

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)
SPECJALNOŚĆ: Systemy informatyczne w automatyce (ASI)

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Budowa i oprogramowanie robota klasy (2,0) ze
zdalnym interfejsem sterowania

Hardware and software design of remotely
controlled (2,0) class robot

AUTOR:
Kornel Mrozek

PROWADZĄCY PRACĘ:
Dr inż. Janusz Jakubiak

OCENA PRACY:

Spis treści

1	Wprowadzenie	3
1.1	Cel projektu	3
1.2	Założenie projektowe	3
2	Konstrukcja sprzętowa	5
2.1	Platforma mechaniczna	5
2.2	Konstrukcja elektroniczna	6
2.2.1	Bazowy obwód	8
3	Oprogramowanie robota mobilnego	11
3.1	Struktura oprogramowania	11
3.2	Konfiguracja mikrokontrolera	12
3.3	Realizacja komunikacji Bluetooth	13
3.4	Proces przetwarzania wiadomości	15
3.5	Zabezpieczenia robota	16
3.6	Realizacja odczytu prędkości	17
3.7	Układ regulacji	20
4	Oprogramowanie aplikacji sterującej	23
4.1	Struktura oprogramowania	23
4.2	Moduł kontroli komunikacji Bluetooth	24
4.3	Moduł sterowania tekstowego	25
4.3.1	Użycie silnika JavaScript w aplikacji	27
4.4	Moduł sterowania graficznego	28
4.4.1	Bazowy blok sterujący	30
4.4.2	Bloki sterujące dostępne w aplikacji	32
4.4.3	Synchronizacja aktywności bloków	35
5	Prezentacja możliwości wykonanego projektu	37
5.1	Dobór nastaw regulator	37
5.2	Ustawianie trasy robota za pomocą skryptu	39
5.3	Prezentacja graficznego sterowania	40
6	Podsumowanie	41
A	Protokół komunikacyjny	43
A.1	Spis wiadomości kontrolnych	43
B	Płyta CD	47

Rozdział 1

Wprowadzenie

Robot mobilny klasy 2,0 jest robotem posiadającym dwukołowy napęd różnicowy. Jednym z kryteriów podziału robotów mobilnych jest ze względu na ilość niezależnych sterowań prędkością obrotową kół oraz ich orientacją. Robot wybranej klasy posiada możliwość niezależnego sterowania prędkością obrotową każdego z kół, bez możliwości zmiany ich orientacji.

1.1 Cel projektu

Celem projektu było zbudowanie fizycznego robota mobilnego 2.0 wraz z napisaniem oprogramowania na mikrokontroler oraz aplikacji, która umożliwia zdalne sterowanie robotem. Głównym celem pracy było umożliwienie jak największej interakcji z robotem zarówno w czasie rzeczywistym, jak i za pomocą komend tekstowych z możliwością pisania skryptów. Aplikacja kliencka miała zawierać podstawową funkcjonalność edytora tekstowego z możliwością uruchamiania skryptów oraz interfejs graficzny pozwalający na wizualizację stanu robota i sterowanie za pomocą myszki.

1.2 Założenie projektowe

Projekt zakłada przygotowanie modelu mechanicznego zawierającego dwukołowy napęd różnicowy wraz z układem elektronicznym umożliwiającym sterowanie silnikiem prądu stałego, jak również odczytem prędkości obrotu wału silnika. Komunikacja bezprzewodowa wykonana została w technologii Bluetooth, co wynikało z popularności rozwiązania oraz dużej dostępności rozwiązań sprzętowych oraz programowych. Oprogramowanie mikrokontrolera zawiera:

- komunikację dwukierunkową interfejsu szeregowego
- asynchroniczną reakcję na otrzymane wiadomości z zewnątrz
- obsługę zliczania impulsów (wymagane przy odczycie prędkości)
- układ regulacji prędkości
- zabezpieczenie przed utratą transmisji

Aby możliwa była komunikacja między robotem a otoczeniem z zewnątrz, wymagane jest przygotowanie protokołu komunikacyjnego dającego aplikacji interfejs, na którym

może operować. Zdecydowano się na implementację komunikacji typu klient-serwer, w której platforma mobilna realizuje komendy aplikacji sterującej. Aplikacja sterująca, zgodnie z celem projektu, ma umożliwiać szeroki zakres form sterowania opierając się na wyżej wymienionym protokole. Oprogramowanie sterujące zakłada:

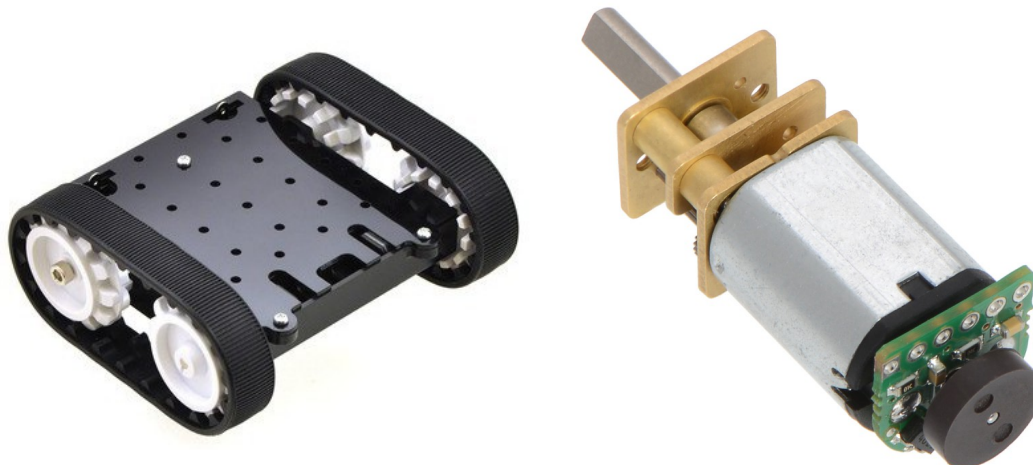
- możliwość zapisu i odczytu danych w standardzie Bluetooth poprzez wirtualny port COM
- możliwość sterowania robotem za pomocą komend tekstowych. Punkt ten zakłada przygotowanie modułu interpretera do wprowadzania komend/skryptów oraz wykorzystanie silnika języka JavaScript
- możliwość sterowania w czasie rzeczywistym udostępniając interfejs graficzny

Rozdział 2

Konstrukcja sprzętowa

2.1 Platforma mechaniczna

Platforma mechaniczna robota oparta jest o model Zumo Chassis Kit firmy Pololu. Konstrukcja zaprojektowana jest z myślą o wykorzystaniu innych produktów spod znaku tej firmy, przede wszystkim silników prądu stałego. Z tego powodu umożliwia ona pełną i bezproblemową integrację z zastosowanym napędem. Najważniejszym elementem modelu jest obecność gąsienicowego układu bieżnego. Zwiększa to powierzchnię styku z podłożem, co polepsza przyczepność.



(a) Platforma mechaniczna

(b) Silnik wraz enkoderem

Rysunek 2.1: Elementy mechaniczne (materiały dystrybutora)

Wymiary modelu mechanicznego:

- wymiary pełnego modelu: 8.6[cm] x 9.8[cm]
- odległość pomiędzy kołami (pomiar od środka gąsienicy): 7.56[cm]
- przestrzeń na podstawę elektroniczną: 7.1[cm] x 8.0[cm]
- średnica koła: 1.56[cm]

Napędami są miniaturowe silniki Pololu HP z dwustronną osią. Silnik posiada przekładnię 50:1, co ogranicza prędkość obrotową wału silnika, zwiększając jednocześnie jego moment. Obustronny wał pozwala na wygodny montaż enkoderów wykorzystywanych przy pomiarze prędkości obrotowej silnika. Parametry silnika:

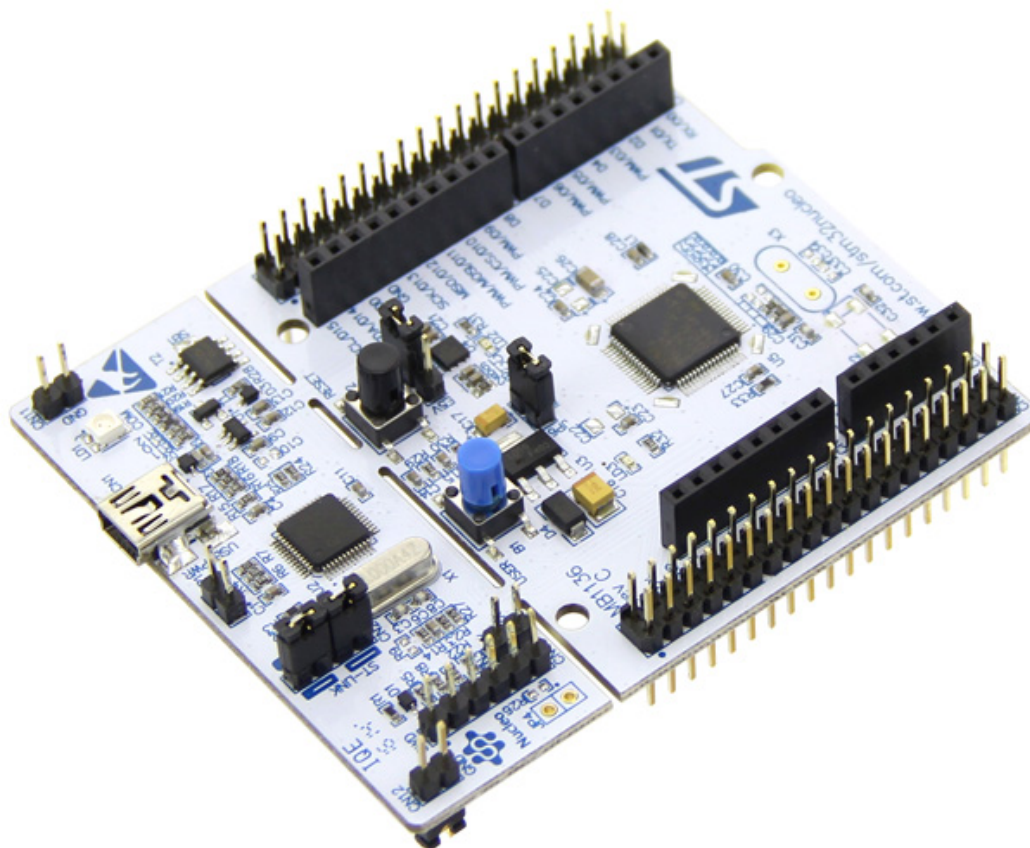
- Maksymalne napięcie pracy: 9[V]
- Prędkość obrotowa dla napięcia 6[V]: 625 obrotów na minutę
- Moment obrotowy dla napięcia 6[V]: 1.1 [kg*cm]
- Maksymalny prąd dla napięcia 6[V]: 1600[mA]

Wybór silnika podyktowany był nie tylko możliwościami jakie oferuje, ale przede wszystkim pełną integracją z modelem mechanicznym oraz enkoderami (montaż zaprezentowany jest na rysunku powyżej). Użycie dedykowanych elementów przyspieszyło konstrukcję modelu oraz zapobiegło błędom montażowym.

2.2 Konstrukcja elektroniczna

Na konstrukcję elektroniczną robota składają się 4 moduły:

- układ Nucleo F401RE z mikrokontrolerem STM32F401
- moduł Bluetooth HC-05
- zestaw enkoderów magnetycznych
- bazowy obwód łączący układ Nucleo z silnikami
- akumulator LiPol Redox 7.4 V 500mAh



Rysunek 2.2: Układ Nucleo F401RE(materiały dystrybutora)

Elektronika robota opera się o układ Nucleo F401RE. Sercem układu jest mikrokontroler STM32F401. Posiada on 32-bitową architekturę opartą o rdzeń ARM Cortex M-4 i może być taktowany do 84 MHz. Wydajna jednostka obliczeniowa wraz z sprzętową obsługą operacji na liczbach zmiennoprzecinkowych była kluczowa przy realizacji projektu. Oprócz szybkiego przetwarzania danych od mikrokontrolera wymagana była sprzętowa realizacja komunikacji szeregowej oraz duża liczba timerów. STM32F401 posiada kontroler DMA (ang. Direct Memory Access), pozwalający przeprowadzać transmisję danych bez obciążania procesora, jak również 10 sprzętowych timerów, co pokrywa wymagania projektowanego systemu. Parametry STM32F401:

Parametry STM32F401:

- Częstotliwość taktowania: 84[MHz]
- Pamięć trwała Flash: 512kB
- Pamięć Static RAM: 96kB
- Ilość programowalnych wejść/wyjść: 81
- Interfejsy: 3x I2C, 3x USART, 4x SPI, USB 2.0 Full Speed

Poza wypowiedzeniami pinów mikrokontrolera, istotnymi elementami w Nucleo F401RE są stabilizatory napięcia na 3.3V i 5V z możliwością zasilania bateryjnego od 9V do 12V oraz programator/debuger ST-Link v2 .

