Politechnika
Śląska

PROJEKT INŻYNIERSKI

Budowa mapy otoczenia z wykorzystaniem robota mobilnego

Krzysztof GRĄDEK
Nr albumu: 300362

Kierunek: Automatyka i Robotyka
Specjalność: Technologie Informacyjne

PROWADZĄCY PRACĘ
dr inż. Krzysztof Jaskot
KATEDRA Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Gliwice 2024

Tytuł pracy

Budowa mapy otoczenia z wykorzystaniem robota mobilnego

Streszczenie

Projekt koncentruje się na implementacji systemu autonomicznej nawigacji robota mobilnego, z naciskiem na dwa kluczowe aspekty: tworzenie mapy otoczenia oraz realizację precyzyjnej nawigacji z punktu do punktu w zmapowanej przestrzeni wykorzystując rozwiązanie typu SLAM. Rozwiązanie opiera się na dwóch współpracujących ze sobą mikrokontrolerach - Raspberry Pi 4, który odpowiada za obsługę czujnika RPLidar A1 oraz wykonywanie algorytmów mapowania i nawigacji, oraz Arduino Nano zarządzającym silnikami z enkoderami, zapewniającymi precyzyjne sterowanie ruchem robota. Wykonana konfiguracja zrealizowana została w językach C++ oraz Python, z wykorzystaniem narzędzi z ekosystemu ROS 2 (ang. "Robot Operating System 2"), takich jak Nav2 (ang. "Navigation 2"), SLAM Toolbox (ang. "Simultaneous Localization and Mapping Toolbox") oraz ROS2 Control (ang. "Robot Operating System 2 Control").

Słowa kluczowe

Mapowanie, robot mobilny, lokalizacja, SLAM, ROS

Thesis title

Construction of an Environment Map Using a Mobile Robot

Abstract

The project focuses on implementing an autonomous mobile robot navigation system, emphasizing two key aspects: environment mapping and precise point-to-point navigation in the mapped space using SLAM type solution. The solution is based on two cooperating microcontrollers - Raspberry Pi 4, which handles the RPLidar A1 sensor and executes mapping and navigation algorithms, and Arduino Nano managing motors with encoders, providing precise robot motion control. The implemented configuration was realized using C++ and Python languages, utilizing tools from the ROS 2 (Robot Operating System 2) ecosystem, such as Nav2 (Navigation 2), SLAM Toolbox (Simultaneous Localization and Mapping Toolbox) and ROS2 Control (Robot Operating System 2 Control).

Key words

Mapping, mobile robot, localization, SLAM, ROS

Spis treści

Rozdział 1

Wstęp

Poniższy projekt obejmuje implementację systemu autonomicznej nawigacji robota mobilnego, z naciskiem na dwa kluczowe aspekty: tworzenie mapy otoczenia oraz realizację precyzyjnej nawigacji typu z punktu do punktu w zmapowanej przestrzeni. Tego typu zadania są kluczowe w dziedzinie robotyki mobilnej, umożliwiając robotom samodzielne poruszanie się w nowych nieznanych przestrzeniach. W tym rozdziale przedstawiono cel pracy, jej zakres oraz strukturę.

1.1 Wprowadzenie w problem

Jednoczesna lokalizacja i mapowanie - SLAM (ang. "Simultaneous localization and mapping") to proces, w którym robot konstruuje mapę nieznanego środowiska podczas jednoczesnej lokalizacji w tym środowisku i śledzenia swojej trajektorii poruszania się [2]. Jest to jedno z kluczowych zagadnień w robotyce mobilnej, umożliwiając robotom samodzielne poruszanie się w przestrzeni. W praktyce SLAM jest realizowany za pomocą zestawu sensorów, takich jak skanery laserowe, kamery RGB-D, czy IMU (ang. "Inertial Measurement Unit"), oraz algorytmów, które przetwarzają dane z tych sensorów w celu budowy mapy i lokalizacji robota.

