



**WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI  
I INFORMATYKI**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

**Michał Bazan**

Porównanie algorytmów nawigacyjnych

**PRACA MAGISTERSKA**

Opiekun pracy:  
dr inż. Dariusz Rzońca

Rzeszów, 2024



# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	<b>6</b>
<b>2. Inżynierska część projektu</b>	<b>8</b>
2.1. Budowa robota	8
2.1.1. Wymagania sprzętowe	8
2.1.2. Schemat elektryczny	10
2.1.3. Testy	11
2.2. System operacyjny robota	12
2.2.1. Wymagania dotyczące oprogramowania	12
2.2.2. Implementacja	14
2.2.3. Obsługiwane polecenia	18
2.2.4. Testy oprogramowania	19
<b>3. Wprowadzenie do omawianych algorytmów</b>	<b>21</b>
3.1. Algorytm PID	21
3.2. Algorytm genetyczny	23
3.3. Algorytmy nawigacyjne	25
3.3.1. Algorytmy statyczne	25
3.3.2. Algorytmy dynamiczne	26
<b>4. Badania</b>	<b>28</b>
4.1. Optymalizacja nastaw regulatora PID prędkości obrotowej	28
4.1.1. Stanowisko pomiarowe	28
4.1.2. Identyfikacja obiektu	28
4.1.3. Wyznaczenie nastaw metodą klasyczną	31
4.1.4. Algorytm genetyczny	31
4.1.5. Porównanie otrzymanych wyników	37
4.2. Porównanie algorytmów nawigacyjnych w terenie bez przeszkód	40
4.3. Porównanie algorytmów nawigacyjnych w terenie z przeszkodami	40
<b>5. Podsumowanie i wnioski końcowe</b>	<b>41</b>
<b>Literatura</b>	<b>43</b>



## Wykaz symboli, oznaczeń i skrótów

- a) PID (eng. Proportional-Integral-Derivative) - skrót od Proporcjonalno-Całkująco-Różniczkującego regulatora, który jest powszechnie stosowany w systemach sterowania,
- b) MCU (eng. Microcontroller Unit) - Jednostka Mikrokontrolera,
- c) SQT (eng. Software Qualification Test) to proces testowania oprogramowania w celu zweryfikowania, czy spełnia ono określone wymagania i standardy jakościowe. SQT ma na celu potwierdzenie, że oprogramowanie działa zgodnie z założeniami i spełnia oczekiwania użytkowników oraz wymagania funkcjonalne i nefunkcjonalne,
- d) GA (eng. Genetic Algorithm) - algorytm genetyczny.

# 1. Wstęp

W dzisiejszych czasach, wraz z dynamicznym rozwojem technologii mobilnych, algorytmy nawigacyjne i uczenia maszynowego [2] odgrywają kluczową rolę w różnorodnych aplikacjach, począwszy od systemów nawigacji w samochodach po autonomiczne roboty poruszające się w różnych środowiskach. Biorąc pod uwagę aktualność tych zagadnień i rosnące zapotrzebowanie, zdecydowano o przeprowadzeniu badań dotyczących systemów nawigacyjnych.

Celem tej pracy jest zbadanie heurystycznych metod [4] optymalizacji regulatorów PID oraz porównanie wybranych algorytmów pod kątem kryteriów takich jak dokładność wyznaczania trasy oraz wydajność obliczeniowa w różnych warunkach terenowych.

Zakres pracy obejmuje dwie części:

- a) część inżynierska - wykonanie robota mobilnego, implementacja systemu wbudowanego oraz implementacja oprogramowania sterującego robotem poprzez dostępny interfejs,
- b) część badawcza - badanie algorytmów uczenia maszynowego do optymalizacji nastaw regulatorów PID oraz porównanie wybranych algorytmów nawigacyjnych.

Zastosowanie standardu ASPICE [5] zapewnia wysoką jakość procesu budowy robota oraz implementacji oprogramowania co pozwoli na przeprowadzenie rzetelnych badań i wyciągnięcie wiarygodnych wniosków.

W dalszej części pracy szczegółowo omówione zostaną poszczególne etapy realizacji każdego z tych komponentów, prezentując zarówno teoretyczne założenia, jak i praktyczne wyniki osiągnięte w ramach projektu.

W następnych rozdziałach pracy przedstawiono szczegółowy opis inżynierskiej części projektu oraz wyniki przeprowadzonych badań. W rozdziale poświęconym inżynierskiej części projektu omówiono budowę robota, jego system operacyjny oraz prostą stację operatorską, które stanowią podstawę do realizacji badań algorytmicznych. Następnie, w rozdziale dotyczącym badanych algorytmów, zaprezentowano teoretyczne i praktyczne aspekty algorytmu genetycznego, algorytmów nawigacyjnych statycznych oraz dynamicznych. Kolejny rozdział skupia się na opisie przeprowadzonych badań, w których dokonano optymalizacji nastaw regulatora PID oraz przeprowadzono porów-

nanie skuteczności algorytmów nawigacyjnych. Te szczegółowe analizy mają na celu ocenę wydajności poszczególnych rozwiązań oraz identyfikację optymalnych metod nawigacyjnych dla zbudowanego robota.

## 2. Inżynierska część projektu

W tym rozdziale przedstawiono kompleksowy opis prac związanych z implementacją oraz funkcjonowaniem robota. Niniejszy rozdział stanowi szczegółowe omówienie trzech kluczowych elementów projektu, które skupiały się na budowie fizycznej robota zgodnie z procedurami SPICE, implementacji oprogramowania w języku C++ z uwzględnieniem unit testów oraz oprogramowania do sterowania robotem. Dzięki zastosowaniu tych trzech elementów możliwe było zapewnienie nie tylko skutecznej implementacji samego robota, ale również jego oprogramowania oraz efektywnego zarządzania nim w czasie rzeczywistym. Dokładna dokumentacja wszystkich komponentów projektu oraz testów znajduje się na repozytorium Github [1].

### 2.1. Budowa robota

Pierwszym aspektem, który został przedstawiony, jest proces budowy robota. Opisane zostały tutaj szczegóły dotyczące wyboru komponentów oraz implementacji elektroniki sterującej. Proces ten obejmuje kilka kluczowych etapów, które mają na celu zapewnienie, że robot będzie w stanie spełniać wszystkie założone funkcje i wymagania. W szczególności skupiono się na doborze odpowiednich czujników, kontrolerów, silników oraz systemu zasilania, które umożliwią robotowi prawidłowe działanie w różnych warunkach.

#### 2.1.1. Wymagania sprzętowe

W celu dobrania właściwych elementów do budowy robota, sformułowano niżej umieszczone wymagania wysokiego poziomu. Te wymagania określają kluczowe funkcje i cechy, jakie powinny posiadać komponenty sprzętowe robota, aby zapewnić jego pełną funkcjonalność i niezawodność. W tabeli 4.1 zestawiono najważniejsze z tych wymagań, które dotyczą obsługi czujników, komunikacji bezprzewodowej, napędu oraz zarządzania zasilaniem.



Tablica 2.1. Wymagania wysokiego poziomu HWE1

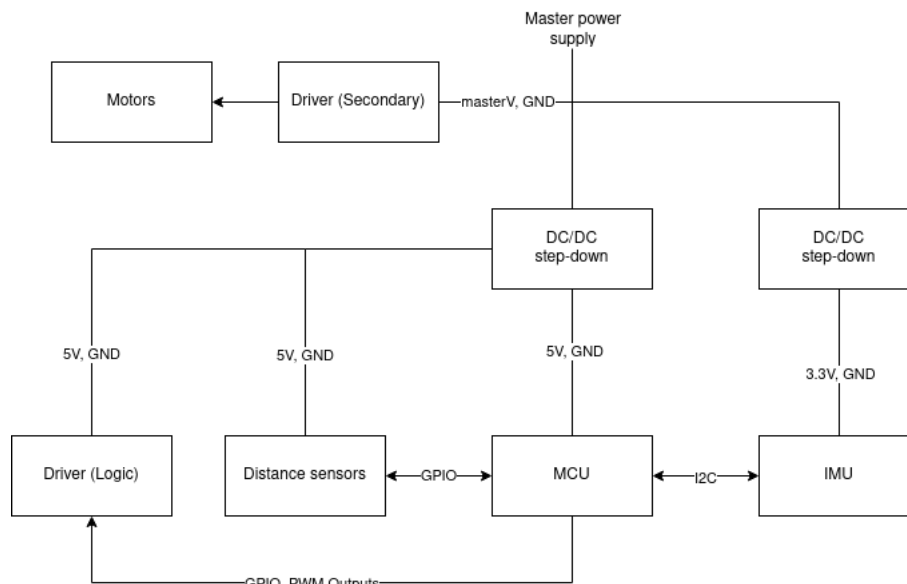
ID_HWE1	Opis
HWE_1_010	Sprzęt powinien wspierać obsługę czujników odległości.
HWE_1_020	Kontroler powinien udostępniać moduł WiFi.
HWE_1_030	Robot powinien być wyposażony w szczotkowe silniki DC z enkoderami.
HWE_1_040	Sprzęt powinien wspierać obsługę enkoderów.
HWE_1_060	Sprzęt powinien mieć zaimplementowany odpowiedni system dystrybucji zasilania.

Na podstawie wyżej ukazanych wymagań wysokiego poziomu, sformułowano następujące wymagania niskiego poziomu. Te szczegółowe wymagania określają dokładne specyfikacje techniczne i parametry, które muszą być spełnione przez komponenty, aby zapewnić zgodność z ogólnymi celami projektu. W tabeli 2.2 zestawiono kluczowe wymagania dotyczące interfejsów komunikacyjnych, zasilania oraz czujników.

Tablica 2.2. Wymagania niskiego poziomu HWE2

ID_HWE2	Opis
HWE_2_010	Wszystkie interfejsy komunikacyjne powinny wspierać logikę 3V3.
HWE_2_020	Mikrokontroler powinien być wyposażony w moduł WiFi.
HWE_2_030	System dystrybucji zasilania powinien zasilić logikę.
HWE_2_040	System dystrybucji zasilania powinien zasilić silniki.
HWE_2_060	Czujnik odległości powinien mieć zakres pomiarowy wynoszący co najmniej 200 cm.
HWE_2_070	Czujniki odległości powinny udostępniać interfejs komunikacyjny kompatybilny z interfejsami mikrokontrolera.

Niżej umieszczona figura 2.1 ukazuje schemat blokowy utworzony na podstawie wcześniej zdefiniowanych wymagań sprzętowych. Wskazuje, jakie interfejsy i poziomy napięcie zasilania zostały wykorzystane pomiędzy poszczególnymi blokami. Sprzęt zdefiniowany w ten sposób oraz zbiór wymagań stawianych przed urządzeniem umożliwił dobór właściwych komponentów.