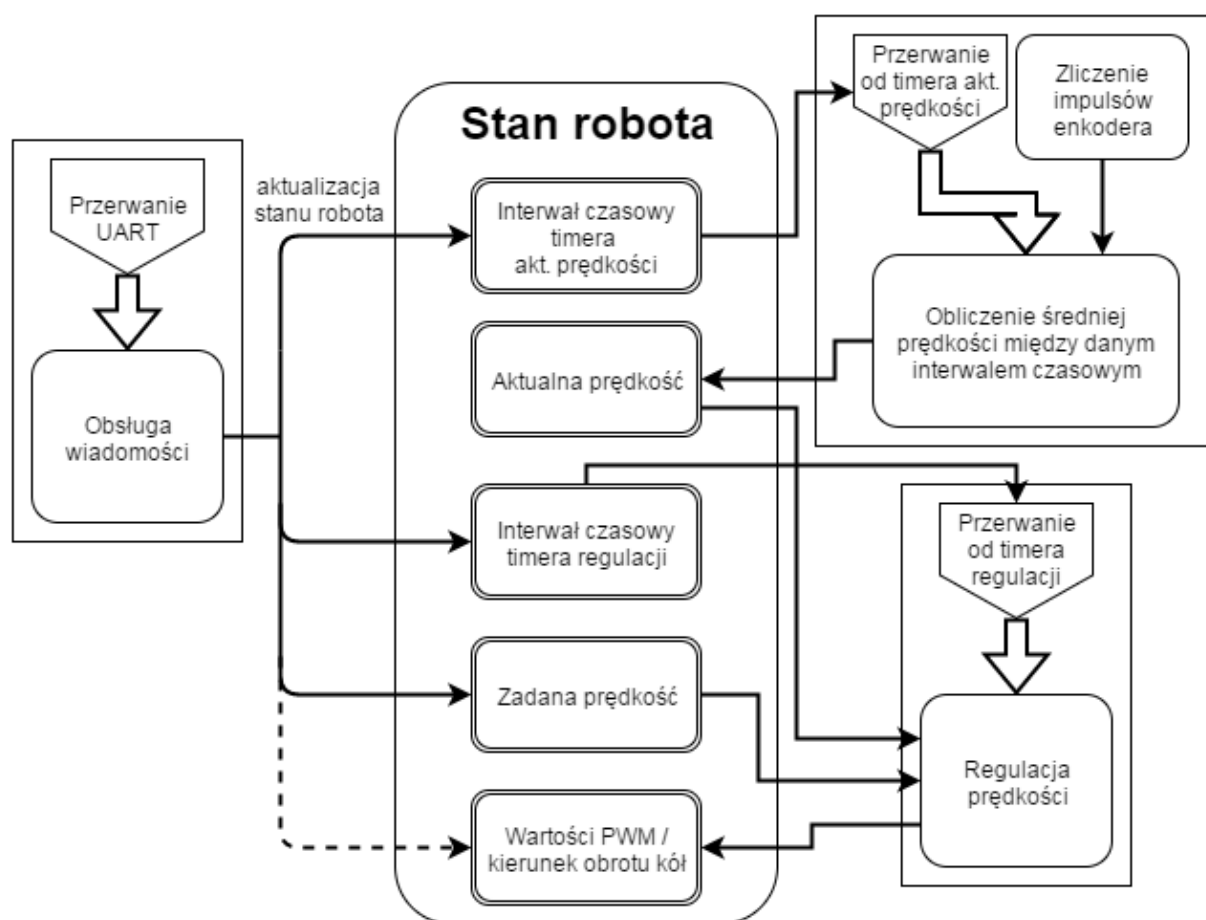
Komunikację bezprzewodową w standardzie Bluetooth umożliwia moduł HC-05. Techniczne szczegóły opisane są w rozdziale 3.3. Najważniejsze parametry HC-05:

przez układ scalony TB6612FNG, który pozwala na kontrole kierunku obrotów dwóch silników oraz regulację ich prędkości sygnałem PWM (ang. Pulse Width Modulation). Zasilanie silników oraz wyprowadzenia enkoderów połączone są z układem za pośrednictwem złącz micromatch.

Rozdział 3

Oprogramowanie robota mobilnego

3.1 Struktura oprogramowania



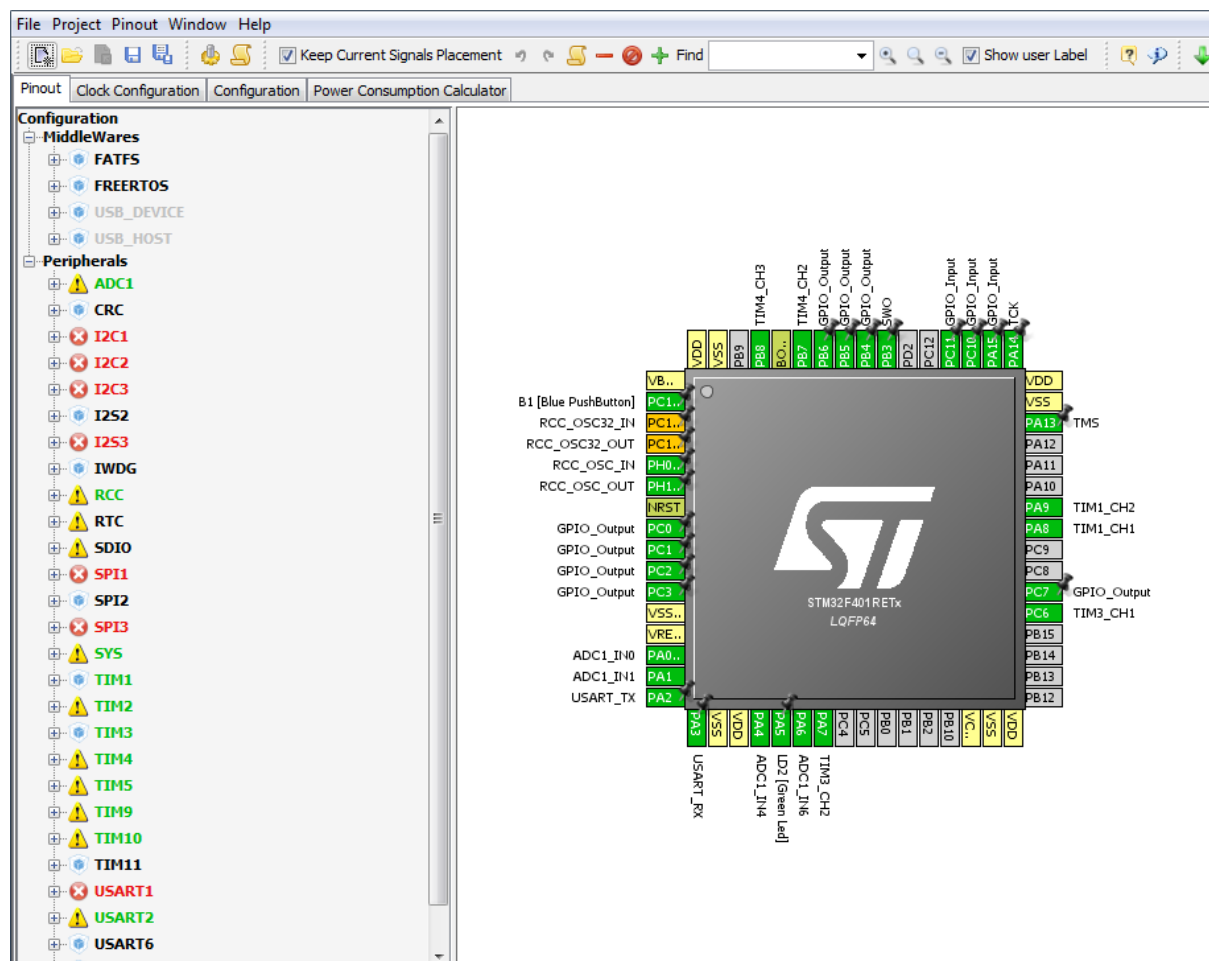
Rysunek 3.1: Schemat blokowy głównego algorytmu robota

Oprogramowanie napisane jest w języku C w wykorzystaniu bibliotek HAL (Hardware Abstraction Layer) udostępnionych przez firmę STMicroelectronics. Powyższy schemat ilustruje działanie podstawowej funkcjonalności robota czyli regulację prędkości. Centralny blok odzwierciedla aktualny stan robota, zrealizowany z pomocą zmiennych globalnych. Strzałki oznaczają kierunek przepływu danych pomiędzy poszczególnymi komponentami. Grube strzałki reprezentują zdarzenie wyzwalające działanie danego komponentu. Linia przerywaną wyróżniona została niestandardowa operacja, która bez uprzedniej zmiany konfiguracji robota nie jest możliwa podczas procesu regulacji (więcej na ten temat znaj-

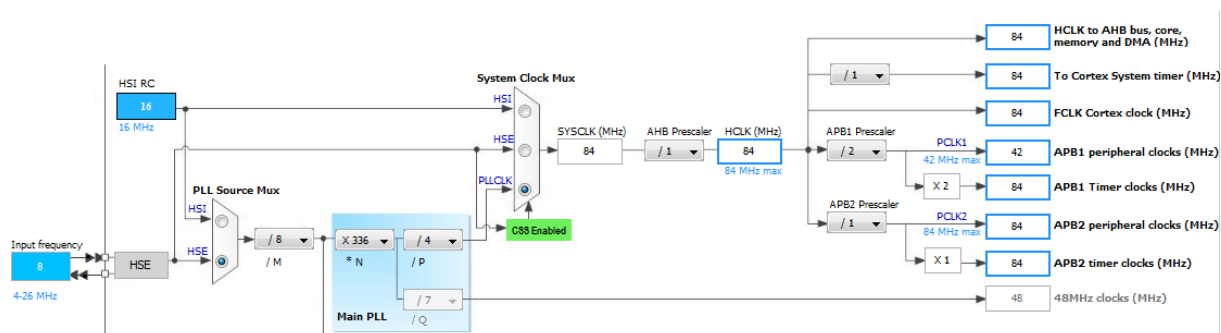
dują się w dodatku A). Poszczególne bloki zostały szczegółowo opisane w dalszej części tego rozdziału.

3.2 Konfiguracja mikrokontrolera

Konfiguracja mikrokontrolera wykonana jest przy użyciu oprogramowania STMCubeMX. Pozwala one w bezpieczny i wygodny sposób dokonać konfiguracji.



Rysunek 3.2: Konfiguracja pinów mikrokontrolera



Rysunek 3.3: Konfiguracja taktowania

Mikrokontroler jest taktowany z częstotliwością 84 MHz. Źródłem taktowania jest rezonator kwarcowy 8 MHz, którego częstotliwość jest powielana przez wewnętrzną pętlę PLL.



Rysunek 3.4: Wykorzystane komponenty STM32F401

Oprogramowanie wykorzystuje 7 sprzętowych timerów, obsługę transmisji szeregowej UART, magistrale DMA oraz kontroler przerw NVIC. Oprogramowanie nie zawiera żadnej instrukcji w pętli głównej programu, zachowanie robota jest całkowicie sterowane sprzętowymi przerwami.

3.3 Realizacja komunikacji Bluetooth

Komunikacja Bluetooth wykorzystuje obsługę dwóch komponentów mikrokontrolera, interfejsu szeregowego UART oraz technikę DMA. UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) umożliwia asynchroniczne wysyłanie i odbieranie danych przez port szeregowy. Wykorzystanie modułu Bluetooth ogranicza się do połączenia linii danych TX (wysyłanie) mikrokontrolera z linią danych RX (odbiór) układu HC-06 oraz analogicznie linii RX mikrokontrolera z linią TX modułu. Transmisja bezprzewodowa jest przezroczysta z poziomu mikrokontrolera. Interfejs UART konfigurowany jest przez podanie 4 wartości określających transmisję:

- prędkość transmisji (ang. Baud rate)
- długość słowa
- ilość bitów stopu
- bit parzystości (kontrola błędów odbioru danych)

Wykorzystana została standardowa konfiguracja prędkości: 9600, 8-bitowe słowo, jeden bit stopu, brak bitów parzystości.

DMA jest modulem, który umożliwia bezpośredni dostęp do pamięci RAM i układów peryferyjnych. Układ DMA umożliwia transfer danych pomiędzy urządzeniem peryferyjnym a pamięcią RAM bez angażowania procesora, którego zadanie ogranicza się do konfiguracji urządzenia. Komponent został użyty do przesyłu i odbioru danych pomiędzy układem UART i dziesięciobajtowym obszarem pamięci RAM. Włączenie odbioru danych szeregowych z użyciem DMA:

```

1 int8_t command[10];
2 HAL_UART_Receive_DMA(&huart2, command, sizeof(command));

```

Argumentami tej funkcji są adres obiektu obsługującego interfejs UART, dziesięciobajtowy obszar pamięci (tablica dziesięciu bajtów utworzona w globalnej przestrzeni pamięci) oraz długość tego obszaru.

Asynchroniczność transmisji możliwa jest poprzez obsługę przerwania które generuje UART po zakończeniu transmisji. Biblioteki HAL zapewniają niskopoziomową obsługę przerwania oraz deklaracje zestawu funkcji zwrotnych które zostają wykonane w odpowiedzi na zarejestrowane przerwania. Obsługa zakończenia transmisji:

```

1 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
2 {
3     int8_t response[10];
4     int8_t currentCommand[10];
5     uint8_t index = 0;
6     for(; index < 10; ++index)
7         currentCommand[index] = command;
8     if(getTimerTimeout(&htim9))
9         stopBluetoothTimer();
10    commandHandler(currentCommand, response);
11    HAL_UART_Transmit_DMA(&huart2, response, 10);
12    if(getTimerTimeout(&htim9))
13        startBluetoothTimer();
14 }

```

Funkcja jest uniwersalnym handlerem, każdego przerwania generowanego przez interfejs szeregowy. Obiekt UART komponentu, który wywołał przerwania jest przekazywany jako argument funkcji. Z uwagi na to, że używany jest jeden interfejs szeregowy, nie ma potrzeby sprawdzania czy to on jest źródłem przerwania. Funkcja tworzy tablicę bajtów - response, która wraz z kopią odebranej komendy przekazywana jest do funkcji obsługującej daną wiadomość. Obsługa wiadomości oraz zastosowany timer opisany jest w dalszej części tego rozdziału.