1.2 Osadzenie problemu w dziedzinie

Ten projekt zalicza się do dziedziny robotyki mobilnej i systemów autonomicznych. Roboty mobilne są szeroko wykorzystywane w przemyśle, logistyce, czy badaniach naukowych. Realizacja systemu SLAM i autonomicznej nawigacji wymaga integracji wielu zaawansowanych technologii. Główne wyzwania techniczne obejmują wykorzystanie i synchronizację:

- Sensorów w tym LiDAR (ang. "Light Detection and Ranging")
- Algorytmów SLAM
- Szkieletów programistycznych dla robotów jak ROS 2 (ang. "Robot Operating System 2")
- Systemów nawigacji jak Nav2
- Systemów sterowania jak ROS2 Control
- Systemów wizualizacji i analizy danych
- Systemów komunikacji i zarządzania danymi

1.3 Cel pracy

Głównym celem pracy jest zaprojektowanie i implementacja systemu mapowania otoczenia z wykorzystaniem robota mobilnego. W ramach realizacji tego zadania przewidziano budowę platformy mobilnej, implementację systemu sterowania robotem oraz integrację niezbędnych czujników i urządzeń. Kluczowym elementem jest realizacja algorytmów SLAM, które umożliwiają jednoczesną lokalizację robota i tworzenie mapy otoczenia. Dodatkowo, system ma zapewniać możliwość nawigacji z punktu do punktu oraz sterowania manualnego.

1.4 Zakres pracy

Realizacja projektu obejmuje szereg wzajemnie powiązanych zadań. Na pierwszy etap składa się dogłębna analiza istniejących rozwiązań w dziedzinie mapowania i nawigacji robotów mobilnych, która stanowi podstawę do dalszych prac. Na tej bazie opracowany jest projekt systemu sterowania robotem, a następnie przeprowadzona jego implementacja. Kolejnym krokiem jest integracja komponentów sprzętowych i programowych w spójny system. Szczególną uwagę poświęcono implementacji algorytmów SLAM i nawigacji, które stanowią rdzeń funkcjonalności robota. Całość prac kończy seria testów i walidacja stworzonego rozwiązania.

1.5 Struktura pracy

Praca składa się z sześciu następujących rozdziałów:

- Rozdział pierwszy zawiera wstęp, w którym przedstawiono cel pracy, jej zakres oraz strukturę.
- Rozdział drugi zawiera analizę tematu, w której przedstawiono problem SLAM, analizę literatury, stan aktualny dziedziny oraz przegląd istniejących rozwiązań.
- Rozdział trzeci zawiera wymagania i narzędzia, w którym przedstawiono wymagania funkcjonalne, przypadki użycia, narzędzia oraz metodykę pracy nad projektem.
- Rozdział czwarty zawiera specyfikację użytkową, w którym przedstawiono wymagania użytkownika oraz specyfikację funkcjonalną.
- Rozdział piąty zawiera specyfikację techniczą, w którym przedstawiono podstawowe pojęcia i definicje z dziedziny robotyki mobilnej, jak i implementację zastosowanego rozwiązania.
- Rozdział szósty zawiera weryfikację i walidację, w którym przedstawiono testy i wyniki działania systemu.
- Rozdział siódmy zawiera podsumowanie, w którym przedstawiono wnioski z pracy oraz możliwości dalszego rozwoju projektu.

1.6 Wkład własny autora

W ramach pracy autor samodzielnie:

- Zaprojektował i zbudował platformę mobilną
- Zaimplementował sterowniki urządzeń
- Zintegrował komponenty sprzętowe i programowe
- Zaimplementował i dostosował algorytmy SLAM
- Przeprowadził testy i optymalizację systemu

Rozdział 2

Analiza tematu

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę problemu jednoczesnej lokalizacji i mapowania (SLAM) oraz autonomicznej nawigacji robotów mobilnych. Omówiono aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie, sformułowano szczegółowo problem badawczy oraz dokonano przeglądu dostępnych rozwiązań i algorytmów. Na podstawie tej analizy wybrano optymalne narzędzia i metody do realizacji projektu.

2.1 Osadzenie tematu w kontekście aktualnego stanu wiedzy

Problem jednoczesnej lokalizacji, mapowania oraz autonomicznej nawigacji robotów mobilnych stanowi jeden z kluczowych obszarów badań w dziedzinie robotyki. W ostatnich latach obserwuje się znaczący postęp w tej dziedzinie, głównie dzięki rozwojowi wydajnych algorytmów optymalizacji, poprawie jakości i dostępności czujników jak LiDAR, wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów oraz powstaniu zaawansowanych platform programistycznych jak ROS 2.

