozšířeno o další senzory jako IMU a lidar, které umožnili zaměřit se na problematiku mapování a navigace. V tomto ohledu byly využity nástroje `slam_toolbox` a `navigation2`.

V dlouhodobějším horizontu by šlo implementovat rozšíření systému na multirobotickou aplikaci, kde by dva roboti navzájem komunikovali a společně vykonávali nějakou činnost.

Literatura

- [1] AL-NAIB, AHMED. *DC Motors* [online]. researchgate, květen 2019 [cit. 2023-31-12]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/332835517>.
- [2] BRAUNL, T. *Embedded Robotics: From Mobile Robots to Autonomous Vehicles with Raspberry Pi and Arduino*. Fourth edition. Springer, 2022. ISBN 9811608032.
- [3] *I2C-bus specification and user manual* [online]. um10204. NXP Semiconductors [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [4] NXP SEMICONDUCTORS. *PCA9685: 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller* [online]. 2009 [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>.
- [5] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi Camera Documentation* [online]. [cit. 2023-31-12]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>.
- [6] RICO, F. M. *A concise introduction to robot programming with ROS2*. First edition. CRC Press, 2023. ISBN 978-1-032-26465-3.
- [7] SALHUANA, M. *Sensor I2C Setup and FAQ* [online]. an4481. Freescale Semiconductor, Inc, červenec 2012 [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4481.pdf>.
- [8] SOJKA, P. et al. *ROS 2 Documentation* [online]. [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://docs.ros.org/en/rolling/index.html>.
- [9] STMICROELECTRONICS. *L298: Dual Full-Bridge Driver*. 2000 [cit. 2023-11-12].
- [10] WORLDSEMI CO., LIMITED. *WS2812 Intelligent control LED integrated light source* [online]. [cit. 2023-31-12]. Dostupné z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/553088/ETC2/WS2812/95/1/WS2812.html>.



Obrázek 1: Výsledný ROS2 systém bez slam navigace a gazeba