



**Politechnika
Śląska**

PROJEKT INŻYNIERSKI

Budowa mapy otoczenia z wykorzystaniem robota mobilnego

Krzysztof GRADEK

Nr albumu: 300362

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Technologie Informatyczne

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

1	Wstęp	1
1.1	Wprowadzenie w problem	1
1.2	Osadzenie problemu w dziedzinie	2
1.3	Cel pracy	2
1.4	Zakres pracy	2
1.5	Struktura pracy	3
1.6	Wkład własny autora	3
2	Analiza tematu	5
2.1	Osadzenie tematu w kontekście aktualnego stanu wiedzy	5
2.2	Szczegółowe sformułowanie problemu	5
2.3	Studia literaturowe	6
2.4	ROS 2	6
2.5	SLAM Toolbox	7
2.5.1	Navigation2 (Nav2) i lokalizacja	8
2.5.2	ROS2 Control i sterowanie napędami	8
2.6	Wybór rozwiązań	8
3	Wymagania i narzędzia	9
3.1	Wymagania funkcjonalne	9
3.2	Przypadki użycia	10
3.3	Specyfikacja komponentów	11
3.3.1	Jednostki sterujące	11
3.3.2	Napęd	12
3.3.3	Zasilanie	13
3.4	Sposób połączenia silników z Arduino i L298N	14
3.5	Metodyka i etapy realizacji	15
3.5.1	Etap 1: Przygotowanie platformy sprzętowej	15
3.5.2	Etap 2: Implementacja sterowania napędem	15
3.5.3	Etap 3: Integracja sensorów	15
3.5.4	Etap 4: Implementacja oprogramowania	15

4	[specyfikacja użytkowa]	17
5	[Specyfikacja techniczna]	19
6	Weryfikacja i walidacja	21
7	Podsumowanie i wnioski	23
	Bibliografia	25
	Spis skrótów i symboli	29
	Źródła	31
	Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy	33
	Spis rysunków	35
	Spis tabel	37

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 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 [1]. 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
- Platform 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, osadzenie go w kontekście aktualnego stanu wiedzy, analizę literatury, stan aktualny dziedziny oraz uzasadnienie wyboru rozwiązania.
- Rozdział trzeci zawiera wymagania i narzędzia, w którym opisano wymagania funkcjonalne, przypadki użycia, specyfikację komponentów, sposób połączenia sterowania i metodykę wraz z etapami realizacji projektu.
- Rozdział czwarty zawiera specyfikację użytkową, w którym przedstawiono wymagania użytkownika oraz specyfikację funkcjonalną.
- Rozdział piąty zawiera specyfikację techniczną, 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 algorytm 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.

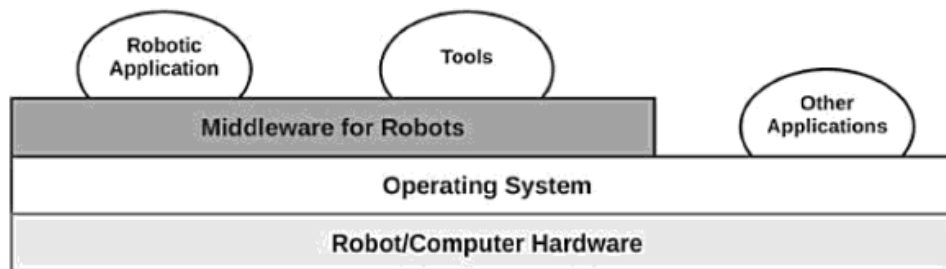
2.2 Szczegółowe sformułowanie problemu

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

ROS2 (ang. "Robotic operation system 2") to platforma programistyczna dla robotów będąca oprogramowaniem pośrednim (ang. "middleware"), czyli warstwą programową pomiędzy systemem operacyjnym, a aplikacjami użytkownika do wykonywania oprogramowania aplikacji w domenie robota [9]. Na poniższej ilustracji przedstawiono położenie takiego pośrednika.