Rys. 2.1. Schemat blokowy sprzętu

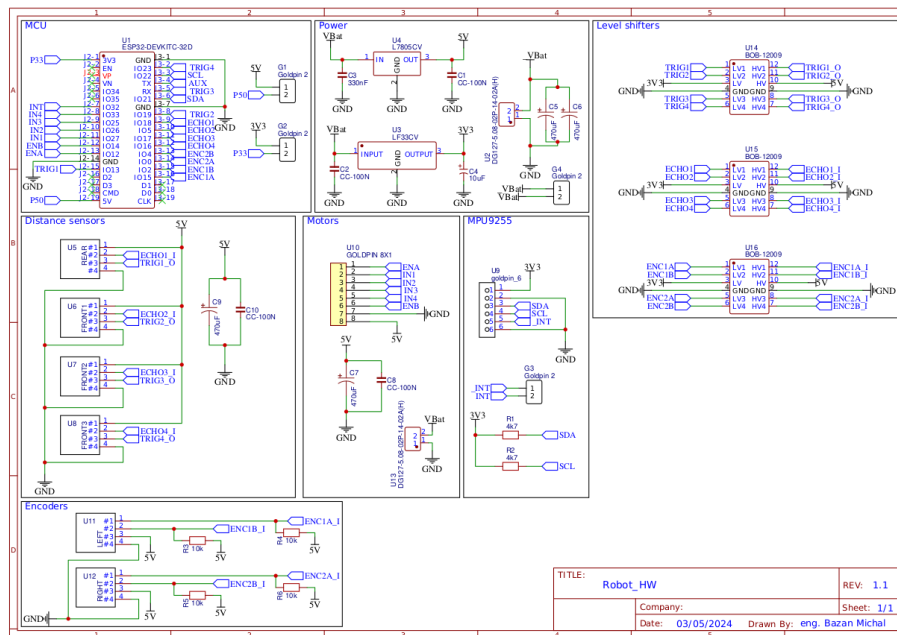
### 2.1.2. Schemat elektryczny

Niniejsza sekcja skupia się na wyjaśnieniu schematu elektrycznego robota. Na podstawie umieszczonych w poprzedniej sekcji wymagań dokonano wyboru komponentów, które zostały wykorzystane w projekcie, ale dokładny opis elementów został umieszczony w dokumentacji tej części projektu na repozytorium Github [1].

W celu ułatwienia procesu implementacji i zmitigowaniu potencjalnych błędów, schemat elektryczny został podzielony na bloki zgodnie z podziałem ukazanym na rysunku 2.1.

Wyżej umieszczona ilustracja 2.2 ukazuje połączenia pomiędzy blokami schematu:

- MCU - blok definiuje wejścia i wyjścia sterujące oraz połączenia interfejsów komunikacyjnych,
- Power - sekcja odpowiedzialna za dystrybucję zasilania,
- Level shifters - konwertery poziomów logicznych, które zapewniają kompatybilność poziomów sygnałów elektrycznych,
- Distance sensors - blok definiuje połączenia pomiędzy mikrokontrolerem i czujnikami odległości,
- Motors - sekcja ukazuje sygnały sterujące silnikami,



Rys. 2.2. Schemat elektryczny

- f) MPU9255 - blok został zaimplementowany, ale nie jest wykorzystywany,
- g) Encoders - ta sekcja ukazuje sygnały wyjściowe z enkoderów.

### 2.1.3. Testy

Testowanie tej części projektu polegało głównie na weryfikacji założeń i projektu płytki, dlatego aspekt ten nie został poruszony w tej sekcji. Szczegółowa dokumentacja znajduje się w zdalnym repozytorium [1]. Testy obejmowały sprawdzenie zgodności z wymaganiami, poprawność połączeń oraz funkcjonalność poszczególnych bloków.

## 2.2. System operacyjny robota

Ta sekcja skupia się na implementacji oprogramowania w języku C++, obejmującej zarówno projektowanie, jak i implementację funkcjonalności. System operacyjny robota zarządza wszystkimi aspektami operacyjnymi robota, od odczytu danych z czujników, poprzez przetwarzanie i analizę tych danych, aż po sterowanie silnikami i komunikację zewnętrzną.

### 2.2.1. Wymagania dotyczące oprogramowania

Na podstawie wcześniej omówionych wymagań sprzętowych oraz celów tego projektu, sformułowano następujące wymagania wysokiego poziomu. Wymagania te definiują kluczowe funkcjonalności, jakie powinno posiadać oprogramowanie, aby zapewnić niezawodność działania robota.

Tablica 2.3. Wymagania wysokiego poziomu SWE2

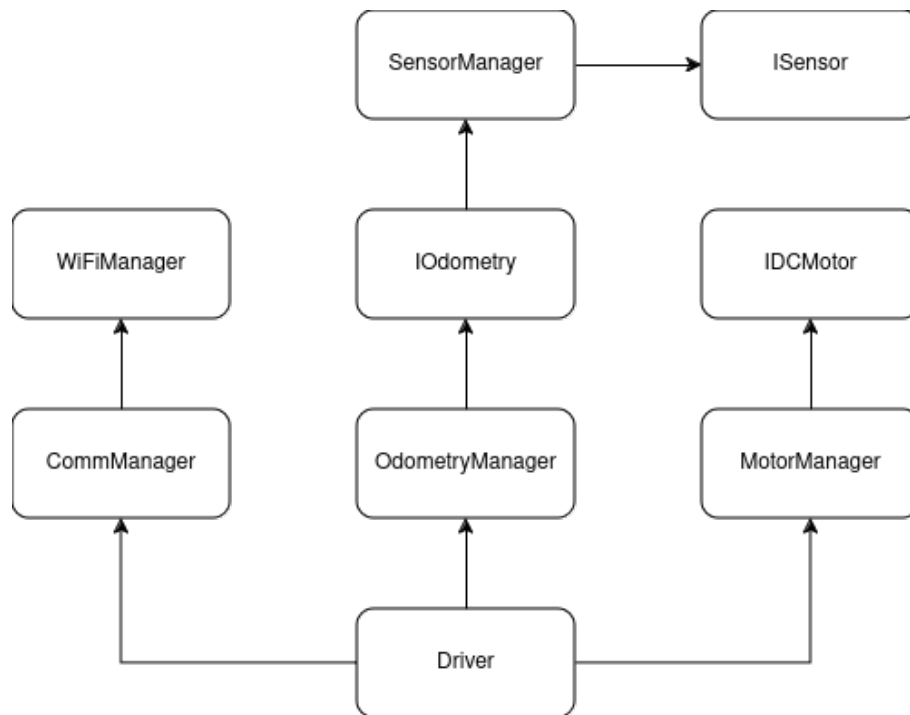
ID_SWE2	Opis
SWE_2_010	Oprogramowanie powinno odczytywać sensory periodycznie.
SWE_2_020	Interfejs WiFi powinien być wykorzystany do komunikacji z oprogramowaniem sterującym.
SWE_2_030	Oprogramowanie powinno udostępniać interfejs do sterowania silnikami.
SWE_2_040	Komunikacja powinna wykorzystywać prosty protokół komunikacyjny do wymiany danych pomiędzy robotem a oprogramowaniem sterującym.
SWE_2_050	Oprogramowanie powinno implementować algorytm wyznaczający odometrię.

W celu wyłonienia konkretnych bloków, z jakich powinno składać się oprogramowanie, zdefiniowano następujące wymagania niskiego poziomu. Te szczegółowe wymagania określają specyficzne zadania i interfejsy, które muszą być zaimplementowane, aby spełnić wymagania wysokiego poziomu.

Tablica 2.4. Wymagania niskiego poziomu SWE3

ID_SWE3	Opis
SWE_3_010	Oprogramowanie powinno odczytywać sensory co 50ms.
SWE_3_020	Oprogramowanie powinno udostępniać interfejs do wymiany danych.
SWE_3_030	Oprogramowanie powinno udostępniać dane z sensorów na żądanie.
SWE_3_040	Komunikacja powinna opierać się o wykorzystanie protokołu MQTT.
SWE_3_050	Oprogramowanie powinno udostępnić interfejs do sterowania silnikami.
SWE_3_060	Implementacja powinna wykorzystywać prostą odometrię.

Na podstawie wymagań umieszczonych w tabeli 2.4 zdefiniowano niżej ukazaną architekturę systemu operacyjnego robota.



Rys. 2.3. Architektura oprogramowania

Na rysunku 2.3 przedstawiono architekturę systemu operacyjnego robota, która została zaprojektowana w oparciu o zdefiniowane wymagania niskiego poziomu. Architektura ta składa się z kilku kluczowych modułów:

- a) CommManager - odpowiada za połączenie sieciowe i komunikację za pośrednictwem protokołu MQTT,
- b) SensorManager - posiada uchwyt do wszystkich dostępnych sensorów, które obsługuje periodycznie,
- c) OdometryManager - posiada uchwyt do obiektu typu SensorManager i realizuje odometrię na podstawie odczytów z czujników,
- d) MotorManager - steruje silnikami zależnie od nadchodzących komunikatów,
- e) Driver - odpowiada za poprawną inicjalizację systemu, wywoływanie funkcji callbackowych z bloku odpowiedzialnego za komunikację oraz ustawienie prędkości obrotowej silników zależnie od uchybu regulacji.

### 2.2.2. Implementacja

Implementacja systemu operacyjnego robota składa się z 12 klas, z których każda pełni określoną rolę w funkcjonowaniu robota. Klasy te są odpowiedzialne za zarządzanie różnymi aspektami operacyjnymi, od odczytu danych z czujników po sterowanie silnikami. Jednym z ważnych elementów implementacji jest także zaimplementowany prosty szablon regulatora PID oraz stos oparty o `std::array`[6].

Listing 2.1. Klasa CommManager

```
1 template<class StringType, std::size_t topic_num>
2 class CommManager{
3 public:
4     using messageType = std::tuple<StringType, StringType>;
5     using onMsg_cb = std::function<void(char*, byte*, unsigned int)>;
6
7     static messageType createMessage(const StringType& topic, const StringType&
8     payload) noexcept;
9
10    CommManager(
11        WiFiManager<StringType>&& w,
12        const StringType& uname,
13        const StringType& broker,
14        const StringType& password,
15        WiFiClient& c,
16        std::array<StringType, topic_num>&& topics,
17        const onMsg_cb& cback,
18        const StringType& ID = "Robot"
19    ) noexcept;
20
21    MQTTStatus poolCommManager() noexcept;
22
23    bool sendMessage(messageType&& message) noexcept;
24 private:
25     NetworkStatus poolNetwork() noexcept;
26     SemaphoreHandle_t MQTTQueueMutex;
27
28     enum : uint8_t{
29         ConnectingNetwork = 0,
30         ConnectingBroker,
31         Timeout,
32         CheckingStatus
33     };
34     uint8_t m_internalState;
35     WiFiManager<StringType> m_wifiMgr;
36     custom::stack<messageType, stack_depth> m_messageStack;
37     StringType m_broker;
38     StringType m_password;
39     StringType m_uname;
40     StringType m_ID;
41     const std::array<StringType, topic_num> m_topics;
42     PubSubClient m_mqttClient;
43     onMsg_cb m_message_cb;
44 };
```

Klasa CommManager (Listing 2.1) zarządza komunikacją między robotem a oprogramowaniem sterującym poprzez protokół MQTT i połączenie WiFi. Oferuje funkcje odczytu danych z czujników, wysyłania komunikatów i reakcji na przychodzące komunikaty. Metoda createMessage tworzy nową wiadomość MQTT na podstawie

tematu i treści. W konstruktorze inicjalizowane są połączenie WiFi, parametry MQTT i lista subskrybowanych tematów. poolCommManager zarządza połączeniem z WiFi i brokerem MQTT, podejmując odpowiednie działania w zależności od stanu połączenia. sendMessage dodaje wiadomość do kolejki komunikatów. Klasa zapewnia niezawodne połączenie i efektywną komunikację, co jest kluczowe dla funkcjonowania robota w różnych scenariuszach działania.