Asynchroniczny sposób komunikacji z robotem może prowadzić do sytuacji, podczas której odebrana zostanie wiadomość, zanim poprzednia zostanie obsłużona. Dodatkową komplikacją w tej sytuacji jest użycie DMA, które wypełnia wartości w pamięci z pominięciem pracy, a tym samym kontroli procesora. Praca, na tym samym obszarze pamięci, które wypełnia DMA podczas obsługi, mogłaby skutkować zmianą wartości tablicy podczas odczytu danych. Z tego powodu pierwszym etapem w obsłudze przerwania jest utworzenie kopii tablicy command i praca na duplikacie. To rozwiązanie zwiększa stabilność przetwarzania wiadomości, ale nie rozwiązuje problemu całkowicie. Nowa wiadomość mogłaby pojawić się podczas tworzenia duplikatu, co znów generuje ten sam problem. Z pomocą przychodzi tutaj sprzętowa obsługa przerwania w mikrokontrolerach STM. Przetworzenie wiadomości wywoływana jest w obsłudze przerwania, które kończy się dopiero po zaaplikowaniu komendy. Kontroler przerwania NVIC w przypadku takiego samego priorytetu tworzy kolejkę LIFO przerwania, a następnie kolejno przekazuje sterowanie po zakończeniu aktualnie wywołanej funkcji obsługi. Z tego powodu handler nie wywołuje się przed zakończeniem przetwarzania bieżącej komendy. Poza wyżej wymienionymi zabezpieczeniami, omawiany błąd eliminowany jest przez konstrukcję protokołu komunikacyjnego z aplikacją sterującą. Zgodnie z nim aplikacja nie wysyła następnej wiadomości bez otrzymania odpowiedzi na poprzednią, w przypadku prawidłowej wymiany danych rozwiązuje ten problem.

3.4 Proces przetwarzania wiadomości

W poprzednim rozdziale zaprezentowana jest obsługa przerwania od zakończenia transmisji szeregowej. Obecna jest funkcja „commandHandler” odpowiedzialna za obsługę wiadomości i uformowanie odpowiedzi. Struktura funkcji „commandHandler” (dla czytelności fragment funkcji, został pominięty):

```

1
2 int8_t* commandHandler(int8_t* command,int8_t* response)
3 {
4     if(command[0] != 'B' || command[4] != 'M' || command[9] != 'E'
5         )
6         return invalidMessage(response);
7     if(command[1] == 1)
8     {
9         //set speed
10        returnsetVelocityResponse(command,response);
11    }
12    if(command[1] == 2)
13    {
14        //get speed
15        returngetVelocityResponse(command,response);
16    }
17    //(...)
18    if(command[1] == 14)
19    {
20        //set direction pins
21        returnsetMotorsDirection(command,response);
22    }
23    if(command[1] == 15)
24    {
25        //get direction pins
26        returngetMotorsDirection(command,response);
27    }
28    returninvalidMessage(response);
29 }
```

Działanie prezentowanej funkcji jest ściśle związane z protokołem komunikacyjnym pomiędzy robotem a aplikacją sterującą. Zagadnienie to jest szczegółowo opisane w dodatku A. Początek funkcji sprawdza, czy na odpowiednich pozycjach występują wartości stałe i charakterystyczne dla każdej wiadomości, w przeciwnym wypadku wysyłana jest wiadomość informująca o błędzie. Na podstawie identyfikatora wiadomości wywoływana jest odpowiednia funkcja obsługi.

Obsługa wiadomości zaprezentowana na przykładzie komendy zadającej prędkość w układzie regulacji:

```

1
2 int8_t* setVelocityResponse(int8_t* command,int8_t* response)
3 {
4     uint8_tindex = 0;
5     for(;index<10; ++index)
6         response[index] = 0;
7     response[0] = 'B';
8     response[1] = command[1];
9     response[2] = command[2];
10    response[3] = command[3];
11    response[4] = command[5];
12    response[5] = command[6];
13 }
```

```

13         if(command[2] == 0&& command[3] == 0&& command[5] == 0&&
           command[6] == 0)
14     {
15         stopMotors();
16         return response;
17     }
18     int8_t data[2];
19
20     data[0] = command[2];
21     data[1] = command[3];
22     setLeftSpeed = byte2Float(data);
23
24     data[0] = command[5];
25     data[1] = command[6];
26     setRightSpeed = byte2Float(data);
27
28     if(command[7] != 0&& command[8] != 0)
29     {
30         data[0] = command[7];
31         data[1] = command[8];
32         uint32_t timer = byte2int(data);
33
34         startSpeedTimer(timer);
35     }
36
37     return response;
38 }

```

Każda funkcja początkowo wypełnia odpowiedź zerami i wartościami stałymi. Dla wiadomości typu „ustaw” odpowiedź powinna być identyczna jak komenda przychodząca. Dzięki temu aplikacja sterująca może mieć pewność, że ustawione zostały podane wartości. Pobór fatycznych wartości ustawionych na robocie odbywa się za pomocą wiadomości typu „pobierz”. Zaprezentowana wiadomość ustawia 3 pozycje: prędkość lewego koła, prędkość prawego koła (w cm/s) oraz (opcjonalnie) czas trwania zadanego ruchu. Wiadomości ustawiające prędkość charakteryzują się jeszcze jedną właściwością. Mając wszystkie pola wartości wypełnione zerami, wywołuje się funkcja zatrzymania silników robota. Jest to jedna z form zabezpieczenia. Warunek ten jest sprawdzany od razu po uformowaniu odpowiedzi. Kolejnym etapem jest konwersja odpowiednich bajtów na liczbę zmiennoprzecinkową i zapis wartości do globalnej zmiennej określającej zadaną prędkość dla danego koła. Ostatnim etapem obsługi wiadomości jest ustawienie czasu trwania długości danego ruchu. Jeżeli pola nie są wypełnione zerami wystartuje timer z przesłanymi danymi ilościami milisekund i po tym czasie zostaną zatrzymane silniki. W przeciwnym razie zadana prędkość będzie się utrzymywała aż do jej zmiany.

3.5 Zabezpieczenia robota

Podstawową funkcją wykorzystywaną we każdej formie zabezpieczeń robota jest funkcja stopMotors:

```

1 void stopMotors(void)
2 {
3     setLeftSpeed = 0.0;
4     setRightSpeed = 0.0;
5
6     LeftPWM(0);

```

```
7      RightPWM(0);  
8      stopSpeedTimer();  
9 }
```

Funkcja wyzerowuje wartość zadaną oraz ustawiony PWM, jak również zatrzymuje timer odpowiedzialny za czas trwania ustawionej prędkości. Robot posiada 3 mechanizmy zabezpieczeń. Pierwszym jest wymienione w poprzednim rozdziale wysłanie wiadomości zadającej prędkość z wartościami równymi zero. Kolejnym mechanizmem jest wysłanie niepoprawnej wiadomości. Funkcja przygotowująca odpowiedź informującą o błędzie również zatrzymuje silniki. Ostatnim zabezpieczeniem jest możliwość ustawienia timera Bluetooth (widoczny jest we fragmencie kodu w podrozdziale 3.2). Timer zaczyna odliczanie po otrzymaniu dowolnej wiadomości i gdy następna wiadomość nie pojawi się przed zakończeniem odliczania, silniki są zatrzymywane. Jest to forma zabezpieczenia przed utratą łączności. Domyślnie timer ten jest wyłączony. Włączenie oraz ustalenie czasu odliczania jest możliwe za pomocą wiadomości kontrolnej.

3.6 Realizacja odczytu prędkości

Układ regulacji wymaga sprzężenia zwrotnego od faktycznej prędkości robota. W tym celu kluczowe jest niezawodne przetwarzanie informacji uzyskanych za pomocą enkoderów. Enkodery zamontowane na wale silników podłączone są to pinów skonfigurowanych jako wejścia timerów obsługujących ten czujniki. Mikrokontroler STM umożliwia skonfigurowanie timera do trybu Encoder Mode, który wiąże wejście sygnału taktującego licznika z impulsem generowanym przez enkoder. Tryb ten również pozwala na sprzętową analizę kolejności generowanych impulsów wyjściowych, co w wygodny sposób pozwala na detekcję kierunku obrotu koła. Do obliczania prędkości użyty został jeszcze jeden niezależny timer, który cyklicznie uruchamia funkcję obliczania prędkości.

```
1 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)  
2 {  
3     if(htim == &htim2)  
4     {  
5         leftVelocity = LeftVelocity();  
6         rightVelocity = RightVelocity();  
7         htim2.Instance->CNT = encoderTimer - 1;  
8         HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2);  
9     }  
10    //(...)  
11    else if(htim == &htim3)  
12    {  
13        onEncoderOverload(&htim3,&leftTotalTicks);  
14    }  
15    Else if(htim == &htim1)  
16    {  
17        onEncoderOverload(&htim1,&rightTotalTicks);  
18    }  
19 }
```

Jest to uniwersalny handler dla wszystkich timerów zarejestrowanych na przerwanie od końca odliczania. Biblioteka HAL obsługuje niskopoziomowo przerwanie timera i wywołuje funkcje obsługi przekazując w argumencie adres obiektu kontrolującego dany licznik. Interwał czasowy dla licznika może być ustalony przez wiadomość kontrolną. Obliczona wartość jest więc średnią prędkością w ustawionej ramce czasowej. Z powodu, że interwał

timera może być ustalany przez użytkownika oraz maksymalna prędkość, jaką mogą używać koła nie jest stała (zależy od zużycia silników, poziomu naładowania baterii, użytej przekładni i innych czynników), wymagane było zabezpieczenie przed przekroczeniem maksymalnej wartości timera, zanim nastąpi aktualizacja. Obsługę tej sytuacji zapewnia funkcja:

```

1 void onEncoderOverload(TIM_HandleTypeDef *htim,int32_t *
   totalTickCounter)
2 {
3     if(htim->Instance->CNT >64000 && htim->Instance->CNT <65000)
4         *totalTickCounter += (ENCODER_INITIAL + 65000 - htim
           ->Instance->CNT);
5     else if (htim->Instance->CNT >0&& htim->Instance->CNT <1000)
6         *totalTickCounter -= (ENCODER_INITIAL + htim->
           Instance->CNT);
7
8     htim->Instance->CNT = ENCODER_INITIAL;
9     HAL_TIM_Base_Start_IT(htim);
10 }
```

Argumentami jest adres danego timera oraz adres zmiennej pomocniczej określającej ilość impulsów wysłanych przez enkoder od ostatniej aktualizacji prędkości. Zmienna „totalTickCounter” jest ze znakiem co umożliwi określenie zwrotu prędkości. Prędkość zgodna z przyjętą przednią częścią robota przekracza licznik zmniejszając wartość rejestru przy wartości 0, w związku z czym pod rejestrem, podczas obsługi przerwania, jest zapisana wartość mniejsza od 65000. Dolne ograniczenie zostało dobrane empirycznie. Analogicznie sytuacja wygląda przy przepełnieniu wartości timera odwrotną prędkością. Zmienna pomocnicza jest inkrementowana lub dekrementowana o obliczoną wartość impulsów. Obliczenie prędkości podczas aktualizacji odbywa się za pomocą funkcji „LeftVelocity” i „RightVelocity”. Obliczanie prędkości koła na przykładzie funkcji „LeftVelocity”:

```

1 floatLeftVelocity(void)
2 {
3     leftTotalTicks += (ENCODER_INITIAL -htim3.Instance->CNT);
4     htim3.Instance->CNT = ENCODER_INITIAL;
5
6     float vel = 0.0f;
7     vel = calcVelocity(leftTotalTicks);
8     leftTotalTicks = 0;
9     return vel;
10 }
```

Funkcja dodaje do zmiennej „leftTotalTicks” ilość impulsów wygenerowanych przez enkoder od ostatniej aktualizacji prędkości. Następnie zeruje ilość impulsów, oblicza prędkość liniową w cm/s i zwraca ją. Funkcja obliczająca prędkość liniową:

```

1 floatcalcVelocity(int8_t encoderTicks)
2 {
3     float tmp = encoderTicks/TICK_PER_ROUND;
4     tmp = tmp*2.0*SHORT_PI;
5     tmp = tmp /(getTimerTimeout(&htim2)*0.0001);
6     tmp = tmp*RADIUS;
7     return tmp;
8 }
```

W pierwszym kroku obliczana jest ilość obrotów jakie wykonało koło biorąc po uwagę przekładnię silnika i rozdzielczość samego czujnika. Następnym krokiem jest zamiana ilości obrotów na prędkość kątową wyrażoną w radianach na sekundę. Ostatnim etapem

jest uzyskanie prędkości liniowej zgodnie ze wzorem:

$$v = \omega R \quad (3.1)$$

Przedstawione rozwiązanie jest odporne na duże prędkości, niemniej jednak może się nie sprawdzać w przypadku małych. Korzystając z enkoderów inkrementalnych należy być świadomym niestabilności podczas okresowego zliczania impulsów, wywołanej brakiem synchronizacji generowanego przez czujniki sygnału i timera wyzwalającego aktualizację. Problem pogłębia fakt, że sama ramka czasowa może być ustalona z zewnątrz podczas pracy robota. Bezpieczniejsze byłoby zablokowanie możliwości zmiany ustawień timera, jednakże byłoby to sprzeczne z ideą projektu. Dobrana empirycznie wartość 60 [ms] jest wartością nominalną i zalecaną podczas korzystania z robota, a za zamianę tej wartości przejmuję pełną odpowiedzialność użytkownik.