2.2 Szczegółowe sformułowanie problemu

Problem postawiony w niniejszej pracy obejmuje dwa główne aspekty. Pierwszy z nich to mapowanie otoczenia, które wymaga efektywnej akwizycji danych z czujników, przetwarzania chmur punktów pobranych z czujnika, estymacji pozycji robota oraz łączenia kolejnych skanów w spójną mapę. Drugi aspekt to autonomiczna nawigacja, gdzie system musi zapewniać precyzyjną lokalizację w znanej mapie, planowanie ścieżki z uwzględnieniem przeszkód oraz dokładną kontrolę ruchu robota.

2.3 Studia literaturowe

2.4 ROS 2

ROS 2 (Robot Operating System 2) to platforma programistyczna dla robotów, która umożliwia tworzenie zaawansowanych systemów robotycznych. Jest to otwarte oprogramowanie, które oferuje szereg narzędzi i bibliotek do tworzenia, testowania i wdrażania aplikacji robotycznych [**bib:ros2-Concise**]. ROS 2 jest następcą popularnego ROS, który jest szeroko stosowany w robotyce. ROS 2 oferuje wiele usprawnień i nowych funkcji, takich jak lepsza obsługa czasu rzeczywistego, wsparcie dla wielu platform sprzętowych, czy zwiększona wydajność. Dzięki temu ROS 2 jest idealnym narzędziem do tworzenia zaawansowanych systemów robotycznych, takich jak systemy SLAM i nawigacji. ROS (Robot Operating System) to nie system operacyjny zastępujący Linux lub Windows, lecz oprogramowanie posrednie zwiększające możliwości systemu w zakresie tworzenia aplikacji robotycznych. Numer 2 wskazuje, że jest to druga generacja tego middleware. Czytelnik, który zna pierwszą wersję ROS (czasami nazywaną ROS 1), znajdzie wiele podobnych koncepcji, a dla programistów ROS 1, którzy przechodzą na ROS 2, istnieje już kilka zasobów edukacyjnych. W tej pracy zakładamy brak wcześniejszej znajomości ROS. Coraz częściej będzie się zdarzać, że nauka ROS 2 będzie odbywać się bez wcześniejszej znajomości ROS 1, ponieważ istnieje coraz więcej powodów, aby uczyć się ROS 2 bezpośrednio [8].

2.5 SLAM Toolbox

SLAM Toolbox jest nowoczesnym rozwiązaniem dla ROS 2, umożliwiającym robotom tworzenie i aktualizację map 2D w czasie rzeczywistym [5]. System implementuje zaawansowaną wersję algorytmu Pose Graph SLAM, oferując kilka trybów pracy, z których skupiono się na dwóch głównych:

- **Synchroniczny - bieżący** - Przetwarzanie wszystkich otrzymanych skanów w jednym wątku na bieżąco uzyskanych danych (oferuje większą dokładność, ale mniejszą wydajność)
- **Asynchroniczny - bieżący** - Przetwarzanie najnowszego skanu z bieżąco uzyskanych danych w jednym wątku (oferuje mniejszą dokładność, ale większą wydajność)

Proces generowania mapy w trybie synchronicznym realizowany jest w następujących etapach:

- **Inicjalizacja systemu:**

  - Uruchomienie węzła SLAM Toolbox w trybie synchronicznym
  - Konfiguracja subskrypcji tematów skanów laserowych i odometrii
  - Przygotowanie publikacji transformacji map–odom i mapy

- **Akwizycja i przetwarzanie danych:**
  - Odbieranie danych z czujników (LiDAR i enkodery)
  - Generowanie obiektów PosedScan zawierających pozycję i dane ze skanowania
  - Budowa kolejki obiektów do przetworzenia

- **Konstrukcja i optymalizacja grafu:**
  - Tworzenie grafu pozycji na podstawie kolejki PosedScan
  - Korekta odometrii poprzez dopasowanie skanów laserowych
  - Detekcja zamknięć pętli w grafie
  - Optymalizacja grafu i aktualizacja pozycji robota

- **Generowanie mapy:**
  - Integracja skanów laserowych z pozycjami z grafu
  - Konstrukcja spójnej mapy otoczenia
  - Publikacja mapy w systemie ROS