Listing 2.2. Klasa SensorManager

```
1 enum class SensorMapping : uint8_t{
2     LEFT_Encoder,
3     RIGHT_Encoder,
4     DST_Front_1,
5     DST_Front_2,
6     DST_Front_3,
7     DST_Rear
8 };
9
10 constexpr uint8_t translate(SensorMapping s){
11     return static_cast<uint8_t>(s);
12 }
13
14 class SensorManager{
15 public:
16     void init();
17     SensorManager(std::array<sensorPointer, numSensors>&& s);
18     void poolSensors();
19     ISensor& getSensor(SensorMapping s);
20
21 private:
22     std::array<sensorPointer, numSensors> sensors;
23 };
```

Klasa SensorManager (Listing 2.2) zarządza sensorami robota, przechowując ich wskaźniki i udostępniając interfejs odczytu danych. Typ SensorMapping reprezentuje indeksy sensorów, ułatwiając dostęp do nich. Metoda translate przekształca enum na liczby całkowite, co umożliwia łatwiejszy dostęp do konkretnego urządzenia. Konstruktor inicjuje obiekt, a init inicjuje sensory. poolSensors odpytuje sensory, a getSensor zwraca referencję do konkretnego sensora.

Listing 2.3. Klasa OdometryManager

```

1 enum ActiveOdometry : std::size_t {
2     SimpleOdo = 0,
3     AdvancedOdo = 1
4 };
5
6 constexpr std::size_t availableAlgorithms = 2;
7
8 class OdometryManager{
9 public:
10     OdometryManager(
11         std::array<IOdometry*, availableAlgorithms>&& odo,
12         SensorManager& s
13     ) noexcept;
14
15     void updatePosition() noexcept;
16     void setActiveOdometry(ActiveOdometry o) noexcept;
17     std::size_t getActiveOdometry() const noexcept;
18     const position getPosition() const noexcept;
19     void resetActiveOdometry() noexcept;
20 private:
21     std::array<IOdometry*, availableAlgorithms> m_odometryAgents;
22     SensorManager& m_sensorMgr;
23     std::size_t m_active;
24 };

```

Klasa OdometryManager zarządza różnymi algorytmami odometrii robota i aktualizuje jego pozycję na podstawie danych z sensorów. Enum ActiveOdometry definiuje dostępne algorytmy odometrii, lecz w tej implementacji dostępna jest tylko prosta odometria. Konstruktor przyjmuje tablicę wskaźników do obiektów IOdometry reprezentujących różne algorytmy odometrii oraz referencję do obiektu SensorManager. Metoda updatePosition aktualizuje pozycję robota na podstawie danych z sensorów i aktywnego algorytmu odometrii. setActiveOdometry ustawia aktywny algorytm odometrii, getActiveOdometry zwraca jego indeks, a getPosition zwraca aktualną pozycję. Metoda resetActiveOdometry resetuje aktywny algorytm i ustawia zerowe współrzędne. Klasa zapewnia elastyczne zarządzanie algorytmem odometrii i precyzyjne poruszanie się robota.

Listing 2.4. Klasa MotorManager

```

1 class MotorManager{
2 public:
3     enum class settingType{
4         setAngularTarget,
5         updatePwm
6     };
7
8     using motor_array = std::array<IDCMotor*, motor_num>;
9     using speed_array = std::array<int32_t, motor_num>;
10    using angular_array = std::array<float, motor_num>;
11
12    void init() noexcept;
13    void setSpeed(const speed_array& speeds, settingType t = settingType::updatePwm)
14        noexcept;
15    MotorManager(motor_array&& m, float i = inertia_coef) noexcept;
16    void InertiaCoef(float i) noexcept;
17    float InertiaCoef() const noexcept;

```



```

17 void poolMotors() noexcept;
18 const speed_array* CurrentSpeed() const noexcept;
19 const speed_array* DesiredSpeed() const noexcept;
20 const angular_array* TargetAngular() const noexcept;
21
22 private:
23 float m_inertiaCoef;
24 motor_array motors;
25 speed_array target_percent_speed;
26 speed_array current_percent_speed;
27 angular_array target_angular_speed;
28 };

```

Klasa MotorManager zarządza silnikami prądu stałego robota, kontrolując ich prędkość obrotową i kierunek. settingType definiuje różne typy ustawień silników, a motor\_array, speed\_array, i angular\_array to odpowiednio tablice wskaźników do silników, prędkości silników i prędkości kątowych. Metoda init inicjuje silniki, setSpeed ustawia prędkość zależnie od typu ustawienia, a konstruktor inicjuje obiekt, przyjmując tablicę wskaźników do silników i opcjonalny współczynnik inercji. poolMotors aktualizuje stany silników, a CurrentSpeed, DesiredSpeed, i TargetAngular zwracają odpowiednio aktualną prędkość, docelową prędkość i prędkości kątowe silników. Klasa zapewnia elastyczne zarządzanie silnikami i kontrolę nad ich prędkościami, kluczową dla ruchu i sterowania robotem.

Listing 2.5. Klasa Kernel

```

1 class Kernel{
2 public:
3     static void init();
4     static void main();
5
6     /* motion management */
7     static Motor::DCMotor motorLeft;
8     static Motor::DCMotor motorRight;
9     static Motor::MotorManager motorManager;
10    static uint32_t mapper(uint32_t);
11    static constants::motors::types::motor_pid pidLeft;
12    static constants::motors::types::motor_pid pidRight;
13
14    /* communications management */
15    static constants::comm::types::job_stack_t jobStack;
16    static Comm::MQTT::CommManager<String, constants::comm::subscribedTopics>
17    commMgr;
18    static void MQTTcallback(char*, byte*, unsigned int);
19
20    /* sensor management */
21    static Sensor::DistanceSensor rear;
22    static Sensor::DistanceSensor front_left;
23    static Sensor::DistanceSensor front;
24    static Sensor::DistanceSensor front_right;
25    static Sensor::Encoder encoderLeft;
26    static Sensor::Encoder encoderRight;
27
28    static Sensor::SensorManager sensorMgr;
29
30    static Sensor::simpleOdometry odoAgent;
31    static Sensor::OdometryManager odoMgr;
32 };

```

Klasa Kernel pełni kluczową rolę jako centralny moduł zarządzający systemem. Odpowiada za inicjalizację systemu oraz koordynację jego głównych funkcji. Metoda `init` przygotowuje system do działania, a `main` zarządza jego główną logiką. Kluczowe funkcje obejmują zarządzanie ruchem (silniki, regulator PID), komunikacją (MQTT), sensorami (odległości, enkodery) oraz odometrią. Kernel integruje te komponenty, zapewniając ich współpracę i efektywną działalność.

### 2.2.3. Obsługiwane polecenia

Sekcja przedstawia interfejs sieciowej komunikacji z robotem poprzez protokół MQTT. Tabela 2.5 zawiera tematy subskrybowane przez robota wraz z opisem ich przeznaczenia oraz przykładowymi danymi. Tabela ta obejmuje kanały do debugowania, przesyłania komend oraz ustawiania prędkości silników. Natomiast w tabeli 2.6 znajdują się tematy publikowane przez robota, wraz z opisem i typowymi danymi przesyłanymi przez te kanały, takimi jak odpowiedzi na komendy i wiadomości debugujące. W tabeli 2.7 znajdują się dostępne komendy, ich opisy oraz oczekiwane odpowiedzi. Komendy obejmują pobieranie odczytów z czujników, resetowanie pozycji, pobieranie danych odometrycznych oraz zatrzymywanie silników.

Tablica 2.5. Tematy subskrybowane przez robota

Robot subskrybuje	Opis	Dane
robot/echo/in	Temat wykorzystywany do debugu, system odpowiada ciągiem tekstowym na temacie robot/echo/out.	Dowolny ciąg tekstowy zgodny z ASCII.
robot/cmd/in	Temat do przesyłania zdefiniowanych komend (tab. 2.7).	Komenda jako ciąg tekstowy zgodny z ASCII.
robot/set/motors	Temat do przesyłania żądanych prędkości silników.	Dane w formacie JSON: { „left” : x, „right” : y }, gdzie x oraz y to prędkości wyrażone w procentach.

Tablica 2.6. Tematy publikowane przez robota

Robot subskrybuje	Opis	Dane
robot/echo/out	Temat, na który system przesyła wiadomości dotyczące debugu.	Dowolny ciąg tekstowy zgodny z ASCII.
robot/cmd/response	Odpowiedź na przesłaną komendę.	Dane w formacie JSON (odczyty z sensorów, odometria), brak odpowiedzi lub ciąg tekstowy <code>cmd not supported</code> w przypadku przesłania błędnej komendy.

Tablica 2.7. Dostępne komendy

Komenda	Opis	Odpowiedź
get_sensors	Pobierz odczyty z czujników.	Dane z czujników w formacie JSON.
reset_odo	Zeruj pozycję.	Brak odpowiedzi.
get_odo	Pobierz wyznaczone dane odometryczne.	Dane w formacie JSON.
get_all	Pobierz dane z sensorów i pozycję robota.	Dane w formacie JSON.
halt	Zatrzymaj silniki.	Brak odpowiedzi.

#### 2.2.4. Testy oprogramowania

W tej sekcji opisano przeprowadzone testy weryfikujące zgodność oprogramowania z wymaganiami określonymi w specyfikacji SWE3.