W stałym interwale czasowym problem pojawia wariancja odczytu impulsów, która rośnie wraz ze zmniejszaniem prędkości. Dla stosunkowo dużych prędkości wariancja odczytanych impulsów jest na tyle niewielka, że można ją pominąć, natomiast przy niewielkich potrafi mocno zaburzyć pomiar. W celu wyznaczenia progu prędkości, dla którego pomiar jest stabilny, przygotowany został eksperyment, którego wyniki przedstawiono poniżej. Doświadczenie polegało na 30 krotnym pomiarze prędkości oraz ilości impulsów w ramce czasowej dla ustalonego PWM, który następnie inkrementowany był do nowej wartości. W ten sposób wyeliminowano problem błędów wywołanych samym procesem regulacji.

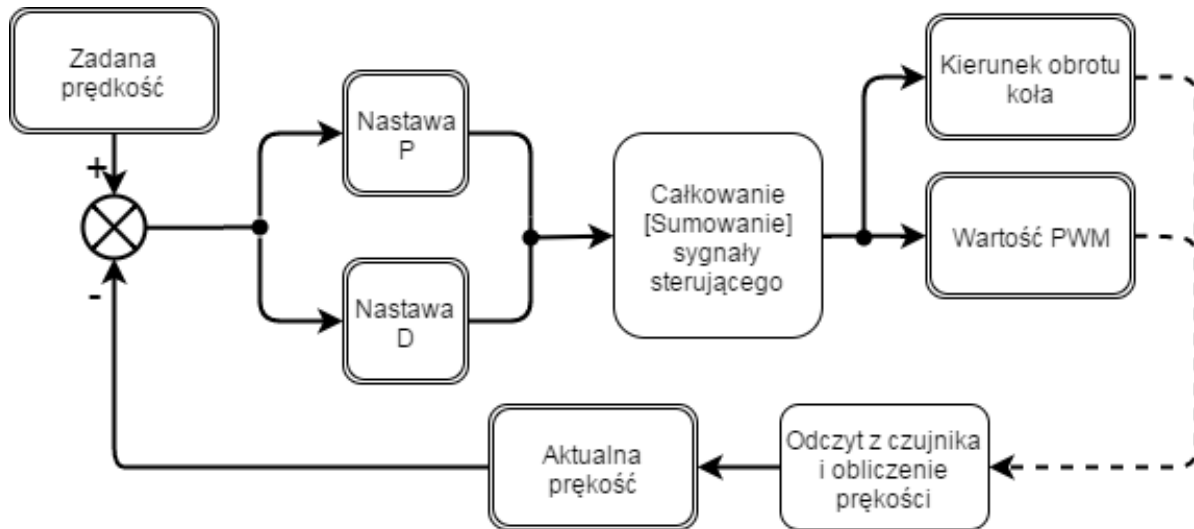
Pomiar odbył się przy pełnym naładowaniu baterii (8.2[V]). Całe doświadczenie było w pełni zautomatyzowane poprzez skrypt JavaScript. W tabeli przedstawione są kolejno: wypełnienie PWM, średnia zliczonych impulsów w ramce 60 ms, ich odchylenie standardowe, procent odchylenia w stosunku do średniej oraz uśredniona prędkość.

PWM	śr. impulsów	Odchyl. standardowe	Stosunek odch do śr [%]	Prędkość [cm/s]
100	6.83	0.9	13.1412	0.7
150	13.57	0.5	3.65	2.17
200	19.67	0.47	2.395	3.21
250	25.3	0.86	3.407	4.26
300	30.87	0.67	2.171	5.24
350	36.5	0.81	2.208	6.44
400	44.33	1.08	2.425	7.82
450	50.4	1.28	2.542	8.8
500	56.33	1.01	1.795	9.94
550	61.93	0.57	0.927	11.07
650	73.6	0.66	0.901	13.39
700	80.17	0.64	0.795	14.66
800	93.6	0.5	0.534	17.15
900	107.23	0.45	0.42	19.63
1000	120.93	0.47	0.389	22.12

Tabela. 3.1: Wyniki doświadczenia

Na podstawie uzyskanych danych widzimy, że odczyt przy prędkości 0,7 cm/s jest w bardzo dużym stopniu niestabilny o czym świadczą trzynastoprocentowe wahanie w zliczaniu impulsów. Na podstawie eksperymentu pomiar prędkości powyżej 9 cm/s obarczony jest błędem poniżej jednego procenta i regulacja do tej prędkości jest stabilna.

3.7 Układ regulacji



Rysunek 3.5: Schemat układu regulacji

Bloki o podwójnym obramowaniu oznaczają stan robota, natomiast o pojedynczym reprezentują operację. Strzałki pokazują przepływ danych podczas regulacji prędkości. Uchyb regulacji jest różnicą pomiędzy prędkością zadaną, a aktualną, uzyskaną w trakcie procedury opisanej w poprzedniej sekcji. Wartość uchybu podlega wzmocnieniu i całkowaniu z ustawionymi nastawami, a następnie sumowane jest ze stanem poprzednim. Jest to wymagane, ponieważ sterowniki silników kontrolowane są przez sygnał PWM, nie jest w stanie utrzymać stałej wartości sterującej. To działanie mogłoby być realizowane przez całkujący człon regulatora, jednakże wykorzystane rozwiązanie upraszcza implementację i dobrze wpasowuje się w dyskretną naturę regulatora. Implementacja różniczkowania na mikrokontrolerze wymaga dyskretyzacji tej operacji. Poniższy wzór aproksymuje operację różniczkowania na dziedzinie dyskretniej:

$$\frac{de(t)}{dt} \sim \frac{[e(n) - e(n-1)]}{T} \quad (3.2)$$

Pochodna uchybu w systemie dyskretnym przybliżona jest przez iloraz różnicowy. Dokładność wyniku przybliżenia jest tym większa, im mniejszy jest okres T . Projekt zakładał wyzwalanie procedury regulacji prędkości poprzez timer, którego interwał ustalany jest wiadomością kontrolną przez użytkownika. Podobnie jak w przypadku aktualizacji prędkości, kosztem poniesionym za swobodę ustawień jest bezpieczeństwo działania układu regulacji. Wartością nominalną timera regulacji jest 150[ms] co jest jednocześnie okresem dyskretyzacji członu różniczkującego. Pomimo, że aproksymacja w ten sposób znacznie odbiega od tej, w dziedzinie ciągłej, wykorzystane to rozwiązanie ze względu na łatwość implementacji oraz jakość regulacji na oczekiwanym poziomie.

```

1 void regulation(void)
2 {
3     eLeft = setLeftSpeed - leftVelocity;
4     eRight = setRightSpeed - rightVelocity;
5     newPWMLLeft = pVal * eLeft + dVal * (eLeft - peLeft);
6     newPWMLRight = pVal * eRight + dVal * (eRight - peRight) / (
7         getTimerTimeout(&htim10) * 0.0001);
8     peLeft = eLeft;
9     peRight = eRight;

```

```
9         addNewPWM(newPWMLeft,newPWMRight);  
10 }
```

Algorytm regulacji zaimplementowany została według wyżej wymienionego sposobu. Okres dyskretyzacji członu różniczkującego przeskalowany został do sekund. Aby regulator działał prawidłowo, ważne jest spełnienie warunku:

$$T_{regulacji} \geq T_{akt.predkosci} \quad (3.3)$$

Aktualizacja prędkości musi być odbywać się przynajmniej tak często jak regulacja. W przeciwnym razie obliczony uchyb nie będzie odzwierciedlał faktycznego, co w konsekwencji zaburzy prawidłową pracę regulatora.

Rozdział 4

Oprogramowanie aplikacji sterującej

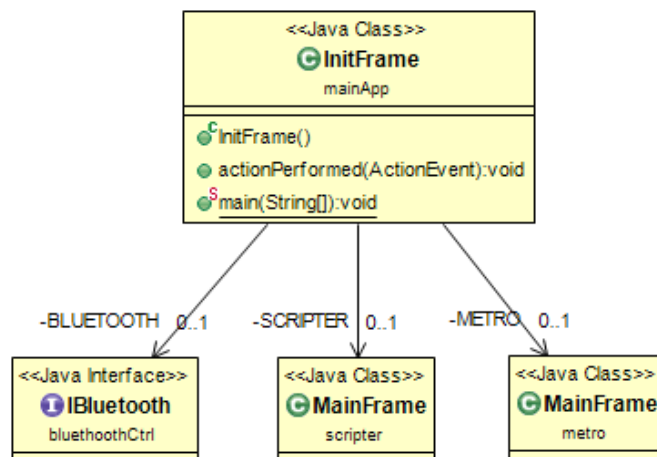
4.1 Struktura oprogramowania

Aplikacja do sterowania zdalnego robotem została napisana w języku Java. Kod źródłowy jest kompilowany do kodu bajtowego (forma pośrednia pomiędzy kodem źródłowym, a instrukcjami maszynowymi) i może być uruchamiany na każdej platformie posiadającej Maszynę Wirtualną Javy. Wybór języka wynika, z wieloplatformowości powstałego programu oraz bogatej biblioteki standardowej.

Aplikacja składa się z trzech podstawowych komponentów:

1. modułu kontroli komunikacji Bluetooth
2. modułu sterowania tekstowego
3. modułu sterowania graficznego

Poza tymi, istnieje jeszcze jeden komponent odpowiedzialny za utworzenie wyżej wymienionych modułów. Wszystkie komponenty w kodzie źródłowym zorganizowane są w formie pakietów Java. Pakiet Java jest mechanizmem języka, który pozwala grupować powiązane ze sobą klasy, nadając im jednocześnie wspólną przestrzeń nazw.

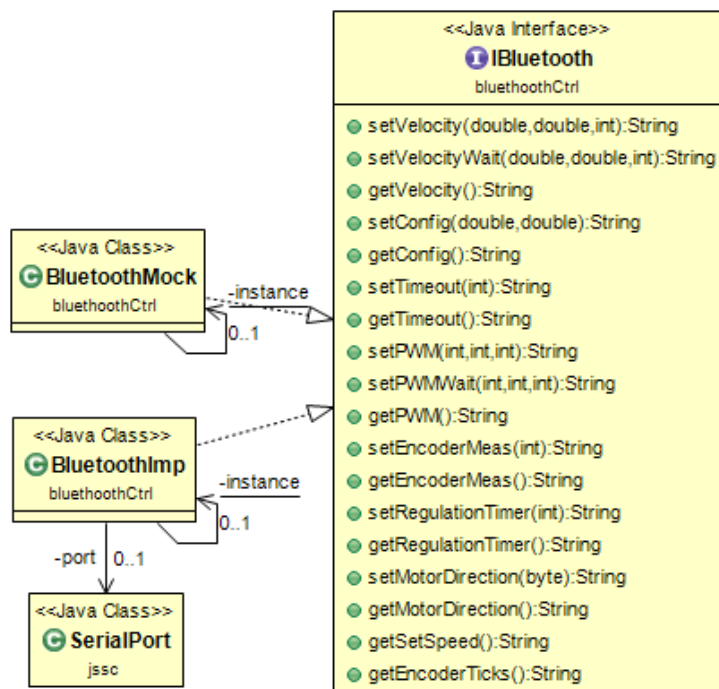


Rysunek 4.1: Diagram klas głównego modułu

Program startuje w klasie głównej InitFrame. Obiekt tej klasy zawiera w sobie egzemplarze klas zarządzających oknami modułów sterujących oraz implementacje interfejsu IBluetooth. Wszystkie przedstawione moduły oraz ich struktura opisane są w dalszej części tego rozdziału.

4.2 Moduł kontroli komunikacji Bluetooth

Moduł ten jest komponentem, którego zadaniem jest obsługiwanie transmisji szeregowej Bluetooth z robotem. Moduł definiuje abstrakcyjny interfejs który pozwala na wymianę informacji z robotem, jednocześnie ukrywając techniczne szczegóły realizacji transmisji danych.