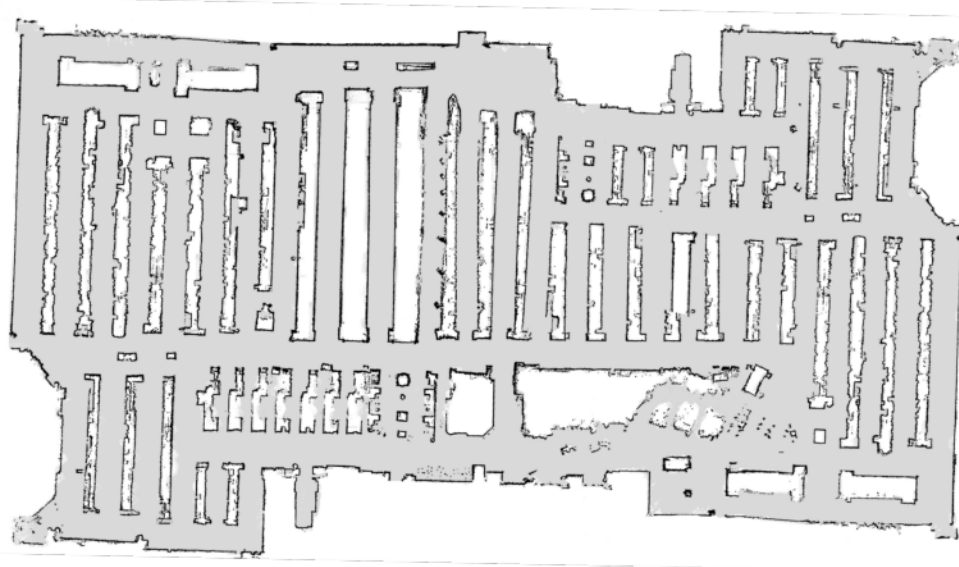


Rysunek 2.1: Reprezentacja pośrednika w systemie robota

Zasadniczo ROS 2 to otwartoźródłowe oprogramowanie bazujące na usłudze dystrybucji danych - DDS (ang. "Data Distribution Service"), które dostarcza ustandaryzowane narzędzia do organizacji kodu aplikacji w modularne pakiety, zapewniania współbieżnego wykonania kodu na wiele dostępnych plików wykonywalnych, oraz komunikację między tymi modułami podczas równoległego uruchomienia w systemie robota.[5]

2.5 SLAM Toolbox

SLAM Toolbox to zestaw narzędzi i rozwiązań do tworzenia map 2D w czasie rzeczywistym, stworzone przez Steve'a Mencia. Stosowane algorytmy w przeszłości to np. GMapping, Karto, Cartographer oraz Hector, jednakże prawie żaden z nich nie potrafił tworzyć map w czasie rzeczywistym, jedynie Cartographer stworzony przez Google miał takie możliwości, lecz przestał być on wspierany. [6] Zastosowanie SLAM Toolbox pozwala na tworzenie map w czasie rzeczywistym obszarów, do nawet 24 000 m² przez niewykwalifikowanych użytkowników. Przykład działania SLAM Toolbox przedstawiono na rysunku poniżej.



Rysunek 2.2: Mapa sklepu utworzona za pomocą SLAM Toolbox

SLAM Toolbox oferuje 3 główne tryby pracy:

- **Mapowanie synchroniczne** - Ten tryb pozwala na mapowanie i lokalizację w przestrzeni zachowując dane poprzednich pomiarów. Pozwala to na większą dokładność mapy kosztem szybkości i odporności na przerwania.
- **Mapowanie asynchroniczne** - W tym trybie mapowanie i lokalizacja odbywają się wyłącznie na podstawie aktualnych pomiarów gdy ostatnie pomiary zakończą się i zostanie spełnione kryterium dokładności. Pozwala to na szybsze i mniej podatne na przerwania mapowanie kosztem jakości.
- **Lokalizacja** - W tym trybie robot dopasowuje aktualne pomiary do istniejącej mapy w celu określenia swojej pozycji. System tworzy tymczasowe punkty odniesienia z nowych pomiarów, które są używane do precyzyjnej lokalizacji. Po określonym czasie te tymczasowe punkty są usuwane, przywracając oryginalną mapę. Tryb ten może również działać bez wcześniejszej mapy, wykorzystując tylko lokalne pomiary do nawigacji.

2.5.1 Navigation2 (Nav2) i lokalizacja

Nav2 jest to pakiet narzędzi do nawigacji robotów mobilnych w ROS 2. Zawiera on zestaw algorytmów do tworzenia modeli środowiska z sensorów, dynamicznego planowania ścieżki, obliczania prędkości silników i omijania przeszkód. Pakiet wykorzystuje drzewa zachowań (ang. "Behavior Trees") do definiowania zachowań robota, przez implementację wielu niezależnych zadań. Niektóre z nich odpowiadają za np. obliczanie trasy do celu, inne za naprawę błędów, a jeszcze inne za omijanie przeszkód. Dzięki komunikacji między tymi zadaniami, robot jest w stanie wykonywać skomplikowane zadania nawigacyjne. [7]