Tablica 2.8. Test SQT\_01

Treść wymagania	Weryfikacja	Wynik testu
Oprogramowanie powinno odczytywać sensory co 50ms.	Zadanie odczytywania sensorów jest zaplanowane w systemie freeRTOS co 50ms.	Wynik pozytywny

Tablica 2.9. Test SQT\_02

Weryfikacja	Oczekiwane	Obserwacja
Podłączenie płytki do zasilania	Płytką powinna być poprawnie zasilona	Płytką została poprawnie zasilona
Wgranie najnowszej wersji oprogramowania na płytkę	Najnowsze oprogramowanie powinno zostać wgrane na płytkę	Najnowsze oprogramowanie zostało wgrane na płytkę
Oczekiwanie na wiadomość 'robot initialized' na temacie robot/echo/out.	Wiadomość powinna zostać odebrana.	Wiadomość została odebrana.
Przesłanie wiadomości na temacie robot/set/motors, aby ustawić prędkość silników bliską 40% prędkości maksymalnej.	Silniki powinny kręcić się z prędkością bliską 40% prędkości maksymalnej.	Silniki kręcą się z prędkością bliską 40% prędkości maksymalnej.
Przesłanie komendy 'halt' na temacie robot/cmd/in.	Silniki powinny się zatrzymać.	Silniki zatrzymały się.
Przesłanie komendy 'get_all' w celu uzyskania wszystkich danych.	Uzyskano dane z sensorów i pozycję robota.	Uzyskano dane z sensorów i pozycję robota.
Przesłanie komendy 'reset_odo' w celu resetowania odometrii.	Wiadomość powinna zostać wysłana.	Wiadomość została wysłana.
Przesłanie komendy 'get_odo' w celu uzyskania pozycji robota.	Uzyskano pozycję, która wskazuje na zero.	Uzyskano pozycję, która wskazuje na zero.

Test SQT\_01 miał na celu potwierdzenie, czy oprogramowanie regularnie odczytuje dane z czujników odległości co 50 ms, zgodnie z wymaganiami. Mimo że w projekcie nie wykorzystano IMU, to test został dostosowany do odczytu danych z czujników odległości, a zadanie zostało zaplanowane jako praca freeRTOS z interwałem 50 ms.

Testy oznaczone jako SQT\_02, skupiły się na weryfikacji podstawowych funkcji oprogramowania, w tym dostarczania zasilania i programowania sprzętu, wymiany danych, kontroli silników itp. Każde z tych wymagań zostało poddane testowi, a wynikiem było potwierdzenie, że oprogramowanie spełnia te kryteria.

W obu przypadkach testy zakończyły się sukcesem, co potwierdza zgodność oprogramowania z wymaganiami określonymi w specyfikacji SWE3. Oprócz przeprowadzenia testów kwalifikacyjnych, oprogramowanie zostało pokryte testami jednostkowymi.

### 3. Wprowadzenie do omawianych algorytmów

#### 3.1. Algorytm PID

Algorytm PID [7] jest podstawowym narzędziem używanym w systemach sterowania. Celem tego regulatora jest minimalizacja różnicy między wartością zadaną a rzeczywistą wartością procesu poprzez odpowiednie dostosowanie sygnału sterującego. Regulator PID składa się z trzech komponentów (wzór 3.4):

- a) składnik proporcjonalny (wzór 3.1) - generuje sygnał sterujący proporcjonalny do bieżącego błędu. Wyższa wartość współczynnika wzmocnienia prowadzi do szybszej reakcji systemu, ale może powodować oscylacje lub niestabilność,
- b) składnik całkujący (wzór 3.2) - eliminuje stałe odchylenie przez sumowanie błędów w czasie. Powoduje to wzrost sygnału sterującego, dopóki błąd nie zostanie zredukowany do zera. Współczynnik nie powinien być zbyt duży, ponieważ może powodować przeregulowania i oscylacje,
- c) składnik różniczkujący (wzór 3.3) - reaguje na szybkość zmiany odpowiednio korygując sygnał sterujący. Pomaga w tłumieniu oscylacji i poprawia stabilność systemu. Zbyt duża wartość wzmocnienia może jednak sprawić, że regulator będzie agresywnie zmieniał wartość sterującą.

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (3.1)$$

$$I = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

$$D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

$$PID = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

gdzie:  $K_p$  – wzmocnienie członu proporcjonalnego,  $K_i$  – wzmocnienie członu całkującego,  $K_d$  – wzmocnienie członu różniczkującego,  $e(t)$  – błąd regulacji

W regulatorze analogowym PID wszystkie operacje matematyczne są wykonywane w sposób ciągły przy użyciu komponentów elektronicznych, takich jak oporniki,

kondensatory i wzmacniacze operacyjne. Ze względu na wykorzystane technologie, w prezentowanym rozwiązaniu zastosowana została dyskretna wersja algorytmu, która w porównaniu do regulatora ciągłego, ograniczona jest niższą dokładnością całkowania i różniczkowania.

Listing 3.1. Kod implementacji cyfrowego algorytmu PID

```

1  template <typename ValueType, typename outType, outType MaxOut, outType MinOut,
2      int32_t maxErrorSum, int32_t minErrorSum, uint32_t samplingMs = 20>
3  class pid{
4  public:
5      /*
6       * Kp - proportional Gain
7       * Ti - integrator constant
8       * Td - derivative constant
9       * Ts - sampling time in ms
10     */
11     constexpr pid(float Kp, float Ti, float Td) noexcept:
12         m_Kp{ Kp }, m_Ki{ (Kp / Ti) * (samplingMs * 0.001f) }, m_Kd{ (Kp * Td) / (
13             samplingMs * 0.001f + 0.1f * Td) },
14         m_errorSum{ 0 }, m_previousError{ 0 } {}
15
16     void reinit(float Kp, float Ti, float Td){
17         m_Kp = Kp;
18         m_Ki = (Kp / Ti) * (samplingMs * 0.001f);
19         m_Kd = (Kp * Td) / ((samplingMs * 0.001f) + 0.1f * Td);
20         m_errorSum = m_previousError = 0;
21     }
22
23     outType getOutput(ValueType actual, ValueType desired){
24         auto error = desired - actual;
25         float P = m_Kp * error;
26
27         m_errorSum += static_cast<int32_t>(error);
28
29         if(m_errorSum > maxErrorSum){
30             m_errorSum = maxErrorSum;
31         }
32         else if(m_errorSum < minErrorSum){
33             m_errorSum = minErrorSum;
34         }
35
36         float I = m_Ki * m_errorSum;
37         float D = m_Kd * (error - m_previousError);
38
39         auto output = static_cast<outType>(P + I + D);
40
41         if(output > MaxOut){
42             return MaxOut;
43         }
44         else if(output < MinOut){
45             return MinOut;
46         }
47         else{
48             return output;
49         }
50     }
51 private:
52     float m_Kp;
53     float m_Ki;
54     float m_Kd;
55     ValueType m_errorSum;
56     ValueType m_previousError;
57 };

```

Kod ukazany na wyżej umieszczonym listingu 3.1 definiuje szablon klasy pid, który reprezentuje cyfrowy algorytm PID. Kluczowymi elementami tego algorytmu są trzy główne składowe: proporcjonalny, całkujący i różniczkujący.

Algorytm ten jest parametryzowany przez różne wartości, takie jak wzmocnienia ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) oraz ograniczenia (MaxOut, MinOut). Wartości te pozwalają na dostosowanie algorytmu do specyfiki danego systemu.

W metodzie getOutput, algorytm oblicza sygnał sterujący na podstawie bieżącej wartości i wartości zadanego stanu. Składa się na to trzy kroki:

- a) Wyznaczenie składowej proporcjonalnej jako iloczynu wzmocnienia proporcjonalnego i aktualnego uchybu regulacji,
- b) Obliczenie składowej całkującej jako sumy błędów z poprzednich kroków, pomnożonej przez wzmocnienie całkujące,
- c) Obliczenie składowej różniczkującej jako różnicy błędu aktualnego i poprzedniego stanu, pomnożonej przez wzmocnienie różniczkujące.

### 3.2. Algorytm genetyczny

Algorytm genetyczny jest jednym z najpopularniejszych algorytmów ewolucyjnych, które są inspirowane procesami ewolucyjnymi w naturze. Główną ideą algorytmu genetycznego jest symulacja mechanizmów dziedziczenia, mutacji, selekcji naturalnej i krzyżowania genetycznego w celu rozwiązania problemów optymalizacyjnych. Podstawowe kroki działania algorytmu genetycznego obejmują:

- a) Inicjalizacja populacji - tworzenie początkowej populacji rozwiązań, zazwyczaj generowanych losowo,
- b) Selekcja - wybór jednostek najlepiej przystosowanych (najlepszych rozwiązań) do przetrwania i reprodukcji. Istnieje wiele różnych metod selekcji, takich jak ruletkowa, turniejowa, rankingowa itp.,
- c) Krzyżowanie - tworzenie nowych rozwiązań poprzez wymianę fragmentów między dwoma rodzicami. Jest to symulacja procesu krzyżowania genetycznego w naturze,
- d) Mutacja - losowa zmiana pewnych cech wybranych jednostek w celu wprowadzenia różnorodności genetycznej w populacji,

- e) Ocena przystosowania - określenie jakości każdego rozwiązania w populacji na podstawie funkcji oceny (funkcji przystosowania), która zazwyczaj opisuje, jak dobrze dany osobnik spełnia postawione wymagania,
- f) Zakończenie algorytmu - algorytm genetyczny zwykle kończy działanie po osiągnięciu określonego warunku stopu. Przykładowymi warunkami stopu mogą być przekroczenie założonej ilości generacji czy osiągnięcie rozwiązania optymalnego lokalnie lub globalnie.

Algorytmy genetyczne znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak optymalizacja kombinatoryczna, uczenie maszynowe, projektowanie sieci neuronowych, inżynieria ewolucyjna i wiele innych. Ich siła tkwi w zdolności do eksploracji przestrzeni rozwiązań w poszukiwaniu optymalnych lub zbliżonych do optymalnych wyników, nawet w przypadku problemów o dużym stopniu złożoności i wielowymiarowości.

Najważniejszymi parametrami algorytmu genetycznego są:

- a) Rozmiar populacji - określa liczbę osobników w każdym pokoleniu. Wartość tego parametru wpływa na zróżnicowanie genetyczne populacji oraz szybkość działania algorytmu. Zbyt mała populacja może prowadzić do zbyt wąskiego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, podczas gdy zbyt duża populacja może prowadzić do długiego czasu obliczeń,
- b) Liczba generacji - określa, ile pokoleń zostanie maksymalnie wygenerowanych przez algorytm genetyczny przed zakończeniem działania,
- c) Funkcja oceny - przypisuje wartość przystosowania każdemu osobnikowi w populacji, opisując, jak dobrze dany osobnik rozwiązuje problem optymalizacyjny. Celem algorytmu jest maksymalizacja lub minimalizacja tej funkcji zależnie od charakteru rozwiązywanego problemu,
- d) Metoda selekcji - selekcja wybiera osobniki z populacji, które zostaną wykorzystane do reprodukcji w kolejnym pokoleniu. Popularne metody selekcji to ruletka ruletkowa, selekcja turniejowa, selekcja rankingowa i selekcja proporcjonalna,
- e) Operator krzyżowania - krzyżowanie jest operacją genetyczną, która łączy cechy dwóch rodziców, aby stworzyć potomstwo. Istnieje wiele różnych metod



krzyżowania, takich jak jednopunktowe krzyżowanie, dwupunktowe krzyżowanie, jednorodne krzyżowanie, krzyżowanie arithmetic blend itp.,

- f) Operator mutacji - mutacja wprowadza losowe zmiany w genotypie osobników w populacji, aby zwiększyć różnorodność genetyczną i zapobiec zatrzymaniu się w lokalnych optimum,
- g) Prawdopodobieństwo mutacji i krzyżowania - określają one prawdopodobieństwo wystąpienia operacji krzyżowania i mutacji dla każdego osobnika w populacji. Zbyt wysokie prawdopodobieństwo może prowadzić do zbyt szybkiego zbiegania się algorytmu do lokalnego optimum, podczas gdy zbyt niskie może prowadzić do braku różnorodności w populacji.