Kluczowym elementem jest optymalizacja z wykorzystaniem biblioteki Ceres Solver [1]. Jest to narzędzie, które pomaga znaleźć najlepsze dopasowanie między różnymi pomiarami, minimalizując błąd średniokwadratowy. Dzięki temu SLAM Toolbox może tworzyć dokładne mapy, nawet gdy niektóre pomiary są niedokładne lub błędne.
Działa to na zasadzie iteracyjnego poprawiania oszacowań pozycji robota:

$$\min_x \frac{1}{2} \sum_i \rho_i(\|f_i(x_i)\|^2) \tag{2.1}$$

- x to pozycje robota, które chcemy znaleźć
- $f_i(x_i)$ mierzy, jak bardzo nasze oszacowanie pozycji różni się od rzeczywistych pomiarów
- ρ_i to funkcja, która pomaga ignorować błędne pomiary (działa jako filtr odrzucający "podejrzane"dane)
- Cały proces dąży do znalezienia takich pozycji robota, dla których suma wszystkich błędów jest najmniejsza

Algorytm działa iteracyjnie, wykorzystuje do tego metodę Levenberga-Marquardta, która łączy w sobie:

- Szybkość metody Gaussa-Newtona (dobre do precyzyjnych korekt)
- Stabilność metody największego spadku (pomocne przy większych korektach)

Dzięki takiemu podejściu SLAM Toolbox może tworzyć dokładne mapy, nawet gdy niektóre pomiary są niedokładne lub błędne.

2.5.1 Navigation2 (Nav2) i lokalizacja

System Navigation 2 (Nav2) stanowi kompleksową strukturę do autonomicznej nawigacji robotów w ROS 2, wykorzystującą algorytm Adaptacyjnej Lokalizacji Monte Carlo - AMCL (ang. "Adaptive Monte Carlo localization") do precyzyjnego pozycjonowania.[6] Poniżej opisano kluczowe komponenty i ich zasadę działania:

- **Lokalizacja (AMCL)** - system lokalizacji wykorzystujący filtry cząsteczkowe do określania pozycji robota działający w następujący sposób:
  - Pozycja robota reprezentowana przez zbiór hipotez (cząstek)
  - Każda cząstka reprezentuje możliwą pozycję (x, y, θ)
  - Aktualizacja wag cząstek poprzez porównanie skanów z mapą
  - Liczba cząstek adaptowana do poziomu niepewności pozycji
- **System nawigacji (Nav2)** - kompleksowy system zapewniający autonomiczną nawigację robotów mobilnych w ROS 2, oparty na drzewie zachowań (ang. "Behavior Tree"). System integruje szereg modułów odpowiedzialnych za planowanie ścieżki, unikanie przeszkód i kontrolę ruchu. Planer globalny wykorzystuje algorytmy takie jak Dijkstra czy A* do wyznaczenia optymalnej trasy do celu, uwzględniając statyczną mapę środowiska i znane przeszkody. Lokalny planer DWB (ang. "Dynamic Window Approach") odpowiada za bezpieczną realizację zaplanowanej ścieżki, dynamicznie reagując na pojawiające się przeszkody poprzez modyfikację prędkości i trajektorii ruchu.

  Do reprezentacji przestrzeni roboczej i przeszkód system wykorzystuje dwuwymiarową mapę kosztów (ang. "Costmap 2D"), która jest aktualizowana na podstawie danych z czujników. Moduł kontroli i odzyskiwania (ang. "Recovery") zapewnia reakcję na sytuacje problematyczne, takie jak zaklinowanie czy niemożność znalezienia ścieżki, poprzez wykonanie sekwencji zachowań naprawczych.

Zasada działania całego systemu opiera się na ciągłej interakcji między komponentami:

1. AMCL aktualizuje pozycję robota na podstawie:
    - Odometrii z enkoderów (predykcja ruchu)
    - Dopasowania skanów LiDAR do mapy (korekcja)
    - Adaptacyjnego próbkowania cząstek
2. Nav2 wykorzystuje estymowaną pozycję do:
    - Planowania globalnej ścieżki do celu
    - Lokalnej optymalizacji trajektorii
    - Unikania przeszkód w czasie rzeczywistym

3. System monitoruje wykonanie planu i w razie potrzeby:
    - Przeplanowuje ścieżkę przy wykryciu przeszkód
    - Aktywuje zachowania awaryjne
    - Dostosowuje parametry sterowania

Integracja AMCL z Nav2 zapewnia stabilną nawigację nawet w dynamicznym środowisku, a adaptacyjne mechanizmy obu komponentów pozwalają na optymalne wykorzystanie dostępnych zasobów obliczeniowych.