Rysunek 4.2: Diagram klas modułu Bluetooth

Podstawą modułu jest interfejs IBluetooth. Udostępnia szereg funkcji, do wymiany danych z robotem. Argumenty funkcji posiadają typ danych, który w naturalny sposób odzwierciedla wartość jaką wyraża. Przykładem może być zadana prędkość, która posiada typ double, czy czas expiracji timera, wyrażony w liczbach całkowitych. Odpowiedzialność za przygotowanie odpowiedniej wiadomości, zgodnej z zaprojektowanym protokołem przeniesiona jest na ten komponent. Warto również zauważyć, że funkcja zadająca prędkość (setVelocity) posługuje się argumentami : Translacja, Rotacja. Z poziomu aplikacji użytkownik korzysta z zadawania prędkości translacji (ruchu postępowego robota w dwuwymiarowym układzie współrzędnych) i rotacji (ruchu obrotowego), a nie prędkościami poszczególnych kół. Z punktu widzenia użytkownika jest to bardziej intuicyjne rozwiązanie. Pobieranie wartości również jest przekształcane z prędkości lewego i prawego koła na prędkość translacji i rotacji:

```

1 public static double[] TranRot2LeftRight(double translation, double rotation)
2 {
3     double[] result = new double[2];
4     result[0] = translation + rotation;
5     result[1] = translation - rotation;
6     return result;
7 }
8 public static double[] LertRight2TranRot(double left, double right)
9 {
10    double[] result = new double[2];
11    result[0] = (left + right)/2;
12    result[1] = (left - right)/2;
13    return result;

```

14 }

Każda funkcja zwraca łańcuch znaków zawierającą sformatowaną odpowiedź robota. Wybór tego typu jest omówiony w podrozdziale 4.3. Interfejs posiada dwie implementacje:

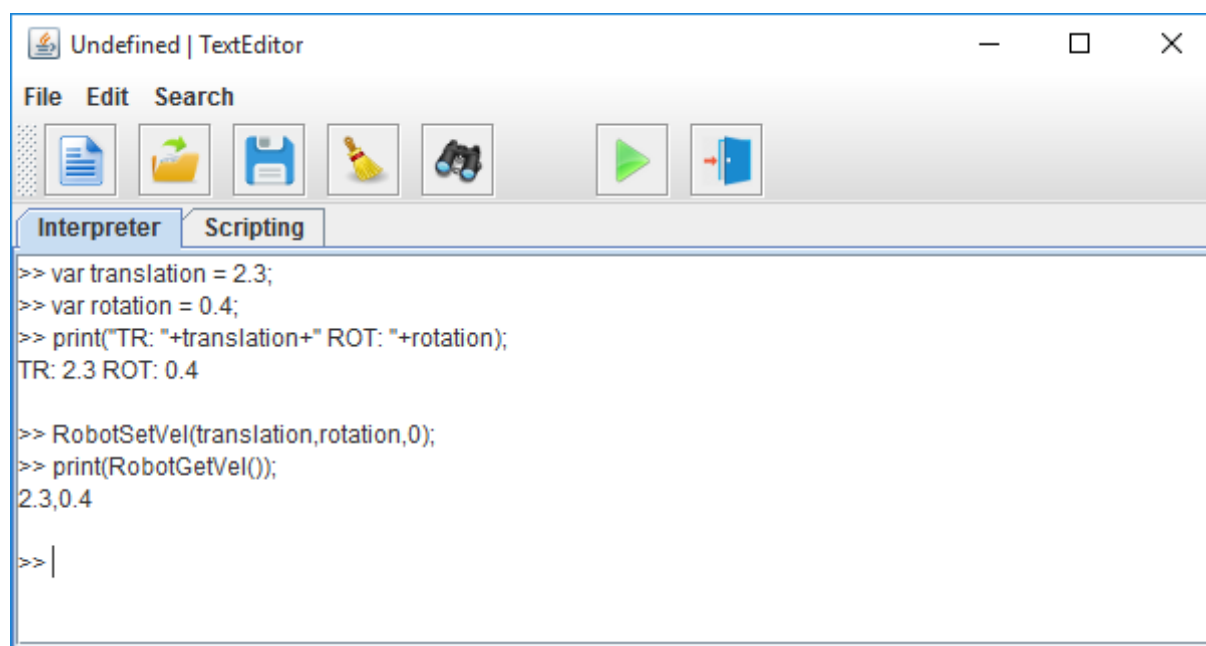
- klasa, która symuluje działanie robota, używana we wstępnej fazie implementacji oraz do testowania działania aplikacji bez połączenia z robotem
- klasa, która obsługuje połączenie szeregowo poprzez wirtualny port COM z modulem Bluetooth na robocie oraz tworzy właściwe wiadomości gotowe do transmisji

Istotną koncepcją przy tworzeniu było zapewnianie, aby tylko jedna instancja obiektu była tworzona podczas pracy programu. Jak w przypadku klasy symulującej nie ma to większego znaczenia, jest niezbędne we właściwej implementacji. Wynika to z faktu, że nawiązywana jest transmisja szeregowo, która blokuje dany port COM. Próba utworzenia kolejnej instancji zakończy się błędem. Rozwiązane to jest poprzez zastosowanie wzorca projektowego singleton.

Sama obsługa portu szeregowego wykorzystuje bibliotekę jSSC udostępnioną na otwartej licencji. Obsługa portów szeregowych jest ściśle związana z systemem operacyjnym i wymagana jest ich natywna implementacja, specyficzna dla danego systemu. Zastosowana biblioteka posiada zaimplementowaną natywną obsługę transmisji szeregowo dla większości znanych platform oraz udostępnia abstrakcyjny interfejs w języku Java, który pozwala wykorzystanie go w programie.

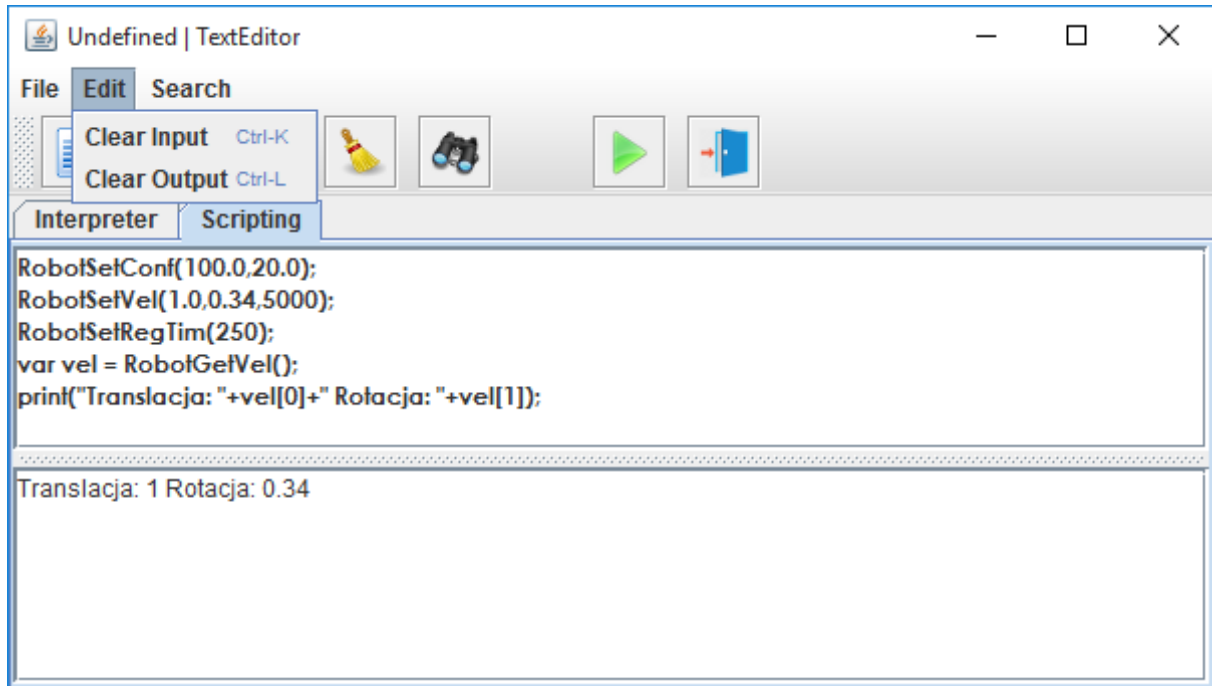
4.3 Moduł sterowania tekstowego

Głównym założeniem przy projektowaniu aplikacji sterującej było umożliwienie użytkownikowi tworzenia skryptów pozwalający implementować dowolny algorytm oraz interakcję z robotem za pomocą komend tekstowych. Wymagało to stworzenia modułu o podstawowej funkcjonalności edytora testowego. Założeniem była również interakcja z poziomem konsoli interpretera, który swoją funkcjonalnością będzie przypominał inne znane interpretry języków skryptowych.



Rysunek 4.3: Okno panelem interpretera z interpreterem

Interpreter wykonuje pojedynczą instrukcję, zakończoną średnikiem. Klawisz ENTER rozpoczyna wykonywanie komendy, natomiast klawiszami strzałek możemy przeglądać historię wykonanych instrukcji. Interpreter nie jest związany z panelem sterowania umieszczonym powyżej, interakcja odbywa się tylko za pomocą klawiszy.

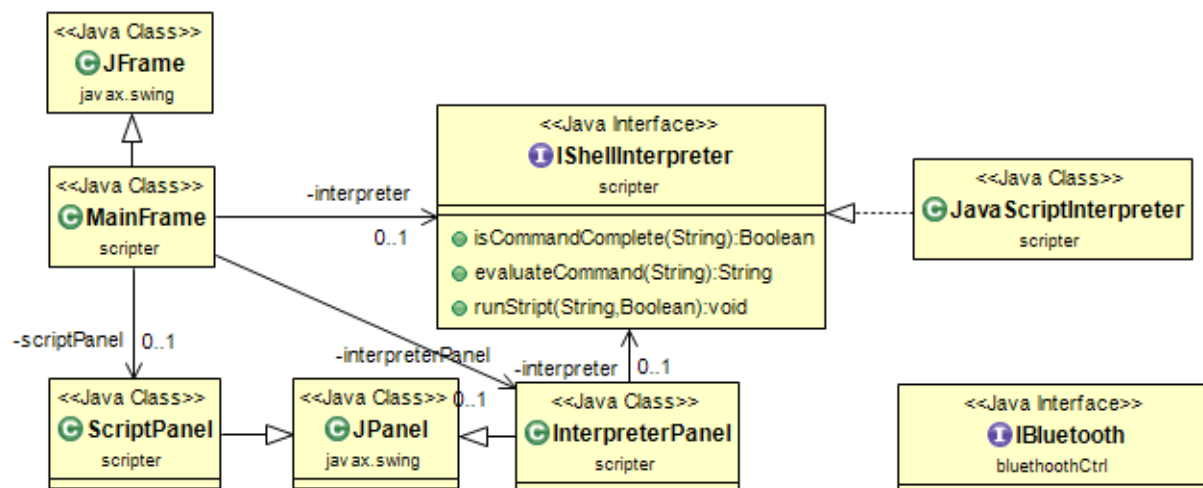


Rysunek 4.4: Okno z panelem skryptu

Panel edycji skryptów posiada funkcjonalność podstawowego edytora testu. Górne pole tekstowe służy do tworzenia kodu, natomiast dolne jest przekierowanym standardowym wyjściem silnika JavaScript. Powyżej pól tekstowych znajdują się pasek narzędzi oraz menu. Wszystkie funkcje wspomagania edycji dostępne są z poziomu menu, paska narzędzi oraz skrótów klawiszowych. Edytor umożliwia:

- uruchomienie skryptu
- zapis i odczyt plików z dysku
- czyszczenie pola wprowadzania testu i pola wyjściowego
- prosty mechanizm przeszukiwania tekstu
- zakończenie pracy edytora

Ważnym aspektem modułu jest fakt, że zarówno interpreter, jak i edytor korzystają z tej samej instancji silnika JavaScript. Oznacza to, że działania wykonane na jednym panelu widoczne są w drugim. Nie stoi nic na przeszkodzie, aby konfigurację robota przeprowadzić za pomocą edytora skryptów, natomiast same sterowanie odbyło się za pomocą panelu interpretera.



Rysunek 4.5: Diagram klas modułu sterowania tekstowego

Wykorzystanie silnika języka interpretowanego umożliwił interfejs `IShellInterpreter`. Zastosowanie interfejsu nie wiąże programu z konkretnym silnikiem, umożliwia to w podłączenie dowolnego interpretera bez wprowadzania zmian w programie. Interfejs `IBluetooth` wywołany jest poziomu samego JavaScriptu, w związku z czym nie jest powiązany z żadnym z obiektów w module.

4.3.1 Użycie silnika JavaScript w aplikacji

Możliwość pisania skryptów wymagała użycia silnika jednego z języków skryptowych. Wybór padł na JavaScript, który główne zastosowanie ma w stronach internetowych. Język ten pozwala na pisanie pełnoprawnych aplikacji oraz realizacji dowolnego algorytmu. Głównym powodem była obecność silnika Nashorn w Java 8. Jest on wydajną implementacją JavaScript pozwalającą łączyć funkcjonalność obu języków.

```

1 public class JavaScriptInterpreter implements IShellInterpreter {
2     private final String InitialScript="src\\scripter\\cmd.js";
3     // (...)
4     private ScriptEngine engine;
5     // (...)
6     public JavaScriptInterpreter()
7     {
8         engine =new ScriptEngineManager().getEngineByName("nashorn");
9         stringWriterInit();
10        engine.getContext().setWriter(stringWriter);
11
12        loadInitScript();
13    }
14    // (...)
  