### **3.3. Algorytmy nawigacyjne**

Algorytmy nawigacyjne są kluczowym elementem systemów robotycznych, nawigacji GPS, gier komputerowych oraz wszelkich innych aplikacji wymagających efektywnego wyznaczania tras. Działają one na zasadzie przeszukiwania grafów, gdzie węzły reprezentują punkty, a krawędzie reprezentują ścieżki między tymi punktami. W zależności od charakterystyki środowiska i wymagań aplikacji, można wyróżnić dwa główne rodzaje algorytmów nawigacyjnych: statyczne i dynamiczne.

#### **3.3.1. Algorytmy statyczne**

Algorytmy statyczne operują w środowiskach, które nie ulegają zmianom w trakcie działania algorytmu. Oznacza to, że raz zbudowany graf nie zmienia swojej struktury, a wszystkie wagi krawędzi pozostają stałe. Algorytmy te są bardzo efektywne w stabilnych środowiskach, gdzie trasy można wyznaczyć raz i wykorzystać je wielokrotnie bez konieczności przeliczania. Przykładami takich algorytmów są Dijkstra i A\*.

Algorytm Dijkstry [8] jest jednym z najstarszych i najbardziej znanych algorytmów nawigacyjnych. Został zaproponowany przez E. W. Dijkstrę w 1956 roku. Jest to algorytm typu 'najpierw najlepszy' (ang. best-first), który znajduje najkrótszą ścieżkę z jednego węzła startowego do wszystkich innych węzłów w grafie z nieujemnymi wagami krawędzi.

Działanie algorytmu składa się z następujących kroków:

- a) Inicjalizacja - ustawienie odległości do węzła startowego na 0, a do wszystkich innych węzłów na nieskończoność. Wszystkie węzły są oznaczone jako nieodwiedzone,
- b) Wybór nieodwiedzonego węzła o najmniejszej znanej odległości (na początku jest to węzeł startowy),
- c) Aktualizacja odległości - dla wybranego węzła, zaktualizowanie odległości do jego sąsiadów, jeśli nowo obliczona odległość jest mniejsza niż aktualnie znana,
- d) Oznaczenie wybranego węzła jako odwiedzonego,
- e) Powtórzenie kroków b-d, aż wszystkie węzły zostaną odwiedzone.

Algorytm  $A^*$  [9] jest rozszerzeniem algorytmu Dijkstry, który wykorzystuje heurystykę, aby poprawić efektywność wyszukiwania. Został opracowany przez Petera Hart'a, Nilsa Nilssona i Bertrama Raphaela w 1968 roku.  $A^*$  jest algorytmem typu 'najpierw najlepszy', który łączy zalety wyszukiwania zachłannego i dynamicznego programowania.

Działanie algorytmu składa się z następujących kroków:

- a) Inicjalizacja - ustawienie odległości do węzła startowego na 0 i obliczenie wartości heurystycznej dla wszystkich węzłów (przykładowo, odległość Manhattan lub euklidesowa do celu),
- b) Wybór węzła o najmniejszej wartości funkcji  $f(x) = g(x) + h(x)$ , gdzie  $g(x)$  jest koszt dotarcia do węzła  $x$ , a  $h(x)$  jest oszacowany koszt dotarcia z węzła  $x$  do celu,
- c) Aktualizacja odległości do sąsiadów wybranego węzła i ich wartości funkcji  $f$ ,
- d) Oznaczenie wybranego węzła jako odwiedzonego,
- e) Powtórzenie kroków b-d, aż węzeł celowy zostanie odwiedzony.

### 3.3.2. Algorytmy dynamiczne

Algorytmy dynamiczne są zaprojektowane do działania w zmieniających się środowiskach. Mogą one dostosowywać swoje obliczenia w odpowiedzi na zmiany w grafie, takie jak zmieniające się wagi krawędzi lub dodawanie/odejmowanie węzłów. Algorytmy te

są bardziej złożone, ale niezbędne w sytuacjach, gdzie środowisko jest nieprzewidywalne lub zmienia się w czasie rzeczywistym. Przykładami algorytmów dynamicznych są D\* i D\* Lite.

Algorytm D\* (Dynamic A\*) [10] został zaproponowany przez Anthony'ego Stenz w 1994 roku. Jest to algorytm dynamicznego przeszukiwania grafów, który jest szczególnie użyteczny w środowiskach o zmieniających się warunkach. D\* pozwala na aktualizację już obliczonych tras w odpowiedzi na zmiany w grafie.

Działanie algorytmu składa się z następujących kroków:

- a) Inicjalizacja - wyznaczenie najkrótszej ścieżki do celu przy użyciu standardowych metod (np. Dijkstry),
- b) Replanowanie - w przypadku zmiany w grafie (np. pojawienie się przeszkody), algorytm replanuje trasę od miejsca zmiany do celu, wykorzystując istniejące informacje i aktualizując tylko zmienione fragmenty grafu,
- c) Aktualizacja kosztów - algorytm modyfikuje koszty krawędzi i dostosowuje trasę w odpowiedzi na zmiany,
- d) Kontynuacja - powtarzanie procesu replanowania w przypadku dalszych zmian, aż do osiągnięcia celu.

D\* Lite [11] jest uproszczoną i zoptymalizowaną wersją algorytmu D\*, opracowaną przez Svena Koeniga i Maxa Likhacheva w 2002 roku. D\* Lite zachowuje główne zalety D\*, ale jest łatwiejszy do implementacji i bardziej efektywny obliczeniowo.

Działanie algorytmu składa się z następujących kroków:

- a) Inicjalizacja - podobnie jak w D\*, inicjalizowanie grafu i wyznaczanie początkowej trasy do celu,
- b) Replanowanie - w przypadku zmiany w grafie, algorytm replanuje trasę, ale korzysta z bardziej zoptymalizowanego sposobu aktualizacji węzłów i krawędzi,
- c) Aktualizacja kosztów - podobnie jak w D\*, aktualizacja kosztów krawędzi i dostosowanie trasy, ale z wykorzystaniem efektywniejszych struktur danych i operacji,
- d) Kontynuacja - powtarzanie procesu replanowania w przypadku dalszych zmian, aż do osiągnięcia celu.

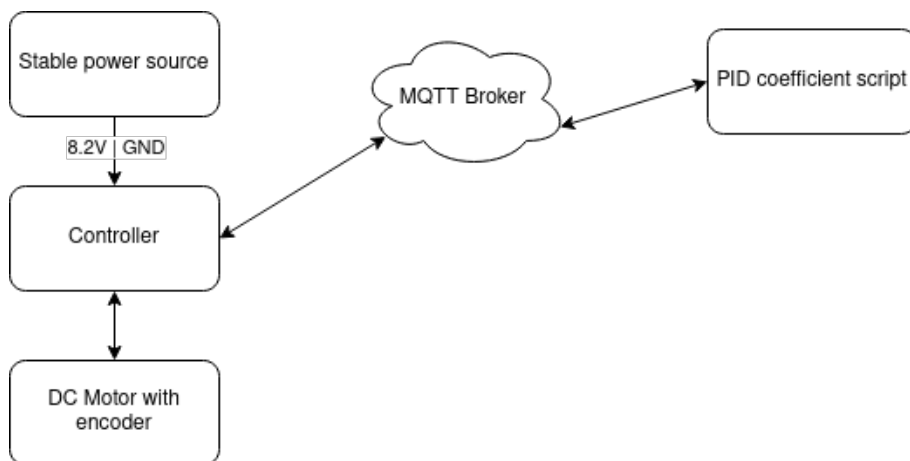
## 4. Badania

### 4.1. Optymalizacja nastaw regulatora PID prędkości obrotowej

Sekcja skupia się na opisie eksperymentu, który miał na celu porównanie jakości regulacji prędkości obrotowej silnika poprzez wyznaczenie nastaw metodą Zieglera-Nicholsa [12] i algorytmem genetycznym.

#### 4.1.1. Stanowisko pomiarowe

Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano stanowisko składające się z silnika prądu stałego, enkodera do pomiaru prędkości obrotowej oraz kontrolera. Stanowisko umożliwiało kontrolowanie prędkości obrotowej silnika oraz pomiar jej wartości w czasie rzeczywistym.

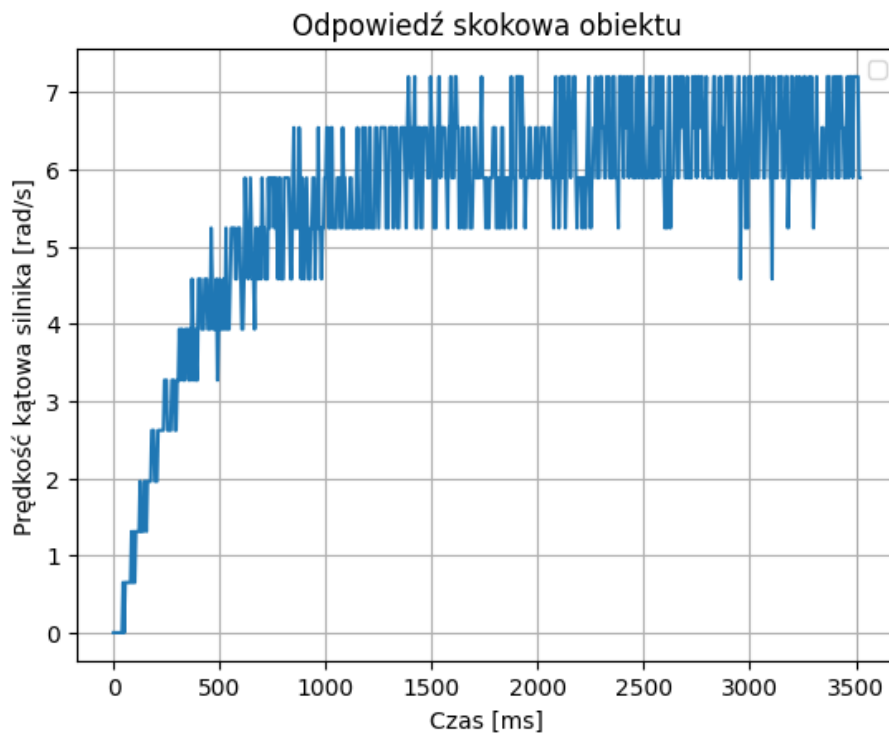


Rys. 4.1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

#### 4.1.2. Identyfikacja obiektu

Wykorzystując interfejs sieciowy kontrolera, przeprowadzono eksperyment, podczas którego monitorowano odpowiedź obiektu na skokowy sygnał sterujący. W trakcie tego eksperymentu rejestrowano zmiany prędkości obrotowej silnika w odpowiedzi na zmiany sygnału sterującego (figura 4.2). Dane te zostały następnie poddane analizie w celu wyznaczenia charakterystyki dynamicznej obiektu.