2.5.2 ROS2 Control i sterowanie napędami

ROS2 Control dostarcza infrastrukturę do sterowania robotami poprzez standardowy interfejs.[3] Główne komponenty systemu to:

- **Controller Manager** - zarządza cyklem życia kontrolerów (inicjalizacja, uruchomienie, zatrzymanie)
- **Controllers** - implementują logikę sterowania (np. diff_drive_controller)
- **Hardware Interface** - zapewnia interfejs sprzętowy do urządzeń (silniki, enkodery)

Pakiet `diffdrive_arduino`[7] implementuje interfejs sprzętowy dla robota z napędem różnicowym sterowanego przez Arduino. Realizuje:

- Obsługę silników poprzez PWM (kontroler silników - L298N)
- Odczyt enkoderów do obliczania odometrii
- Komunikację przez port szeregowy z Raspberry Pi
- Transformację odom→base_link

Główne węzły systemu:

- **/controller_manager** - zarządza kontrolerami
- **/diff_drive_controller** - kontroler napędu różnicowego:
    - Przyjmuje komendy prędkości (cmd_vel)
    - Generuje odometrię (odom)
    - Kontroluje silniki poprzez interfejs sprzętowy
- **/joint_state_broadcaster** - publikuje stan przegubów

Interfejs ROS2:

- Wejście: cmd_vel (geometry_msgs/Twist)
- Wyjście: odom (nav_msgs/Odometry)
- Konfiguracja w pliku .yaml:
  - Parametry regulatora PID:
    - Współczynnik proporcjonalny (Kp) - wpływa na szybkość reakcji
    - Współczynnik całkowania (Ki) - eliminuje uchyb ustalony
    - Współczynnik różniczkowania (Kd) - tłumi oscylacje
  - Limity prędkości
  - Właściwości robota (rozstaw kół, promień)

2.6 Wybór rozwiązań

Na podstawie analizy dostępnych narzędzi, w projekcie zdecydowano się na wykorzystanie SLAM Toolbox do mapowania, AMCL do lokalizacji podczas nawigacji, Nav2 do planowania ścieżki i kontroli ruchu oraz ROS2 Control z DiffDrive Arduino do sterowania napędami. Wybór ten podyktowany jest stabilnością rozwiązań, oraz dobrą integracją komponentów w ekosystemie ROS 2 oraz aktywnym wsparciem społeczności i dostępnością dokumentacji.

Rozdział 3

Wymagania i narzędzia

W niniejszym rozdziale przedstawiono wymagania funkcjonalne systemu, przypadki użycia w formie diagramu UML, szczegółową specyfikację wykorzystanych komponentów sprzętowych oraz metodykę i etapy realizacji projektu.

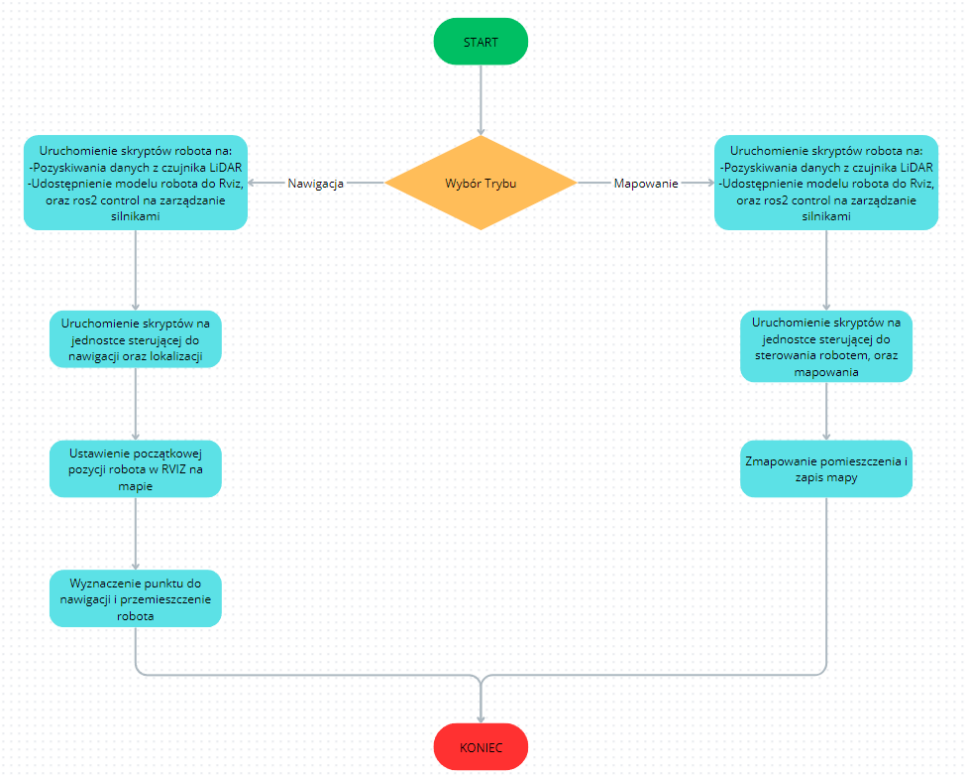
3.1 Wymagania funkcjonalne

System powinien realizować następujące funkcje:

- Zdalne sterowanie robotem poprzez klawiaturę (teleop_twist_keyboard [4]) w celu eksploracji i mapowania otoczenia
- Tworzenie i zapisywanie mapy otoczenia w czasie rzeczywistym przy użyciu algorytmu SLAM
- Lokalizacja robota na zapisanej mapie z wykorzystaniem algorytmu AMCL
- Autonomiczna nawigacja do wyznaczonych punktów na mapie z omijaniem przeszkód
- Planowanie i optymalizacja ścieżki przejazdu

3.2 Przypadki użycia

Na rysunku ?? przedstawiono diagram przypadków użycia systemu. System umożliwia użytkownikowi zdalne sterowanie robotem, tworzenie mapy otoczenia, lokalizację robota na mapie oraz autonomiczną nawigację do wyznaczonych punktów. Dodatkowo, system pozwala na zapisywanie i odczytywanie mapy oraz konfigurację parametrów sterowania.



Rysunek 3.1: Diagram przypadków użycia systemu

3.3 Specyfikacja komponentów

3.3.1 Jednostki sterujące

- Raspberry Pi 4 - główny komputer zarządzający robotem:
  - System operacyjny Ubuntu 22.04
  - ROS 2 Humble
  - Komunikacja przez SSH
- Arduino Nano - sterownik silników:
  - Obsługa enkoderów
  - Komunikacja szeregowa z Raspberry Pi

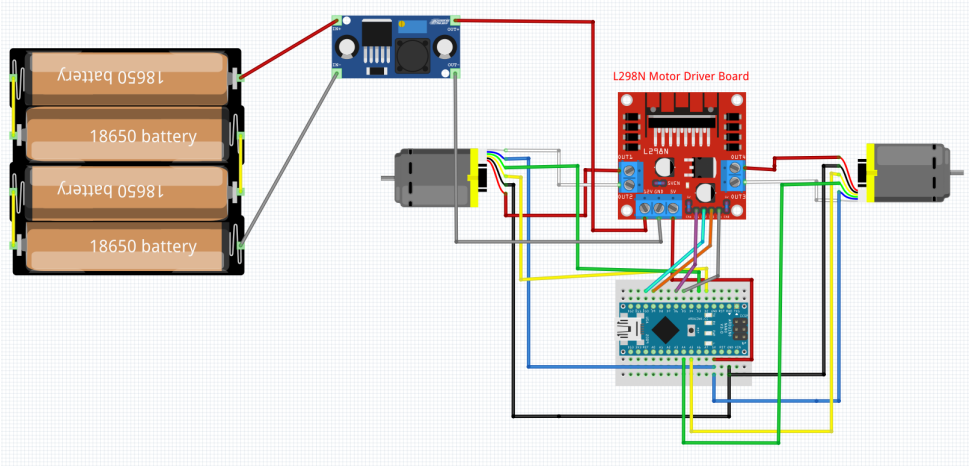
3.3.2 Napęd

- 2x silnik DC 12V 240RPM z metalową przekładnią
- Wbudowane enkodery magnetyczne Halla
- Sterownik L298N - dwukanałowy mostek H

3.3.3 Zasilanie

- 6x akumulatory Li-ion 18650:
  - 4 ogniwa (2S2P) dla silników
  - 2 ogniwa (2S) dla elektroniki
- 2x przetwornica step-down:
  - 12V dla silników
  - 5V dla Raspberry Pi

3.4 Sposób połączenia silników z Arduino i L298N



Rysunek 3.2: Schemat połączenia silników z Arduino i L298N

Na zaprezentowanym schemacie (rys. **??**) przedstawiono sposób połączenia silników z Arduino i sterownikiem L298N. Silniki DC z enkoderami są zasilane z akumulatorów Li-ion, a sterowane przez Arduino Nano za pomocą sterownika L298N. Enkodery są podłączone do Arduino, które odczytuje impulsy i oblicza prędkość i położenie robota. Komunikacja między Arduino a Raspberry Pi odbywa się przez port szeregowy, co umożliwia przesyłanie danych o prędkości i położeniu robota.