```

Java 8 udostępnia możliwość stworzenia obiektu klasy `ScriptEngine`, który zarządza silnikiem JavaScript. Konstruktor obiektu ustawia jako strumień wyjściowy obiekt tekstowy `stringWriter` powiązany z oknem aplikacji oraz uruchamia skrypt początkowy, umieszczając tym samym w przestrzeni JavaScript definicję funkcji używane przy komunikacji z robotem. Uruchamianie kodu JavaScript

```

1 @Override
2 public String evaluateCommand(String command) throws ScriptException {
3     engine.eval(command);
4     String res = stringWriter.toString();
5     stringWriter.getBuffer().setLength(0);
  
```

```

6     return res;
7 }
8 (...)
9 @Override
10 public void runScript(Stringtext, Boolean isFromFile) throws Exception{
11     stringWriter.setIsEvent(true);
12     if(isFromFile)
13         engine.eval(newFileReader(text));
14     else
15         engine.eval(text);
16     stringWriter.setIsEvent(false);
17 }
18 }

```

Przedstawione metody używane są przy wywoływaniu skryptów. Pierwsza funkcja używana jest przez panel interpretera. Po wykonaniu fragmentu kodu („engine.eval(command);”)czyści bufor a następnie umieszcza w nim dane odebrane z standardowego wyjścia silnika. Druga funkcja używana jest w edytorze skryptów. Pozwala na uruchamianie zarówno plików tekstowych jak i ciągów znaków. W tej metodzie przekierowanie strumienia wyjściowego opiera się na obsłudze generowanych przez obiekt stringWriter zdarzeń.

Fragment inicjalnego skryptu umożliwiającego kontakt z robotem:

```

1 var BluetoothClass = Java.type('bluetoothCtrl.BluetoothImp');
2 var btObject = BluetoothClass.getInstance();
3 // (...)
4 function RobotSetVel(translate, rotate, time)
5 {
6     var result = btObject.setVelocity(translate, rotate, time);
7     return decode(result);
8 }
9 function RobotGetVel()
10 {
11     var result = btObject.getVelocity();
12     return decode(result);
13 }
14 // (...)

```

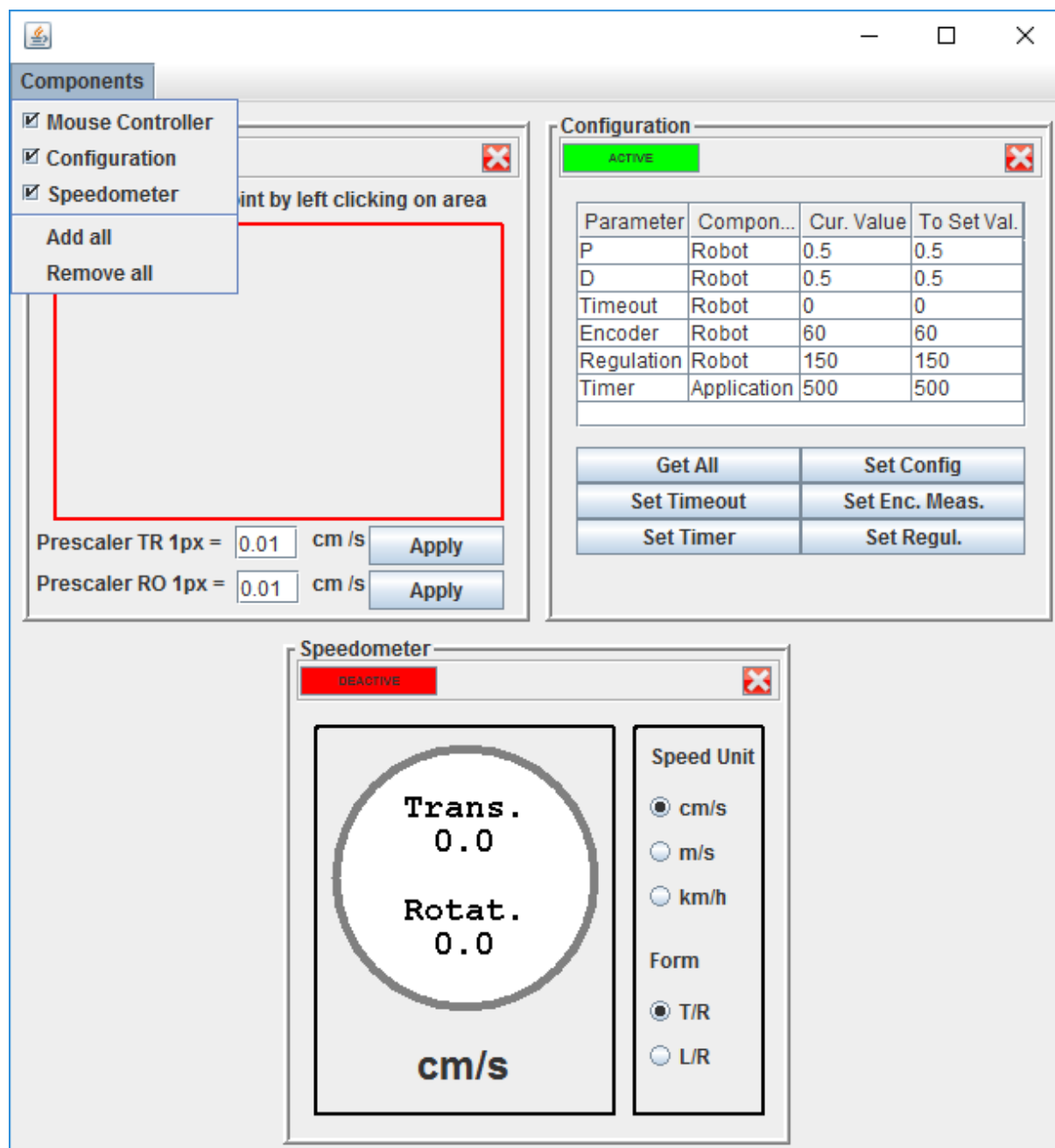
Sam inicjalny skrypt ładowany podczas konstruktora klasy opakowuje wszystkie metody interfejsu IBluetooth. Skrypt uzyskuje dostęp do klasy Java (jedna z wspomnianych wcześniej możliwości silnika Nashorn) oraz pobiera statyczny obiekt tej klasy. Każda funkcja wywołuje metodę z interfejsu IBluetooth, a następnie zwraca zdekodowany do tablicy łańcuch znaków. Powodem, dla którego w interfejsie IBluetooth każda metoda zwraca ten typ jest fakt, że z poziomu JavaScript pobieranie zmiennej tekstowej działa zawsze zgodnie z oczekiwaniami, czego nie można powiedzieć o innych typach danych.

4.4 Moduł sterowania graficznego

Wykorzystanie potencjału sterowanie tekstowego wymaga podstawowej wiedzy programistycznej i poświęcenia czasu aby w pełni poprawnie przygotować skrypt. Poza tym moduł ten nadaje się do implementacji algorytmu poruszania się robota, niekoniecznie natomiast sprawdza się w sytuacji gdy chcemy, aby robot reagował na nasze działania w czasie rzeczywistym. Odpowiedzią na ten problem jest moduł sterowania graficznego. Idea tego komponentu polega na wykorzystaniu bloków sterujących, pozwalających na komunikację z robotem za pomocą interfejsu graficznego. Bloki sterujące pozwalają na zmianę konfiguracji robota, kontrolę i wizualizację prędkości bez konieczności używania komend tekstowych.

Główne okno modułu graficznego pozwala wybierać bloki, które chcemy aktualnie użyć przy sterowaniu robotem, spośród wszystkich dostępnych. Dodatkowo w menu umieszczono-

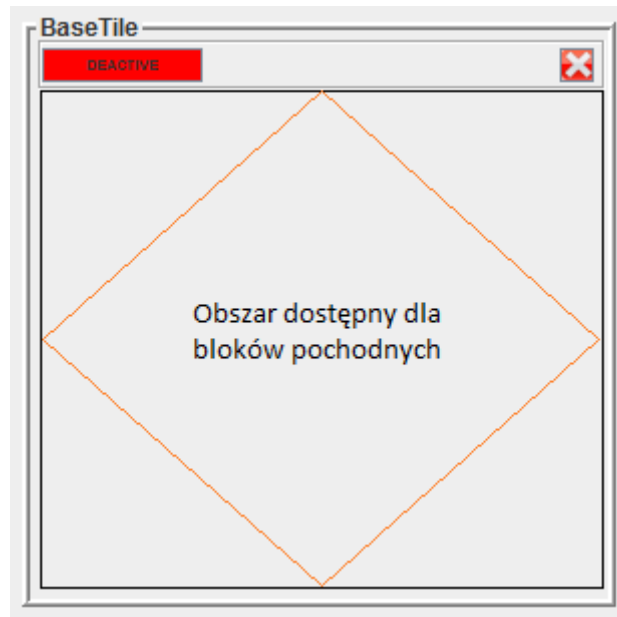
ne są dwie pomocnicze opcje pozwalające na dodawanie bądź usunięcie wszystkich bloków. Bloki sterujące są szczegółowo opisane w następnych podrozdziałach.



Rysunek 4.6: Okno modułu graficznego

Samo okno aplikacji pozwala dynamicznie zarządzać blokami na ekranie. W zależności od rozmiaru okna bloki układają się w sposób, aby jak najefektywniej wykorzystać dostępną przestrzeń. Rozkład elementów można kontrolować poprzez kolejność dodawania bloków do głównego okna. Minimalizacja i zamknięcia okna wysyłają komendę stop do robota.

4.4.1 Bazowy blok sterujący

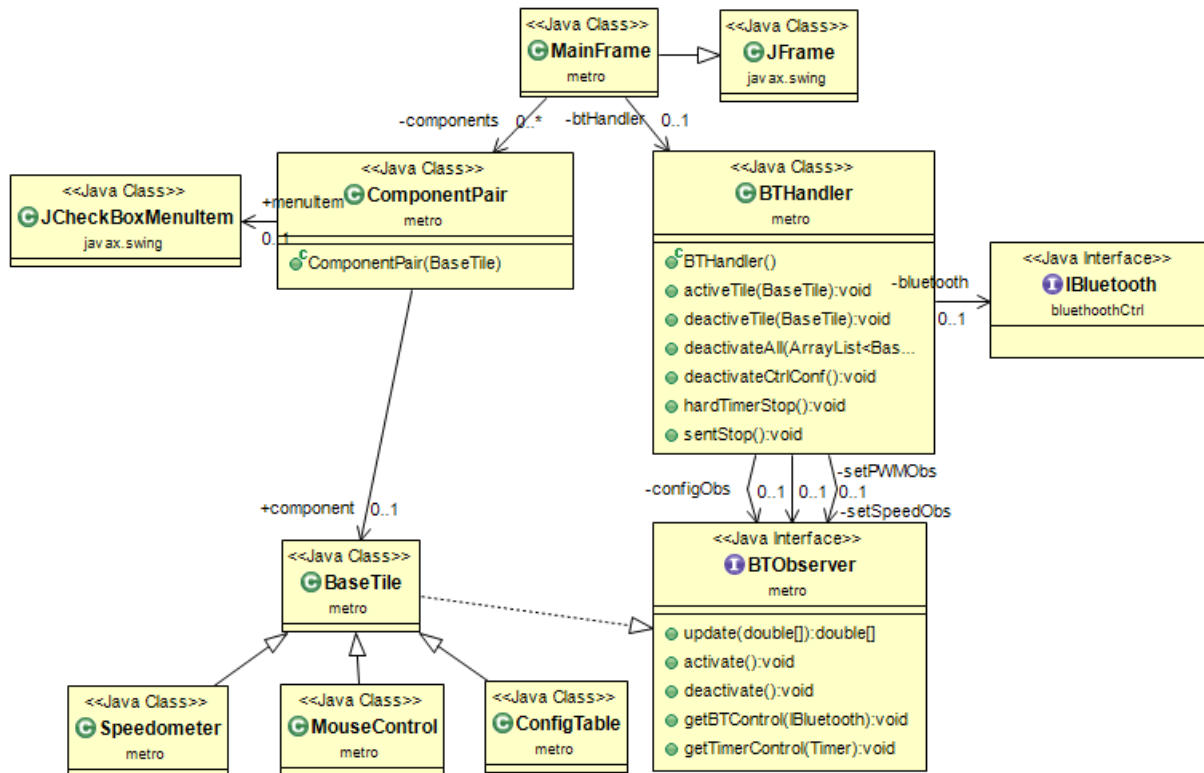


Rysunek 4.7: Bazowy blok sterujący

Przycisk z krzyżykiem odpowiada za wyłączenie elementu i jest jednoznaczny z odznaczeniem elementu w głównym oknie modułowym. Przycisk aktywacji określa włączenie działania bloku i jest podstawowym mechanizmem w synchronizacji pracy. Współpraca bloków opisana w dalszej części rozdziału. Ich wymiary są ustalone i nie podlegają modyfikacji. Blok może modyfikować udostępnione przez klasę BaseTile ciało elementu.