Aby dopasować odpowiedź obiektu do modelu transmitancji pierwszego rzędu, zastosowano metodę aproksymacji. Polegała ona na dopasowaniu odpowiedniego modelu matematycznego do zebranych danych eksperymentalnych. W tym przypadku, model transmitancji pierwszego rzędu pozwolił na odpowiednie odwzorowanie zachowania



Rys. 4.2. Odpowiedź obiektu

wania obiektu w kontekście zmian sygnału sterującego. Dzięki temu można było przewidywać reakcję obiektu na różne zmiany sterowania.

Listing 4.1. Kod aproksymujący odpowiedź

```

1 import numpy as np
2 from scipy.optimize import curve_fit
3
4 time_step=5/1000
5
6 t = np.arange(0, len(actuals) * time_step, time_step)
7 odpowiedz_skokowa=actuals
8
9 def first_order_transfer_function(t, K, T):
10     return K * (1 - np.exp(-t / T))
11
12 popt, pcov = curve_fit(first_order_transfer_function, t, odpowiedz_skokowa)
13 K, T=popt
14
15 print("Wzmocnienie (K):", K)
16 print("Stala czasowa (T):", T)

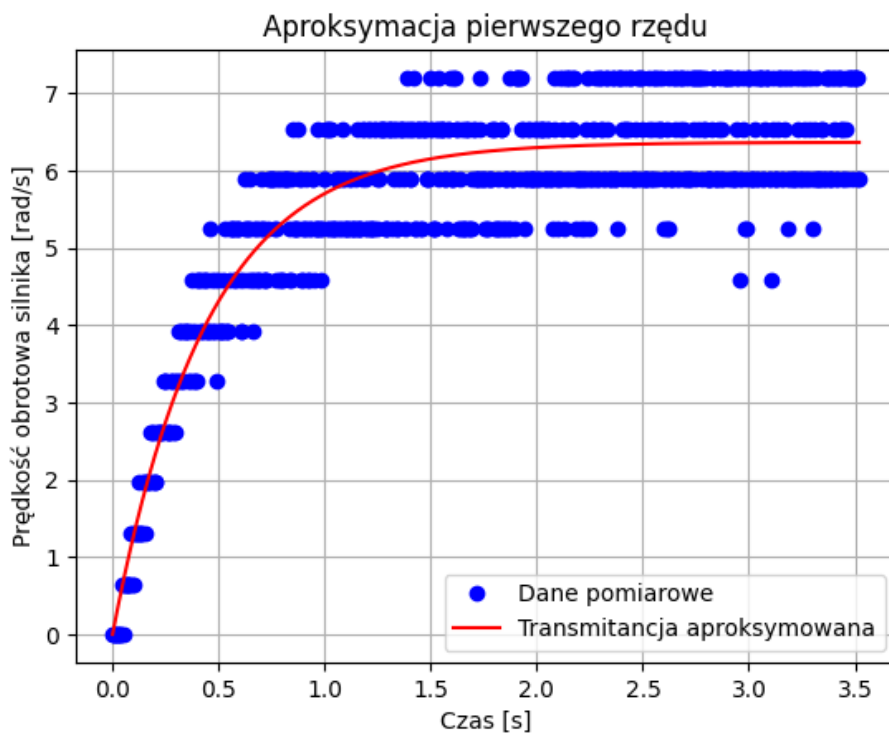
```

Wyżej przedstawiony kod (listing 4.1) służy do analizy danych eksperymentalnych reprezentujących odpowiedź skokową obiektu oraz aproksymowania tych danych do modelu transmitancji pierwszego rzędu. Najpierw tworzone są dane czasowe  $t$ , a następnie dane odpowiedzi skokowej  $odpowiedz\_skokowa$ . Definiowana jest funkcja `first_order_transfer_function`, która odpowiada transmitancji pierwszego rzędu. Następnie korzystając z funkcji `curve_fit` z biblioteki `scipy.optimize`, dopasowywany jest

model transmitancji pierwszego rzędu do danych odpowiedzi skokowej. Wynik dopasowania, czyli wartości wzmocnienia  $K$  i stałej czasowej  $T$ , są odczytywane z wyniku dopasowania i wyświetlane.

Rysunek 4.3 ukazuje aproksymację modelu transmitancji pierwszego rzędu do danych pomiarowych. Wyznaczoną transmitancję obiektu opisuje niżej umieszczony wzór 4.1:

$$G(s) = \frac{6.37}{1 + 0.44s} \quad (4.1)$$



Rys. 4.3. Aproksymacja transmitancji

### 4.1.3. Wyznaczenie nastaw metodą klasyczną

Niżej umieszczony kod (listing 4.2) wykorzystuje bibliotekę numpy do obliczenia nastaw regulatora PID na podstawie zadanych wartości wzmocnienia i czasu wyprzedzenia. Na początku definiuje wartości stałych  $K$  i  $T$ , a następnie wykorzystuje je do obliczenia współczynnika krytycznego ( $K_u$ ) oraz okresu oscylacji ( $T_u$ ). Następnie na podstawie  $K_u$  i  $T_u$  wylicza nastawy dla regulatora PD oraz PID, gdzie dla regulatora PD oblicza tylko proporcjonalną i całkową część, a dla regulatora PID dodaje również składową różniczkującą. Na końcu wypisuje obliczone wartości nastaw dla obu rodzajów regulatorów.

Listing 4.2. Kod z obliczeniami i wyświetleniem wyników

```
1 import numpy as np
2
3 K = 6.365318519867311
4 T = 0.4425290896955204
5
6 Ku = 4 / (np.pi * K)
7
8 Tu = np.pi * T
9
10 Kp_PID = 0.20 * Ku
11 Ti_PID = 0.50 * Tu
12 Td_PID = 0.12 * Tu
```

### 4.1.4. Algorytm genetyczny

Optymalizacja nastaw regulatora PID jest kluczowym zagadnieniem w automatyce, mającym na celu poprawę wydajności systemów sterowania, w tym regulacji prędkości obrotowej silników. W kontekście fizycznego robota, możliwe jest utworzenie pętli uczącej, która będzie wprowadzać nowe współczynniki PID i testować je na rzeczywistym sprzęcie. Ogólny algorytm PID oraz komunikacja są obsługiwane przez oprogramowanie wgrane do mikrokontrolera robota.

Z punktu widzenia automatyki, silnik prądu stałego jest stosunkowo prostym obiektem sterowania, co sprawia, że wiele zestawów parametrów może być odpowiednich do automatycznej regulacji prędkości. W związku z tym zdecydowano się na użycie algorytmu genetycznego do wyboru optymalnego zestawu współczynników PID.

Skrypt w języku Python zawierający implementację algorytmu genetycznego będzie uruchomiony na lokalnym serwerze. Każdy osobnik w populacji będzie testowany na fizycznym robocie w celu sprawdzenia jego dopasowania (fitness). Algorytm będzie uruchamiany trzykrotnie z różnymi zestawami parametrów:

#### a) Pierwszy eksperyment

- Rozmiar populacji: 100
- Maksymalna liczba epok: 25
- Prawdopodobieństwo krzyżowania: 70%
- Liczba rodziców dla nowego osobnika: 10
- Prawdopodobieństwo mutacji: 15%

**b) Drugi eksperyment**

- Rozmiar populacji: 200
- Maksymalna liczba epok: 25
- Prawdopodobieństwo krzyżowania: 70%
- Liczba rodziców dla nowego osobnika: 15
- Prawdopodobieństwo mutacji: 15%

**c) Trzeci eksperyment**

- Rozmiar populacji: 300
- Maksymalna liczba epok: 25
- Prawdopodobieństwo krzyżowania: 70%
- Liczba rodziców dla nowego osobnika: 25
- Prawdopodobieństwo mutacji: 15%

Ocena jakości regulacji będzie dokonywana na podstawie maksymalnego błędu regulacji, który musi być mniejszy lub równy 2%. Algorytm zakończy swoje działanie po osiągnięciu maksymalnej liczby epok lub gdy zostanie spełniony warunek maksymalnego błędu regulacji.

Funkcja dopasowania, którą algorytm będzie maksymalizować, została określona jako odwrotność średniego błędu względnego (wzór 4.2) .

$$Fitness = \frac{1}{error} \quad (4.2)$$

gdzie: *error* - wartość średniego błędu względnego



Listing 4.3. Konfiguracja MQTT

```

1 import paho.mqtt.client as mqtt
2 import json
3 import time
4
5 MQTT_BROKER = "mqtt-dashboard.com"
6 MQTT_PORT = 1883
7 MQTT_TOPIC_PID = "robot/set/pid"
8 MQTT_TOPIC_MOTORS = "robot/set/motors"
9 MQTT_TOPIC_LOG = "robot/pid/log"
10 MQTT_TOPIC_RESPONSE = "robot/request"
11
12 mqtt_client = mqtt.Client("PID Ctl")
13
14 logs = []
15 experiment_ongoing = False
16
17 def on_log_message(client, userdata, message):
18     global experiment_ongoing
19     log_data = json.loads(message.payload.decode())
20     if len(logs) != 0:
21         logs.append(log_data)
22     elif len(logs) == 0 and log_data["id"] == 0:
23         logs.append(log_data)
24
25 def send_mqtt_message(topic, message):
26     mqtt_client.publish(topic, json.dumps(message))

```

Wyżej umieszczony kod (listing 4.3) nawiązuje połączenie z brokerem MQTT, który umożliwia komunikację pomiędzy serwerem a robotem. Kluczowe elementy konfiguracji obejmują określenie adresu brokera oraz portu. Następnie zdefiniowano tematy MQTT do wysyłania i odbierania wiadomości dotyczących ustawień PID, sterowania silnikami oraz logowania. Dodatkowo zdefiniowano funkcje pomocnicze, takie jak `send_mqtt_message` do wysyłania wiadomości oraz `on_log_message` do obsługi wiadomości logowania.