Do lokalizacji robota na mapie można wykorzystać wcześniej opisany SLAM Toolbox, jednak w pakiecie Nav2 dostępny jest również pakiet AMCL (ang. "Adaptive Monte Carlo Localization"), który pozwala na lokalizację robota na mapie z wykorzystaniem filtru cząsteczkowego. Algorytm ten polega na generowaniu losowych próbek (cząsteczek) reprezentujących możliwe położenia robota, a następnie porównywaniu ich z pomiarami z czujników. Cząsteczki, które najlepiej pasują do pomiarów są wybierane, a reszta jest odrzucana. W ten sposób algorytm estymuje pozycję robota na mapie. [3]

2.5.2 ROS2 Control i sterowanie napędami

ROS2 Control to platforma do sterowania, zarządzania i komunikacji pomiędzy urządzeniami w robotach z oprogramowaniem. [2]. Dzięki takiemu rozwiązaniu można w łatwy sposób zarządzać silnikami, enkoderami, czy innymi urządzeniami w robocie. Dzięki temu można wykorzystać np. pakiet `diffdrive_arduino`, do sterowania robotem z napędem różnicowym za pomocą Arduino. Pakiet ten pozwala również na sterowanie prędkością silników, odczyt enkoderów, obliczanie odometrii oraz transformację między układem odometrii a układem bazowym. [8]

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.

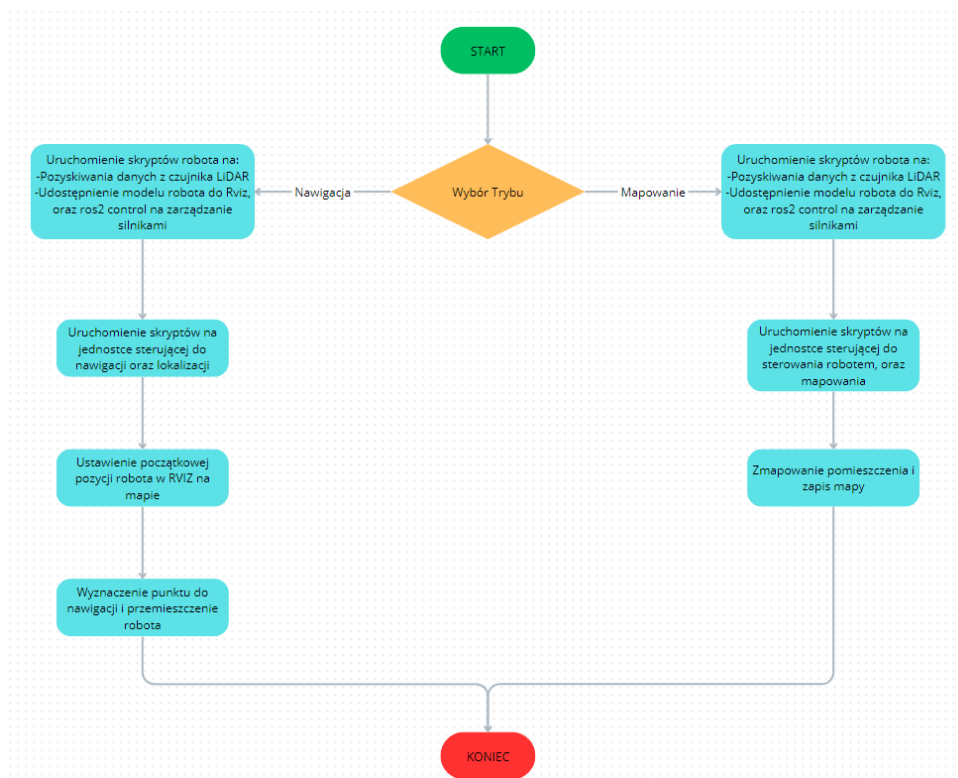
3.1 Wymagania funkcjonalne

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
- Lokalizacja robota na zapisanej mapie z wykorzystaniem algorytmu AMCL
- Autonomiczna nawigacja do wyznaczonych punktów na mapie z omijaniem przeszkód

3.2 Przypadki użycia

Na rysunku 3.1 przedstawiono diagram przypadków użycia systemu. System umożliwia użytkownikowi zdalne sterowanie robotem, tworzenie mapy otoczenia, lokalizację robota na mapie oraz autonomiczną nawigację do wyznaczonych punktów.