Właściwości wspólne dla każdego elementu :

- nazwa – każdy blok musi wprowadzić swoją unikalną nazwę
- typ - blok może być jednego z trzech typów
 - STEROWANIE – element kontrolujący (zadający) prędkość robota
 - WIZUALIZACJA – element wizualizujący faktyczną prędkość robota
 - KONFIGURACJA – element, który nie steruje prędkością, może natomiast zmieniać konfigurację robota np. nastawy regulatora
- definiuje podstawową funkcję aktywacji i dezaktywacji elementu. Element może rozszerzyć tę funkcjonalność, niemniej jednak musi wtedy wywołać funkcje klasy bazowej
- definiuje funkcje wyłączenia elementu



Rysunek 4.8: Diagram klas modułu sterowania graficznego

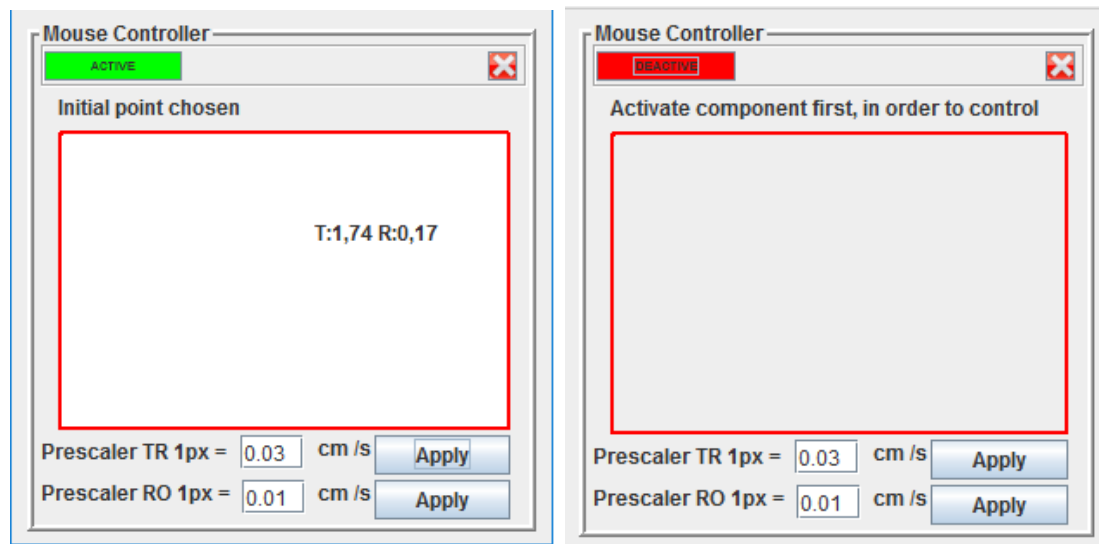
Obiekt skojarzony z głównym oknem modułu zawiera listę obiektów `ComponentPair` łączących bloki sterujące oraz pola wyboru. Życiem obiektów implementujących zarządza obiekt głównej klasy. Kolejnym komponentem jest obiekt klasy `BTHandler` kieruje komunikacją pomiędzy modułem Bluetooth a blokami sterującymi oraz jest odpowiedzialny za synchronizację pracy bloków sterujących. Klasa ta uzyskuje referencję do obiektów sterujących i komunikuje się z nimi przez interfejs `BTObserver`. Działanie poszczególnych bloków oraz synchronizacja ich pracy opisana jest w dalszej części rozdziału.

4.4.2 Bloki sterujące dostępne w aplikacji

W aplikacji stworzone zostały 3 bloki sterujące, po jednym w każdym typie.

Nazwa Sterowanie Myszka

Typ STEROWANIE



Rysunek 4.9: Sterowanie myszką

Blok umożliwia zadawanie prędkości za pomocą myszki. W centralnej części elementu znajduje się obszar obramowany czarowną linią i główny panel sterowania. Naprowadzenie kursora spowoduje zmianę koloru z szarego na biały, natomiast kliknięcie myszką rozpocznie sterowanie. Po rozpoczęciu sterowania nad kursorem pojawi się napis określający zadaną prędkość translacji i rotacji robota wyrażony w cm/s. Punkt zerowy jest w miejscu kliknięcia, które rozpoczyna sterowanie robotem. Nad głównym panelem znajduje się informator aktualnego stanu bloku. Pod głównym panelem jest możliwość ustawienia przeskalowania ruchu myszki (zmiana o ilości pikseli) na zadaną prędkość. Praktyka pokazuje, że lepiej steruje się robotem, gdy przeskalowanie translacji jest większe niż rotacji. Przesunięcie myszki w pionie zmienia rotację, natomiast przesunięcie w poziomie zmienia zadaną rotację. Można zadawać prędkości zarówno dodatnie jak i ujemne. Ponowne kliknięcie, bądź wyjście kursora poza panel główny powoduje zakończenie sterowania.

Nazwa Prękościomierz

Typ WIZUALIZACJA



Rysunek 4.10: Blok prękościomierza

Prękościomierz pokazuje aktualną prękość robota. Lewy panel odpowiada za wyświetlenie prękości natomiast prawy za formę w jakiej prękość ma być wyświetlana. Użytkownik ma możliwość ustawienia jednej z trzech jednostek prękości:

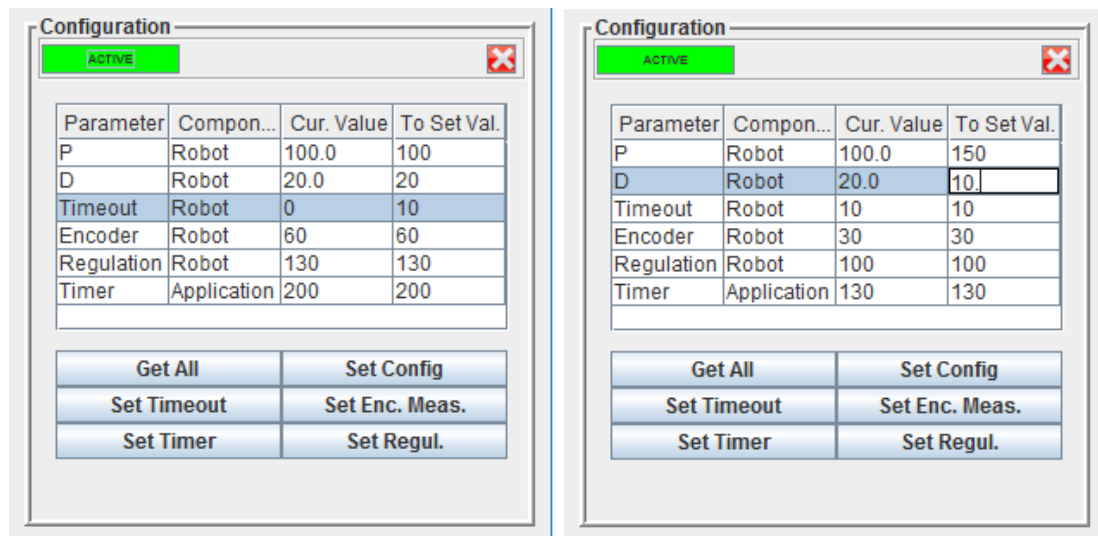
- centymetry na sekundę(domyślnie)
- metry na sekundę
- kilometry na godzinę

Kolejną opcją jest ustawienie formy wyświetlenia prękości:

- prękość translacji i rotacji robota (domyślnie)
- prękość lewego i prawego koła robota

Nazwa Konfiguracja

Typ KONFIGURACJA



Rysunek 4.11: Konfiguracja robota

Prędkościomierz pokazuje aktualną prędkość robota. Lewy panel odpowiada za wyświetlenie prędkości natomiast prawy za formę w jakiej prędkość ma być wyświetlana. Za pomocą prędkościomierza może ustawić jednostkę w jakiej chcemy prezentować prędkość:

- parametr (pierwsza kolumna) : określa ustawiony parametr
- komponent (druga kolumna) : określa czy dany parametr dotyczy konfiguracji robota czy aplikacji
- aktualna wartość (trzecia kolumna):pokazuje aktualnie ustawiony parametr
- wartość do ustawienie(czwarta kolumna):jedyna gdzie pola można modyfikować. Pozwala na wpisanie wartości, którą będziemy mieli możliwość ustawić

Kolejną opcją jest ustawienie formy wyświetlenia prędkości:

- ustawianie timera zabezpieczającego przed utratą łączności Bluetooth (Timeout)
- ustawianie timera aktualizacji prędkości(Encoder) oraz interwału regulatora(Regulation)
- ustawienie timera modułu graficznego (Timer) , omówiony szczegółowo w podrozdziale 4.4.3

4.4.3 Synchronizacja aktywności bloków

Architektura blokowa modułu graficznego pozwala na tworzenie nieograniczonej ilości bloków sterujących dowolnie wybranego typu. Kontrolowanie prędkości robota może być, oprócz sterowania myszką realizowane przez klawiaturę, joystick czy nawet komendy głosowe. Konfigurowanie robota również może przyjmować wiele różnych form. Z tego powodu wymagane było wprowadzenie mechanizmu synchronizacji pracy bloków. Klasa, która odpowiada za zarządzanie blokami sterującymi jest wspomniany już BTHandler. Oprócz synchronizacji klasa ta bierze odpowiedzialność za kontrolowanie dostępu do komponentu Bluetooth dla bloków funkcyjnych.

Podstawowym elementem, służącym synchronizacji jest przytoczony wcześniej mechanizm aktywacji. Aby działanie komponentu było możliwe, musi być on aktywowany. Uruchomienie elementu następuje w dwóch etapach. Pierwszy jest w obszarze obiektu klasy BTHandler. Obiekt posiada informacje o wszystkich blokach w aplikacji i aktywowanie komponentów podlega niżej wymienionym zasadom:

- aktywny może być tylko jeden komponent typu STEROWANIE lub KONFIGURACJA. Uruchomienie więcej niż jednego komponentu tego typu powoduje dezaktywację bloku aktualnie pracującego
- aktywnych może być dowolna ilość bloków typu WIZUALIZACJA
- timer modułu graficznego rozpoczyna odliczanie gdy przynajmniej jeden komponent typu STEROWANIE lub WIZUALIZACJA jest aktywny, a wyłącza się gdy nie jest aktywny żaden z tych elementów
- wyłączenie elementu powoduje jego automatyczną dezaktywację
- minimalizacja lub wyłączenie okna powoduje dezaktywację wszystkich elementów

Drugi etap aktywacji realizowany jest w przestrzeni danego bloku i przygotowuje go do pracy. Wymiana danych bloków typu STEROWANIE i WIZUALIZACJE jest cyklicznie uruchamiana przez, wymieniony już wcześniej, timer aplikacyjny.

Rozdział 5

Prezentacja możliwości wykonanego projektu

W tym rozdziale zaprezentowane została część możliwości jakie udostępnia stworzony projekt. Zachowanie robota zaprezentowane zostało w dołączonych plikach wideo.

5.1 Dobór nastaw regulator



Rysunek 5.1: Autoregulacja

Jednym z zastosowań, do jakich można wykorzystać możliwość pisania skryptów jest automatyczny dobór nastaw regulatora. Jest to przykład wykorzystania możliwości pisania skryptów do konfiguracji robota. Robot cyklicznie porusza się do przodu i do tyłu dokonując w każdej iteracji serie pomiarów prędkości. W każdej iteracji zmiana jest wartości nastaw regulatora w celu znalezienia takich, aby kryterium regulacji było jak najkorzystniejsze (najmniejsze). Do oceny układu regulacji użyto kryterium ITSE, które szczególnie nacisk kładzie na czas regulacji:

$$\int_0^{\infty} t (e(t))^2 dt \quad (5.1)$$

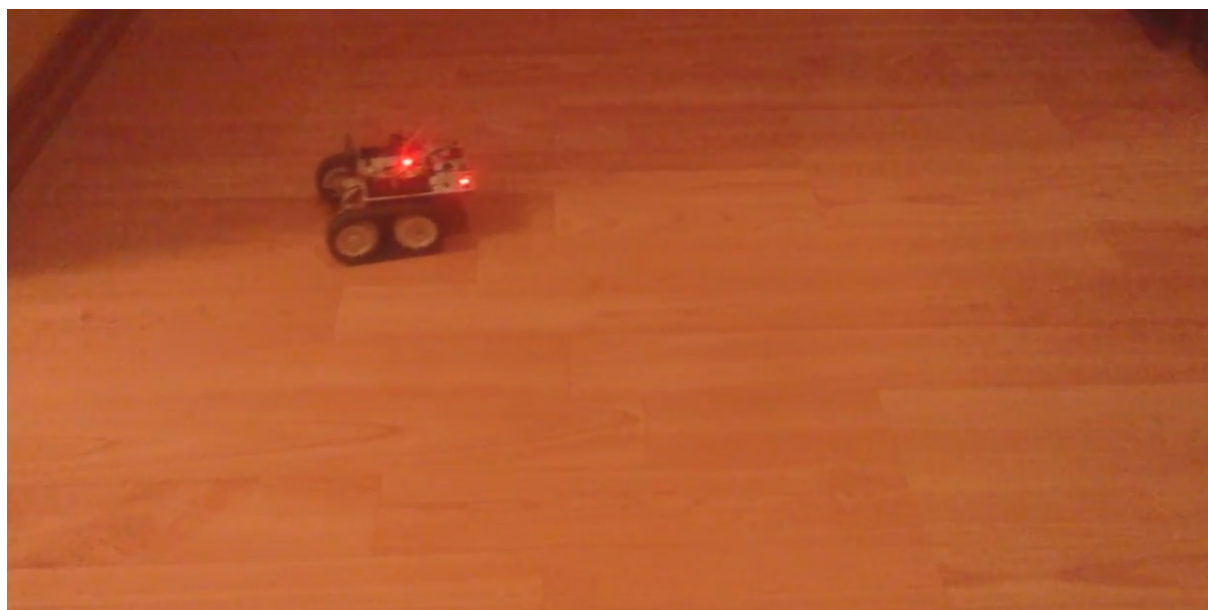
```
1 var Pmin = 70;
2 var Dmin = 10;
3
4 var Pmax = 128;
5 var Dmax = 100;
6
7 var Pbest = Pmin;
8 var Dbest = Dmin;
9
10 var Piteracje = 10;
11 var Diteracje = Piteracje;
12
13 var predkosc = 15.0;
14 var czas = 3000; // ms
15 var ilosc_pomiarow = 10;
16
17 var bestkryterium = Infinity;
18
19 function sleep(millis)
20 {
21     var date = new Date();
22     var curDate = null;
23     do { curDate = new Date(); }
24     while(curDate-date < millis);
25 }
26
27 function kryterium(pomiary,zadanaT,zadanaR)
28 {
29     var suma = 0;
30     for(var i = 0; i < pomiary.length; i++)
31     {
32         suma += pomiary[i].czas * Math.pow(zadanaT - pomiary[
33             i].predkoscT,2);
34         suma += pomiary[i].czas * Math.pow(zadanaR - pomiary[
35             i].predkoscR,2);
36     }
37     return suma;
38 }
39 function pomiar(predkoscT,predkoscR,czas)
40 {
41     this.predkoscT = predkoscT;
42     this.predkoscR = predkoscR;
43     this.czas = czas;
44 }
45
46 RobotSetEncoder(60);
47 RobotSetRegTim(150);
48 for(var P = Pmin; P < Pmax; P += (Pmax - Pmin)/Piteracje)
49 {
50     for(var D = Dmin; D < Dmax; D += (Dmax - Dmin)/Diteracje)
51     {
52         RobotSetConf(P,D);
53         RobotSetVel(predkosc,0,czas);
54         predkosc = - predkosc;
55
56         var pomiary = [];
57         var interwal = czas/ilosc_pomiarow;
```



```
58         for(var i = 0; i < czas; i += interwal)
59         {
60             var tmp = RobotGetVel();
61             pomiary.push(new pomiar(tmp[0],tmp[1],i));
62             sleep(interwal);
63         }
64         var obecneKryterium = kryterium(pomiary,predkosc,0);
65         if(obecneKryterium < bestkryterium)
66         {
67             bestkryterium = obecneKryterium;
68             Pbest = P;
69             Dbest = D;
70         }
71     }
72 }
73
74 print('Nastawa P: '+Pbest);
75 print('Nastawa D: '+Dbest);
```