Ta sekcja przedstawia funkcję `run_experiment` (listing 4.4), która inicjalizuje i przeprowadza eksperymenty z nowymi nastawami PID na robocie. Kluczowe kroki obejmują ponowne połączenie z brokerem MQTT i subskrybowanie tematów logowania, wysłanie nowych wartości współczynników PID do robota, uruchomienie silników robota i monitorowanie ich przez określony czas oraz zbieranie danych logowania do późniejszej analizy.

Listing 4.4. Funkcja uruchamiająca eksperyment

```

1 def run_experiment(Kp, Ti, Td):
2     global logs
3     global mqtt_client
4     global experiment_ongoing
5     mqtt_client = mqtt.Client("PID ctl")
6     mqtt_client.connect(MQTT_BROKER, MQTT_PORT)
7     mqtt_client.subscribe(MQTT_TOPIC_LOG)
8     mqtt_client.on_message = on_log_message
9
10    mqtt_client.loop()
11    logs = []

```

```

12 pid_settings = {"Kp": Kp, "Ti": Ti, "Td": Td}
13 send_mqtt_message(MQTT_TOPIC_PID, pid_settings)
14
15
16 motors_speed = {"left": 0, "right": 50}
17 send_mqtt_message(MQTT_TOPIC_MOTORS, motors_speed)
18 experiment_ongoing = True
19 start_time = time.time()
20 while time.time() - start_time < 2:
21     mqtt_client.loop()
22
23 motors_speed = {"left": 0, "right": 0}
24 send_mqtt_message(MQTT_TOPIC_MOTORS, motors_speed)
25
26 start_time = time.time()
27
28 while time.time() - start_time < 1:
29     mqtt_client.loop()
30
31 send_mqtt_message(MQTT_TOPIC_RESPONSE, "")
32 experiment_ongoing = False

```

Funkcja `calculate_errors` (listing 4.5) służy do obliczania błędów na podstawie danych logowania zebranych podczas eksperymentu. Kluczowe kroki obejmują obliczanie błędów absolutnych i względnych dla każdej próbki danych oraz obliczanie średniego błędu względnego, który jest używany jako miara jakości regulatora PID.

Listing 4.5. Funkcja obliczająca błędy

```

1 def calculate_errors(logs):
2     absolute_errors = []
3     relative_errors = []
4
5     for i in range(len(logs)):
6         measurement = logs[i]
7         absolute_error = abs(measurement['target'] - measurement['actual'])
8
9         if measurement['target'] != 0:
10             relative_error = (absolute_error / measurement['target']) * 100
11         else:
12             if measurement['actual'] == measurement['target']:
13                 relative_error = 0
14             else:
15                 relative_error = float(100)
16
17         absolute_errors.append(absolute_error)
18         relative_errors.append(relative_error)
19
20     mean_relative_error = (sum(relative_errors) / len(relative_errors)) if (len(
21         relative_errors)) != 0 else 10000
22
23     if (mean_relative_error) == 0.0:
24         return 10000
25
26     return mean_relative_error

```

Funkcja `fitness_func` (listing 4.6) ocenia jakość każdego zestawu współczynników PID, wykonując eksperyment z tymi współczynnikami i obliczając wynikowy błąd względny. Wynik jest używany przez algorytm genetyczny do wyboru najlepszych rozwiązań. Kluczowe elementy obejmują przeprowadzenie eksperymentu z podanymi

współczynnikami PID, wyliczenie średniego błędu względnego oraz zwrócenie wartości funkcji dopasowania, która jest odwrotnością błędu względnego.

Listing 4.6. Funkcja dopasowania

```
1 def fitness_func(ga_instance, solution, solution_idx):
2     global logs
3     global log_file
4
5     Kp, Ti, Td = solution
6     run_experiment(Kp, Ti, Td)
7
8     mean_relative_error = calculate_errors(logs)
9     logs = []
10    append_data_to_csv(log_file, [Kp, Ti, Td, mean_relative_error, ga_instance.
11    generations_completed])
12    print(mean_relative_error)
13
14    fitness = 1 / (mean_relative_error + 0.001)
15    return fitness
```

Funkcja `run_genetic_algorithm` (listing 4.7) inicjalizuje i uruchamia algorytm genetyczny z podanymi parametrami. Kluczowe kroki obejmują definicję problemu optymalizacyjnego poprzez określenie liczby genów (współczynników PID) oraz przestrzeni poszukiwań, inicjalizację algorytmu genetycznego z parametrami takimi jak liczba pokoleń, liczba rodziców, prawdopodobieństwo krzyżowania i mutacji, oraz wykonanie algorytmu i zapisanie najlepszego rozwiązania.

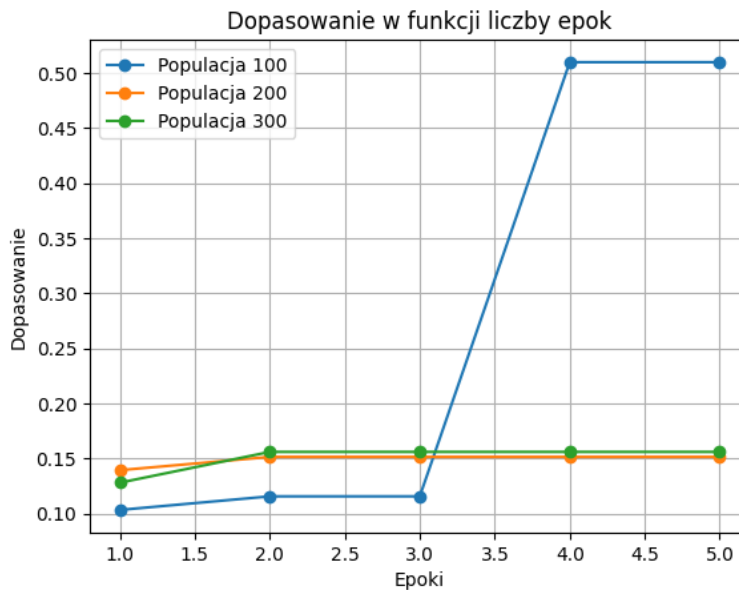
Listing 4.7. Uruchamianie algorytmu genetycznego

```
1 def run_genetic_algorithm(pop_size, max_epochs, crossover_prob, num_parents_mating,
2     mutation_prob, experiment_num):
3     num_genes = 3
4
5     on_generation = lambda x: save_best_solution(x, experiment_num)
6
7     ga_instance = pygad.GA(num_generations=max_epochs,
8         num_parents_mating=num_parents_mating,
9         sol_per_pop=pop_size,
10        num_genes=num_genes,
11        gene_space={'low': 0, 'high': 30},
12        crossover_probability=crossover_prob,
13        mutation_percent_genes='default',
14        mutation_probability=mutation_prob,
15        K_tournament=num_parents_mating,
16        fitness_func=fitness_func,
17        on_generation=on_generation,
18        mutation_type='scramble',
19        crossover_type="uniform",
20        parent_selection_type='tournament',
21        keep_parents=0,
22        gene_type=float,
23        random_mutation_min_val=10,
24        random_mutation_max_val=20
25    )
26
27    ga_instance.run()
28
29    best_solution = ga_instance.best_solution()
30    return best_solution
```

W tej sekcji (listing 4.8) kod inicjalizuje i przeprowadza serię eksperymentów z różnymi zestawami parametrów algorytmu genetycznego. Kluczowe kroki obejmują zdefiniowanie zestawów parametrów dla trzech różnych eksperymentów oraz iterację przez każdy zestaw parametrów, uruchamianie algorytmu genetycznego dla każdego z nich i zapisanie najlepszych rozwiązań.

Listing 4.8. Pętla przeprowadzająca eksperymenty

```
1 experiments_params = [  
2     {"pop_size": 100, "max_epochs": 25, "crossover_prob": 0.70, "num_parents_mating"  
3     : 10, "mutation_prob": 0.15},  
4     {"pop_size": 200, "max_epochs": 25, "crossover_prob": 0.70, "num_parents_mating"  
5     : 15, "mutation_prob": 0.15},  
6     {"pop_size": 300, "max_epochs": 25, "crossover_prob": 0.70, "num_parents_mating":  
7     20, "mutation_prob": 0.15}  
8 ]  
9  
10 for i, params in enumerate(experiments_params):  
11     print(f"Starting experiment {i+1} with params: {params}")  
12     best_solution = run_genetic_algorithm(  
13         pop_size=params["pop_size"],  
14         max_epochs=params["max_epochs"],  
15         crossover_prob=params["crossover_prob"],  
16         num_parents_mating=params["num_parents_mating"],  
17         mutation_prob=params["mutation_prob"],  
18         experiment_num=i+1  
19     )  
20     print(f"Best solution for experiment {i+1}: {best_solution}")
```



Rys. 4.4. Dopasowanie w funkcji czasu

Uruchomienie tak przygotowanego skryptu pozwoliło na uzyskanie trzech zestawów nastaw regulatora PID. Rysunek 4.4 ukazuje dopasowanie najlepszego osobnika danej populacji w funkcji czasu (epok). Biorąc pod uwagę kształty wykresów, można dojść do następującego wniosku: ze względu na prostotę obiektu, jakim jest silnik DC,

wiele różnych od siebie zestawów nastaw regulatora jest w stanie usatysfakcjonować stawiane przed nim wymagania, przez co algorytm genetyczny popada w stagnację po osiągnięciu lokalnego minimum.