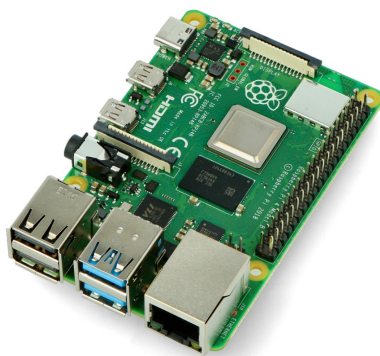


Rysunek 3.1: Diagram przypadków użycia systemu

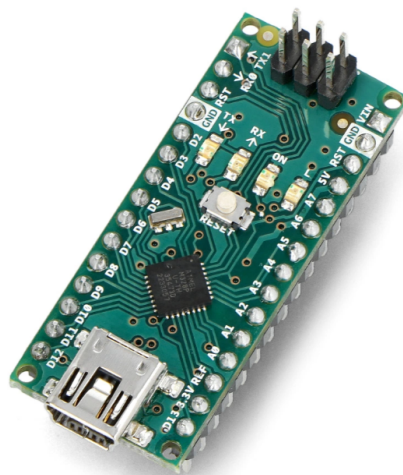
3.3 Specyfikacja komponentów

3.3.1 Jednostki sterujące

- Raspberry Pi 4 - główny komputer zarządzający robotem:
 - System operacyjny Ubuntu 22.04
 - ROS 2 Humble
 - Komunikacja przez SSH z jednostką sterującą zachowaniem robota



Rysunek 3.2: Raspberry Pi 4 model B



Rysunek 3.3: Arduino Nano

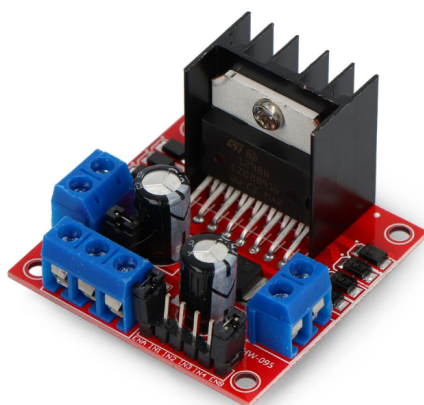


Rysunek 3.4: Silnik DC 12V 240RPM typu L z przekładnią metalową - magnetyczny enkoder Halla - Waveshare 22346

- Arduino Nano - sterownik silników:
 - Obsługa enkoderów
 - Komunikacja szeregową z Raspberry Pi

3.3.2 Napęd

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



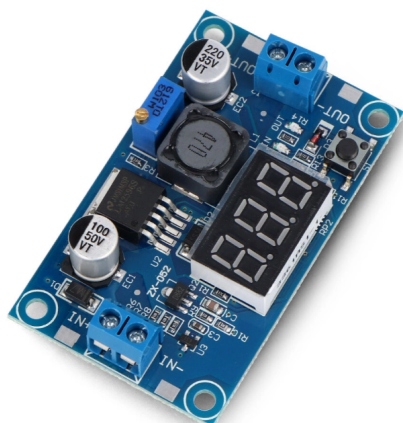
Rysunek 3.5: L298N - dwukanałowy sterownik silników - moduł 12V/2A



Rysunek 3.6: Ognia 18650 Li-Ion XTAR - 2600mAh

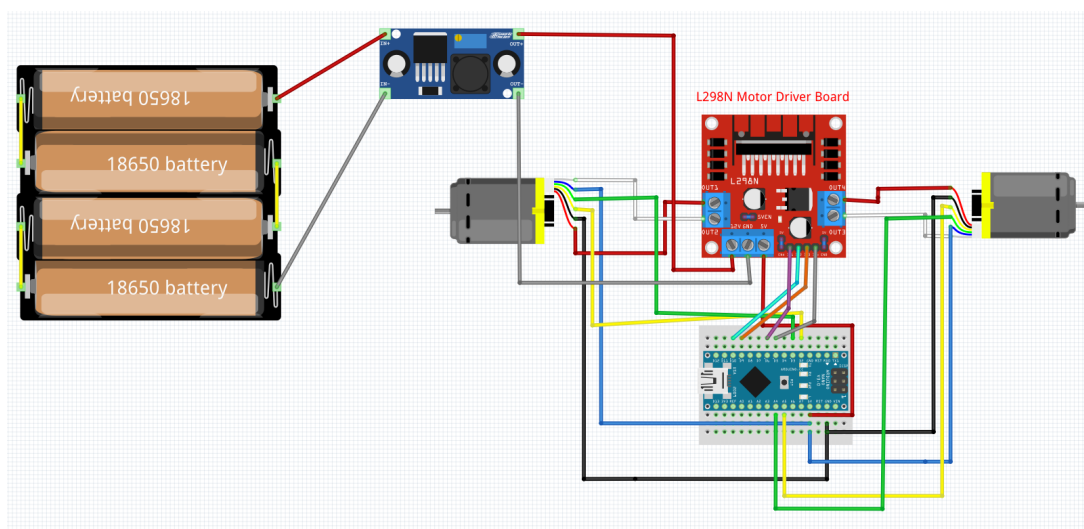
3.3.3 Zasilanie

- 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



Rysunek 3.7: Przetwornica step-down LM2596 3,2V-35V 3A z wyświetlaczem

3.4 Sposób połączenia silników z Arduino i L298N



Rysunek 3.8: Schemat połączenia silników z Arduino i L298N

Na zaprezentowanym schemacie (rys. 3.8) 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