Skrypt zakończył się wynikiem: nastawa P : 99, nastawa D : 82. Umieszczone zdjęcie jest jedną z klatek z nagranego materiału wideo przedstawiający opisane zadanie. Został on dołączony do płyty CD i znajduje się pod ścieżką filmy/autoregulacja.mp4

5.2 Ustawianie trasy robota za pomocą skryptu



Rysunek 5.2: zadawanie trajektorii

W skrypcie możliwe jest zadanie długości boku oraz prędkości poruszania się wzdłuż krawędzi kwadratu i skreślenia na wierzchołku. Czas wykonania ruchu jest obliczany a następnie robot wykonuje zadaną trajektorie. Przykład pokazuje jak można wykorzystać jednostkę sterującą do wykonania obliczeń, których wyniki aplikowane są na robota.

```
1 function calcTranslationTime(side,velocity)
2 {
3     return Math.round( side / velocity * 1000 );
4 }
5 function calcRotationTime(velocity)
```

```
6 {
7     return Math.round( Math.PI / 2 / velocity * 1000 );
8 }
9
10 var lengthOfTranslation = 30, // cm
11 translationVelocity = 10.0, //cm/s
12 traslationTime = calcTranslationTime(lengthOfTranslation,
    translationVelocity), //ms
13 rotationVelocity = 2.0, // rad/s
14 rotationTime = calcRotationTime(rotationVelocity); // ms
15
16 RobotSetEncoder(60);
17 RobotSetRegTim(150);
18 RobotSetConf(100,82);
19
20 for(var i = 0; i < 4; ++i)
21 {
22     RobotSetVelWait(translationVelocity,0,traslationTime);
23     RobotSetVelWait(0,rotationVelocity,rotationTime);
24 }
```

Odstępstwa od kształtu kwadratu spowodowane są niedokładnością układu regulacji, ale przede wszystkim, związanymi z eksploatacją, usterkami mechanicznymi samej konstrukcji. Sam skrypt używa funkcji zadawania prędkości z blokowaniem. Sterowanie jest zwracane do skryptu dopiero za pełnym zakończeniu ruchu robota. Materiał wideo z tego zdania znajduje się w filmie/kwadrat.mp4

5.3 Prezentacja graficznego sterowania

Zaprezentowany został sposób sterowania robotem za pomocą panelu graficznego. W pracy załączony został film pokazujący jak zadawana prędkość za pomocą ruchów myszki odwzorowana jest na robocie:



Rysunek 5.3: Sterowanie graficzne

Film znajduje się w filmie/graficzne.mp4.

Rozdział 6

Podsumowanie

W ramach pracy powstała konstrukcja mechaniczna oraz elektroniczna robota oraz jego oprogramowanie. Oprogramowanie obejmowało część po stronie robota oraz aplikację kliencką uruchamianą na zewnętrznym PC. Opisane zostały podstawy konstrukcyjne robota oraz szczegółowy opis rozwiązań programowych ze szczególnym uwzględnieniem zastosowanych algorytmów. Proces budowy i eksploatacji robota doprowadził następujących wniosków:

1. Zastosowanie gotowego modelu wydaje się pewniejszym rozwiązaniem niż własnoręczna konstrukcja, mechaniczna. Jednakże, przy kupnie nowej platformy, nie wiemy jakiej jest jakości. Problemem wybranej platformy była niska trwałość. Konstruując robota nie można w pełni zapobiec usterkom mechanicznym, które w zaburzają jego pracę. Dzięki informacją z dodatkowych sensorów można zaprojektować układ regulacji odporny na tego typu usterki, co w dużym stopniu zwiększy niezawodność robota.
2. Komunikacja poprzez interfejs szeregowy z wykorzystaniem modułu Bluetooth doskonale sprawdza się w zastosowaniach robotyki amatorskiej. Zasięg do ok. 10m, deterministyczność transmisji i prostota obsługi sprawia, że warto ją rozważyć jako standardowy sposób komunikacji projektu. Komunikacja bazująca na zasadzie klient-serwer nie zawiodła nawet podczas intensywnej eksploatacji robota.
3. Osadzenie silnika język skryptowego pozwala z możliwością komunikacji z robotem umożliwia bardzo szerokie możliwości pracy z robotem. Zasoby jakie potrzebne są do uruchomienia interpretera jakiegokolwiek języka skryptowego są przeważnie wielokrotnie większe niż te, które udostępniają średniej klasy mikrokontrolery. Zastosowane rozwiązanie wykorzystuje moc obliczeniową i pamięć komputera sterującego przesyłając wyniki operacji robotowi. Dzięki czemu, nawet na ośmiobitowym mikrokontrolerze można prototypować skomplikowane algorytmy. Z punktu widzenia programisty bardzo przydatne jest możliwość podglądania poszczególnych wartości w czasie rzeczywistych testów robota.
4. Stworzony interfejs komunikacyjny świetnie sprawdza się w działaniu modułu interpretera oraz przy konfiguracji i testowaniu robota, jednakże przy sterowaniu poprzez tryb graficzny wprowadza zauważalne opóźnienia. Warto jest rozważyć implementację protokołu komunikacyjnego dla trybu synchronicznego, czy wręcz strumieniowego.

Projekt daje różnorodne możliwości rozbudowy. Z punktu widzenia sprzętowego najważniejsze jest budowa, bądź nabycie modelu mechanicznego wysokiej jakości. Sam projekt nie zakładał odczytu informacji z otoczenia oraz wizualizacji danych. Rozbudowa układu elektronicznego o dalmierze i czujniki MEMS pozwalają na poprawę układu regulacji oraz na rozszerzenie projektu o cały szereg funkcji związanych z analizą i wizualizacją danych. Zadaniem długofalowym jest opracowanie pełnej specyfikacji protokołu komunikacyjnego dla synchronicznej i asynchronicznej wymiany danych, specyfikacja abstrakcyjnego interfejsu funkcjonalności robota wraz z pełną właściwą implementacją.

Dodatek A

Protokół komunikacyjny

Protokół komunikacyjny używany do wymiany danych pomiędzy robotem, a aplikacją składa się z 15 wiadomości kontrolnych. Wiadomości pozwalają pobierać i ustawiać dane na robocie. W większości występują w parach ustaw/pobierz. Protokół nie zakłada istnienia wiadomości jednocześnie zmieniających stan robota i pobierających aktualny stan. Prawidłowa odpowiedź na komendę typu ustaw jest identyczna do odebranej komendy, natomiast obsługa wiadomości typu pobierz nie ujmuje pod uwagę pól danych odebranej komendy.

Wiadomość składa się z 10 bajtów:

Nr bajtu	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rodzaj wiadomości	"B"	ID	Dane	Dane	"M"	Dane	Dane	Dane	Dane	"E"

Bajty 0, 4 i 9 w każdej wiadomości są stałe i są równe wartości danej litery w kodzie ASCII. Służą one do kontroli poprawności przesłanej wiadomości.

Bajt 1 określa identyfikator danej wiadomości i na jego podstawie oprogramowanie robota jest w stanie uruchomić odpowiednią funkcję obsługi przesłanej wiadomości. Zostało to zaprezentowane w rozdziale 3.4.

Reszta bajtów przenosi dane konkretnej wiadomości. Wiadomości pozwalają na serializację liczb zmiennoprzecinkowych z dokładnością do części setnych oraz dwubajtowych liczb całkowitych.

A.1 Spis wiadomości kontrolnych

Każda wiadomość kontrolna przedstawiona jest według poniższego schematu:

Nazwa Wiadomości			Komenda Javascript			Typ			
BAJT 0	BAJT 1	BAJT 2	BAJT 3	BAJT 4	BAJT 5	BAJT 6	BAJT 7	BAJT 8	BAJT 9
CHARAKTERYSTKA WIADMOSCI									

Dla wielkości USTAW w drugim wierszu zaprezentowana jest komenda którą odbiera robot, dla wiadomości typu POBIERZ jest to odpowiedź otrzymywana przez aplikację sterującą. Dane w spisie wiadomości oznaczone są z konwencją:

(F/I)X(1/2)

F oznacza zserializowaną licznę zmiennoprzecinkową, I - całkowitą. Ostatnia pozycja świadczy o części wartości po serializacji. Przykładowo: pierwsza część przesyłanej wartości lewego koła - **FL1**.

Komenda różni się od poprzedniej tym, że zwraca sterowanie po expiracji timera

Wiadomość zwraca wartość sygnału PWM dla silników
L1 i L2 - oznacza wartość sygnału PWM, który steruje lewym silnikiem.
R1 i R2 - oznacza PWM który, steruje prawym silnikiem.

Wiadomość ustawia timer który, co określony interwał czasu aktualizuje prędkość robota. T1 i T2- oznacza ilość milisekund co ile generowane jest przerwanie. Działanie timera i opis aktualizacji prędkości opisany został w rozdziale 3.6.

Wiadomość zwraca ustawioną wartość milisekund interwału aktualizacji prędkości robota. T1 i T2- oznacza ilość milisekund interwału czasowego timera.

Działanie timera i opis aktualizacji prędkości opisany został w rozdziale 3.6.

Wiadomość zwraca prędkość która jest zadana na wejście regulatora.
L1 i L2 - zadana prędkość dla lewego koła.
R1 i R2 - zadana prędkość dla prawego koła

Wiadomość ustawia timer który, co określony interwał czasu uruchamia regulator.
T1 i T2- oznacza ilość milisekund interwału czasowego timera.
Ustawienie wartości T1 i T2 na zero oznacza wyłączenia regulatora i umożliwia nastawianie wartości wypełnienia PWM bezpośrednio na silniki.
W przypadku wyłączonego timera, ustawienie wartości większej od zera włącza regulację prędkości.
Działanie timera i opis regulacji prędkości opisany został w rozdziale 3.7

Wiadomość zwraca ustawioną wartość milisekund interwału regulatora prędkości.
T1 i T2- oznacza ilość milisekund interwału czasowego timera.

Dodatek B

Płyta CD

Do płyty CD dodane zostały:

1. W04_204291_2015_praca_inzynierska.pdf - elektroniczna wersja pracy inżynierskiej
2. w folderze *filmy* umieszczone są materiały wideo z działaniem robota:
 - autoregulacja.mp4
 - kwadrat.mp4
 - graficznie.mp4

Bibliografia

- [1] STMicroelectronics.
 - [2] G. C. Cay S. Horstmann. *Java. Podstawy. Wydanie VIII*. Helion, Gliwice, 2008.
 - [3] G. C. Cay S. Horstmann. *Java. Techniki zaawansowane. Wydanie VIII*. Helion, Gliwice, 2008.
 - [4] R. L. John Charais. *Software PID Control of an Inverted Pendulum Using the PIC16F684*. Microchip, 2004.
 - [5] K. Paprocki. *Mikrokontrolery STM32 w praktyce*. Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2009.
 - [6] L. p. M. Z. Roberto Petrella, Marco Tursini. *Speed Measurement Algorithms for Low-Resolution Incremental Encoder Equipped Drives: a Comparative Analysis*.
 - [7] K. J. Åström. *Control System Design*. University of California, Santa Barbara, 2002.
- [5] [7] [6] [4] [2] [3] [1]