3.5 Metodyka i etapy realizacji

3.5.1 Etap 1: Przygotowanie platformy sprzętowej

- Instalacja systemu Ubuntu 22.04 na Raspberry Pi
- Konfiguracja połączenia SSH
- Instalacja ROS 2 Humble

3.5.2 Etap 2: Implementacja sterowania napędem

- Podłączenie silników do sterownika L298N
- Programowanie Arduino - obsługa silników i enkoderów
- Implementacja komunikacji szeregowej z Raspberry Pi

3.5.3 Etap 3: Integracja sensorów

- Montaż i konfiguracja LiDAR-a
- Kalibracja czujników
- Opracowanie układu mechanicznego i obudowy

3.5.4 Etap 4: Implementacja oprogramowania

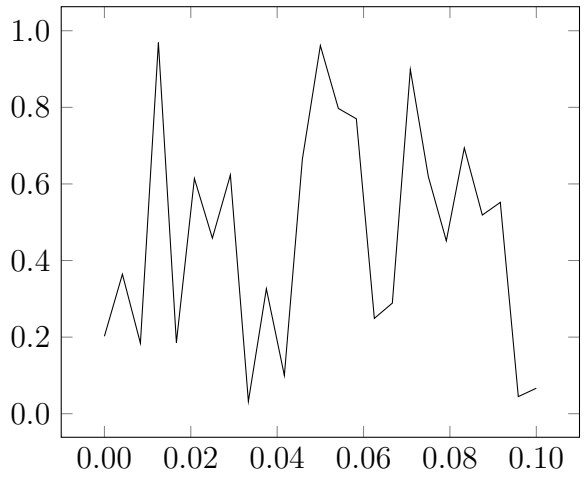
- Konfiguracja pakietów ROS 2:
  - SLAM Toolbox do mapowania
  - Nav2 do nawigacji
  - AMCL do lokalizacji
  - ROS2 Control do sterowania napędem
- Integracja i testy systemu

Rozdział 4

[specyfikacja użytkowa]

Jeśli „Specyfikacja zewnętrzna”:

- wymagania sprzętowe i programowe
- sposób instalacji
- sposób aktywacji
- kategorie użytkowników
- sposób obsługi
- administracja systemem
- kwestie bezpieczeństwa
- przykład działania
- scenariusze korzystania z systemu (ilustrowane zrzutami z ekranu lub generowanymi dokumentami)



Rysunek 4.1: Podpis rysunku po rysunkiem.

Rozdział 5

[Specyfikacja techniczna]

Jeśli „Specyfikacja wewnętrzna”:

- przedstawienie idei
- architektura systemu
- opis struktur danych (i organizacji baz danych)
- komponenty, moduły, biblioteki, przegląd ważniejszych klas (jeśli występują)
- przegląd ważniejszych algorytmów (jeśli występują)
- szczegóły implementacji wybranych fragmentów, zastosowane wzorce projektowe
- diagramy UML

Krótka wstawka kodu w linii tekstu jest możliwa, np. `int a;` (biblioteka `listings`). Dłuższe fragmenty lepiej jest umieszczać jako rysunek, np. kod na rys **??**, a naprawdę długie fragmenty – w załączniku.

```
1  class test : public basic
2  {
3      public:
4        test (int a);
5        friend std::ostream operator<<(std::ostream & s,
6                                       const test & t);
7      protected:
8        int _a;
9
10 };
```

Rysunek 5.1: Pseudokod w `listings`.

Rozdział 6

Weryfikacja i walidacja

- sposób testowania w ramach pracy (np. odniesienie do modelu V)
- organizacja eksperymentów
- przypadki testowe zakres testowania (pełny/niepełny)
- wykryte i usunięte błędy
- opcjonalnie wyniki badań eksperymentalnych

Tabela 6.1: Nagłówek tabeli jest nad tabelą.