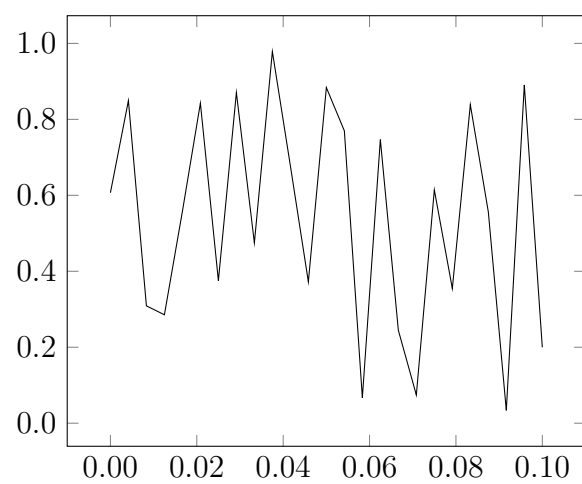
- Konfiguracja pakietów ROS 2:
 - SLAM Toolbox do mapowania
 - Nav2 do nawigacji z AMCL do lokalizacji
 - ROS2 Control do sterowania napędem
- Integracja i testy systemu

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

Krótką wstawka kodu w linii tekstu jest możliwa, np. **int a**; (biblioteka `listings`). Dłuższe fragmenty lepiej jest umieszczać jako rysunek, np. kod na rys 5.1, 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.

ζ	metoda						
	alg. 1	alg. 2	alg. 3			alg. 4, $\gamma = 2$	
			$\alpha = 1.5$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\beta = 0.1$	$\beta = -0.1$
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] Luis Bermudez. *Medium - Overview of SLAM*. 2024. URL: <https://medium.com/machinevision/overview-of-slam-50b7f49903b7> (term. wiz. 17.04.2024).
- [2] 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).
- [3] Dieter Fox. „KLD-Sampling: Adaptive Particle Filters.” W: sty. 2001, s. 713–720.
- [4] Graylin Trevor Jay. *Teleop Twist Keyboard*. 2015. URL: https://wiki.ros.org/teleop_twist_keyboard (term. wiz. 22.01.2015).
- [5] Matti Kortelainen. „A short guide to ROS 2 Humble Hawksbill”. W: *School of Computing, University of Eastern Finland, Kuopio, Finland* (2023), s. 5.
- [6] Steve Macenski i Ivona Jambrecic. „SLAM Toolbox: SLAM for the dynamic world”. W: *Journal of Open Source Software* 6.61 (2021), s. 2783. DOI: 10.21105/joss.02783. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.02783>.
- [7] Steve Macenski, Francisco Martín, Ruffin White i Jonatan Ginés Clavero. „The Marathon 2: A Navigation System”. W: *CoRR* abs/2003.00368 (2020). arXiv: 2003.00368. URL: <https://arxiv.org/abs/2003.00368>.
- [8] Josh Newans. *ROS.org - diffdrive arduino*. 2020. URL: https://wiki.ros.org/diffdrive_arduino (term. wiz. 08.12.2020).
- [9] Francisco Martin Rico. *A Concise Introduction to Robot Programming with ROS2*. Broken Sound Parkway NW: Taylor i 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

2.1	Reprezentacja pośrednika w systemie robota	6
2.2	Mapa sklepu utworzona za pomocą SLAM Toolbox	7
3.1	Diagram przypadków użycia systemu	10
3.2	Raspberry Pi 4 model B	11
3.3	Arduino Nano	12
3.4	Silnik DC 12V 240RPM typu L z przekładnią metalową - magnetyczny enkoder Halla - Waveshare 22346	12
3.5	L298N - dwukanałowy sterownik silników - moduł 12V/2A	13
3.6	Ogniwa 18650 Li-Ion XTAR - 2600mAh	13
3.7	Przetwornica step-down LM2596 3,2V-35V 3A z wyświetlaczem	14
3.8	Schemat połączenia silników z Arduino i L298N	14
4.1	Podpis rysunku po rysunkiem.	18
5.1	Pseudokod w listings.	19

Spis tabel

6.1	Nagłówek tabeli jest nad tabelą.	22
-----	--	----