#### 4.1.5. Porównanie otrzymanych wyników

Podczas przeprowadzania eksperymentu otrzymano następujące nastawy regulatora PID:

##### a) Ziegler-Nichols

- Kp: 0.04
- Ti: 0.695
- Td: 0.166

##### b) GA eksperyment 1

- Kp: 6.48
- Ti: 2.93
- Td: 2.34

##### c) GA eksperyment 2

- Kp: 29.50
- Ti: 14.54
- Td: 1.37

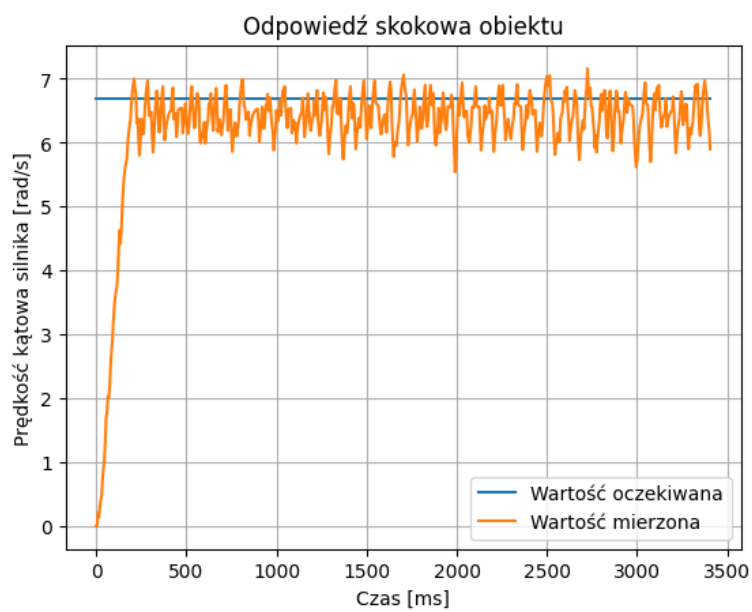
##### d) GA eksperyment 3

- Kp: 11.98
- Ti: 1.59
- Td: 1.34

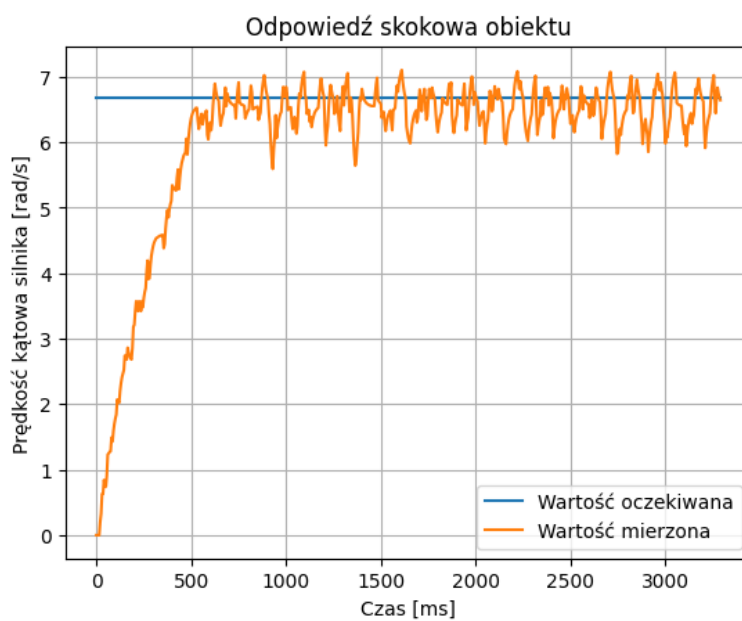
By porównać jakość wyznaczonych nastaw, należało przestroić regulator i zbadać odpowiedź obiektu na zmianę sygnału sterującego.

Tablica 4.1. Zestawienie wyników

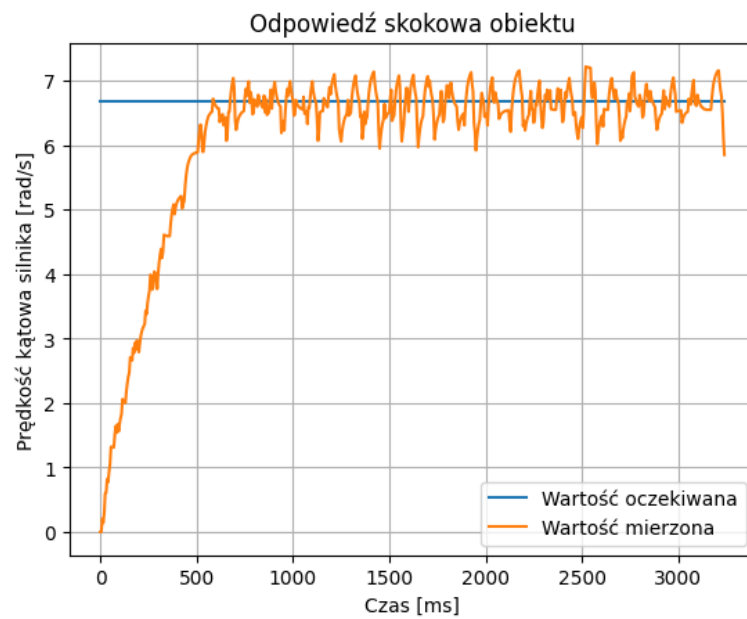
Metoda	Czas ustalania [ms]	Uwagi
Ziegler-Nichols	190	Niedoregulowanie
GA eksperyment 1	630	Niedoregulowanie
GA eksperyment 2	600	Satysfakcjonująca regulacja
GA eksperyment 3	600	Satysfakcjonująca regulacja



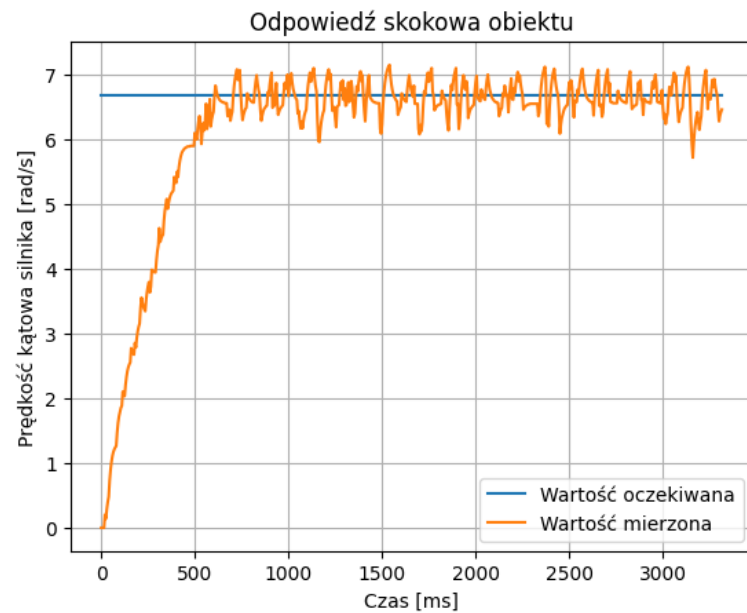
Rys. 4.5. Nastawy wyznaczone metodą Zieglera-Nicholsa



Rys. 4.6. Nastawy wyznaczone przez algorytm genetyczny (1)



Rys. 4.7. Nastawy wyznaczone przez algorytm genetyczny (2)



Rys. 4.8. Nastawy wyznaczone przez algorytm genetyczny (3)

Po sprawdzeniu odpowiedzi obiektu na wyznaczone nastawy, podjęto decyzję o wykorzystaniu wyniku trzeciego eksperymentu. Wybór jest uzasadniony kilkoma kluczowymi czynnikami. Przede wszystkim, w porównaniu z innymi metodami, nastawy te zapewniły satysfakcjonującą regulację systemu (Rysunek 4.8). Czas ustalania wynosił 600 ms, co jest wynikiem porównywalnym z najlepszymi nastawami uzyskanymi w innych eksperymentach. Dodatkowo, podczas eksperymentu nastawy GA 3 wykazały najlepszy wynik fitness, co oznacza, że algorytm genetyczny skutecznie dostroił parametry regulatora w celu optymalnej regulacji systemu. W związku z tym, można uznać, że nastawy te są najkorzystniejsze pod względem jakości regulacji i efektywności działania systemu. Podczas testów z nastawami wyznaczonymi metodą Zieglera-Nicholsa (Rysunek 4.5) zaobserwowano, że jedno z kół nie chciało wystartować, co świadczy o niedostatecznej regulacji. Oznacza to, że te nastawy nie były w stanie zapewnić właściwej kontroli nad całym systemem, co może prowadzić do niestabilności i niesatysfakcjonującej wydajności. Czas ustalania wynoszący 190 ms jest krótki, ale ze względu na problem z jednym z kół, regulacja nie była wystarczająco dobra.

#### **4.2. Porównanie algorytmów nawigacyjnych w terenie bez przeszkód**

TODO

#### **4.3. Porównanie algorytmów nawigacyjnych w terenie z przeszkodami**

TODO



## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

## Załączniki

## Literatura

- [1] [https://github.com/DevxMike/master\\_degree](https://github.com/DevxMike/master_degree)
- [2] Francois Chollet: Deep Learning. Praca z językiem Python i biblioteką Keras. Helion 2019
- [3] Paweł Cichosz: Systemy uczące się. WNT 2007
- [4] Riccardo Poli, William B. Langdon, Nicholas F. McPhee, John R. Koza: A Field Guide to Genetic Programming. Lulu Enterprises Uk Ltd 2008
- [5] [https://mfiles.pl/pl/index.php/Automotive\\_SPICE](https://mfiles.pl/pl/index.php/Automotive_SPICE)
- [6] <https://en.cppreference.com/w/cpp/container/array>
- [7] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator\\_PID](https://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator_PID)
- [8] [http://algorytmy.ency.pl/artukul/algorytm\\_dijkstry](http://algorytmy.ency.pl/artukul/algorytm_dijkstry)
- [9] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Algorytm\\_A\\*](https://pl.wikipedia.org/wiki/Algorytm_A*)
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/D\\*](https://en.wikipedia.org/wiki/D*)
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/D\\*#D\\*\\_Lite](https://en.wikipedia.org/wiki/D*#D*_Lite)
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method)

## **STRESZCZENIE PRACY DYPLOMOWEJ MAGISTERSKIEJ**

### **PORÓWNANIE ALGORYTMÓW NAWIGACYJNYCH**

Autor: Michał Bazan, nr albumu: EF-163881

Opiekun: dr inż. Dariusz Rzońca

Słowa kluczowe: (Algorytmy nawigacyjne, Robot mobilny, Inżynieria, ASPICE, Machine Learning)

Praca koncentruje się na badaniu wybranych algorytmów nawigacyjnych oraz metod optymalizacji nastaw regulatorów PID z wykorzystaniem zbudowanego robota mobilnego, który został skonstruowany zgodnie z procedurami ASPICE. Celem jest ocena dokładności, szybkości wyznaczania trasy oraz ogólnej wydajności tych algorytmów. Analiza wyników pozwoli wyciągnąć wnioski dotyczące skuteczności i efektywności badanych algorytmów nawigacyjnych. Dzięki zastosowaniu standardów ASPICE zapewniona została wysoka jakość procesu budowy robota, co umożliwia rzetelne i wiarygodne badania nad jego funkcjonalnością i algorytmami nawigacyjnymi.

RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Faculty of Electrical and Computer Engineering

Rzeszów, 2024

## **MSC THESIS ABSTRACT**

### **COMPARISON OF NAVIGATION ALGORITHMS**

Author: Michał Bazan, album number: EF-163881

Supervisor: Dariusz Rzońca, dr. engineer

Key words: (Navigation algorithms, Mobile robot, Engineering, ASPICE, Machine Learning)

The work focuses on the study of selected navigation algorithms and methods for optimising PID controller settings using a built mobile robot that has been constructed according to ASPICE procedures. The aim is to evaluate the accuracy, routing speed and overall performance of these algorithms. Analysis of the results will allow conclusions to be drawn regarding the effectiveness and efficiency of the navigation algorithms studied. Through the use of ASPICE standards, the high quality of the robot construction process is ensured, enabling reliable and credible research into its functionality and navigation algorithms.