	metoda						
			alg. 3			alg. 4, $\gamma = 2$	
ζ	alg. 1	alg. 2	$\alpha = 1.5$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\beta = 0.1$	$\beta = -0.1$
0	8.3250	1.45305	7.5791	14.8517	20.0028	1.16396	1.1365
5	0.6111	2.27126	6.9952	13.8560	18.6064	1.18659	1.1630
10	11.6126	2.69218	6.2520	12.5202	16.8278	1.23180	1.2045
15	0.5665	2.95046	5.7753	11.4588	15.4837	1.25131	1.2614
20	15.8728	3.07225	5.3071	10.3935	13.8738	1.25307	1.2217
25	0.9791	3.19034	5.4575	9.9533	13.0721	1.27104	1.2640
30	2.0228	3.27474	5.7461	9.7164	12.2637	1.33404	1.3209
35	13.4210	3.36086	6.6735	10.0442	12.0270	1.35385	1.3059
40	13.2226	3.36420	7.7248	10.4495	12.0379	1.34919	1.2768
45	12.8445	3.47436	8.5539	10.8552	12.2773	1.42303	1.4362
50	12.9245	3.58228	9.2702	11.2183	12.3990	1.40922	1.3724

Rozdział 7

Podsumowanie i wnioski

- uzyskane wyniki w świetle postawionych celów i zdefiniowanych wyżej wymagań
- kierunki ewentualnych danych prac (rozbudowa funkcjonalna . . .)
- problemy napotkane w trakcie pracy

Bibliografia

[1] Sameer Agarwal, Keir Mierle i The Ceres Solver Team. *Ceres Solver*. Wer. 2.2. Paź. 2023. URL: https://github.com/ceres-solver/ceres-solver.

[2] Luis Bermudez. *Medium - Overview of SLAM*. 2024. URL: https://medium.com/machinevision/overview-of-slam-50b7f49903b7 (term. wiz. 17. 04. 2024).

[3] Bence Magyar Christoph Fröhlich Denis Stogl i Sai Kishor Kothakota. *ros2 control*. 2024. URL: https://control.ros.org/humble/index.html (term. wiz. 01. 12. 2024).

[4] Graylin Trevor Jay. *Teleop Twist Keyboard*. 2015. URL: https://wiki.ros.org/teleop_twist_keyboard (term. wiz. 22. 01. 2015).

[5] Steve Macenski. *ROS.org - slam toolbox*. 2021. URL: https://wiki.ros.org/slam_toolbox (term. wiz. 16. 12. 2021).

[6] Steve Macenski, Francisco Martin, Ruffin White i Jonatan Gines Clavero. *The Marathon 2: A Navigation System*. 2020. URL: http://dx.doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341207 (term. wiz. 03. 10. 2020).

[7] Josh Newans. *ROS.org - diffdrive arduino*. 2020. URL: https://wiki.ros.org/diffdrive_arduino (term. wiz. 08. 12. 2020).

[8] Francisco Martin Rico. *A Concise Introduction to Robot Programming with ROS2*. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor Francis, 2022. ISBN: 1032264659.

Dodatki

Spis skrótów i symboli

SLAM	jednoczesna lokalizacja i mapowanie (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*)
LiDAR	urządzenie wykonujące wykrywanie światła i określanie odległości (ang. *Light Detection and Ranging*)
IMU	inercyjna jednostka pomiarowa (ang. *Inertial Measurement Unit*)
RGB-D	kamera rejestrująca obraz RGB oraz informację o głębi (ang. *RGB-Depth*)
Nav2	system nawigacji dla ROS 2 (ang. *Navigation 2*)
ROS	system operacyjny dla robotów (ang. *Robot Operating System*)
ROS2 Control	system kontroli robotów dla ROS 2 (ang. *Robot Operating System 2 Control*)
SLAM Toolbox	zestaw narzędzi do jednoczesnej lokalizacji i mapowania (ang. *Simultaneous Localization and Mapping Toolbox*)

Źródła

Jeżeli w pracy konieczne jest umieszczenie długich fragmentów kodu źródłowego, należy je przenieść w to miejsce.

```
1 if (_nClusters < 1)
2     throw std::string ("unknown number of clusters");
3 if (_nIterations < 1 and _epsilon < 0)
4     throw std::string ("You should set a maximal number of
          iteration or minimal difference — epsilon.");
5 if (_nIterations > 0 and _epsilon > 0)
6     throw std::string ("Both number of iterations and minimal
          epsilon set — you should set either number of iterations
          or minimal epsilon.");
```

Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy

W systemie do pracy dołączono dodatkowe pliki zawierające:

- źródła programu,
- dane testowe,
- film pokazujący działanie opracowanego oprogramowania lub zaprojektowanego i wykonanego urządzenia,
- itp.

Spis rysunków

Spis tabel