



Zajęcia Projektowe Podstawy Robotyki

*Platforma jeżdżąca automatycznie utrzymująca odległość od
ściany*

Autorzy:

Jakub Pająk
Łukasz Grabarski
Krzysztof Grądek
Piotr Legień
Bartosz Wuwer

AiR Grupa 5TI

Spis treści

1.	Wprowadzenie	2
1.1.	Cel projektu	2
1.2.	Założenia wstępne	2
2.	Realizacja projektu	2
2.1.	Panel sterowania w aplikacji	2
2.2.	Interfejs użytkownika aplikacji	3
2.3.	Implementacja połączenia Bluetooth	6
2.4.	Implementacja przesyłania danych	7
2.5.	Implementacja prostego skryptu w odczytującego dane z kanału BLE	8
2.6.	Proces wykonywania projektu obudowy robota	10
2.7.	Implementacja prostego kodu weryfikującego prawidłowe połączenie silników	14
2.8.	Podłączenie oraz weryfikacja poprawności działania czujników laserowych	15
2.9.	Montaż silników wewnętrz dolnej komory obudowy	16
2.10.	Montaż ogniw wraz z układem BMS oraz podłączenie czujników	17
2.10.1.	Obliczanie parametrów zasilania	17
2.10.2.	Dobór zasilania	19
2.10.3.	Dobór układu BMS	22
2.11.	Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania	25
2.11.1.	Master	25
2.11.2.	Slave	29
2.12.	Testy poprawności działania algorytmu sterującego	30
3.	Napotkane problemy	32
3.1.	Podłączenie laserowych czujników odległości	32
3.2.	Montaż silników oraz kół	32
3.3.	Implementacja logiki sterowania	33
4.	Podsumowanie	33

1. Wprowadzenie

1.1. Cel projektu

Celem niniejszego projektu jest opracowanie mobilnej platformy robotycznej, zdolnej do automatycznego utrzymywania określonej odległości od ściany. Platforma ta bazować będzie na mikrokontrolerze Arduino oraz laserowych czujnikach odległości typu ToF (ang. Time of Flight). Projekt ma na celu zbadanie i rozwinięcie zaawansowanych algorytmów sterowania i nawigacji, które umożliwią precyzyjne śledzenie ścian w zmiennych warunkach środowiskowych. Dodatkowym celem jest stworzenie wszechstronnego rozwiązania, które można łatwo dostosować do różnych zastosowań, takich jak roboty sprzątające, inspekcyjne czy systemy autonomiczne w logistyce.

1.2. Założenia wstępne

Robot został zaprojektowany w oparciu o mikrokontroler Arduino Uno R4, wybrany ze względu na wbudowany moduł Bluetooth LE (LE - Low Energy), co umożliwiło zdalne monitorowanie i kontrolę. Silniki zastosowane w projekcie są wyposażone w enkodery, co zapewni precyzyjne sterowanie. Czujniki odległości zostały podłączone do mikrokontrolera za pomocą magistrali I2C. Ze względu na planowaną liczbę czujników (osiem), połączenie ich innymi metodami nie byłoby możliwe.

Zasilanie platformy jest wystarczające do obsługi co najmniej jednego mikrokontrolera oraz czterech silników. Optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie czterech ogniw litowo-jonowych połączonych w konfiguracji 2S2P, co zapewni odpowiednią wydajność energetyczną. Dodatkowo, konieczne jest zastosowanie układu zarządzania baterią BMS (ang. Battery Management System), który zabezpieczy ogniwa przed nadmiernym rozładowaniem i przeładowaniem.

Całość konstrukcji została zamknięta w obudowie wykonanej techniką druku 3D. Obudowa jest podzielona na dwie główne sekcje: dolną, w której zostaną umieszczone silniki oraz ogniwa wraz z układem BMS, oraz górną, zawierającą płytę stykową, mikrokontroler oraz czujniki. Taka konstrukcja zapewnia łatwy dostęp do kluczowych komponentów i umożliwia ich sprawną wymianę w razie potrzeby.

2. Realizacja projektu

Projekt był realizowany etapami, jednak nie został zastosowany szczegółowy harmonogram. Przybliżone etapy rozwoju projektu:

1. Napisanie aplikacji w wersji dedykowanej systemowi Android w języku Dart,
2. Realizacja prostego skryptu w Arduino IDE w celu weryfikacji połączenia BLE z mikrokontrolerem,
3. Wykonanie projektu obudowy robota w 3D oraz przygotowanie do druku,
4. Wykonanie prostego kodu w celu weryfikacji poprawności połączenia silników do sterownika,
5. Podłączenie oraz weryfikacja poprawności działania laserowych czujników odległości,
6. Montaż silników wewnętrz dolnej komory obudowy,
7. Montaż ogniw wraz z układem BMS,
8. Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania,
9. Testy poprawności działania algorytmu sterującego.

2.1. Panel sterowania w aplikacji

Poczas analizy możliwych rozwiązań problemu zdalnego sterowania robotem wybór padł na wykonanie aplikacji mobilnej oraz przesyłanie odpowiednich komend za pomocą protokołu BLE. Protokół BLE jest pewnym szczególnym przypadkiem ogólnego protokołu Bluetooth, jest on szczególnie często spotykany w przypadku mniej zaawansowanych mikrokontrolerów takich jak Arduino Uno R4. Dzięki odpowiedniej architekturze protokół ten pozwala na bardziej efektywne zarządzanie pobieraną energią, jednocześnie zachowując niezbędne funkcjonalności.

Przez wzgląd na wcześniej nabycie umiejętności tworzenia aplikacji za pomocą języka Dart przez jednego z członków sekcji, prace nad projektem rozpoczęto od implementacji podstawowej wersji aplikacji realizującej proste przesyłanie informacji w postaci całkowitoliczbowej w celu późniejszej interpretacji otrzymanych danych w środowisku Arduino.

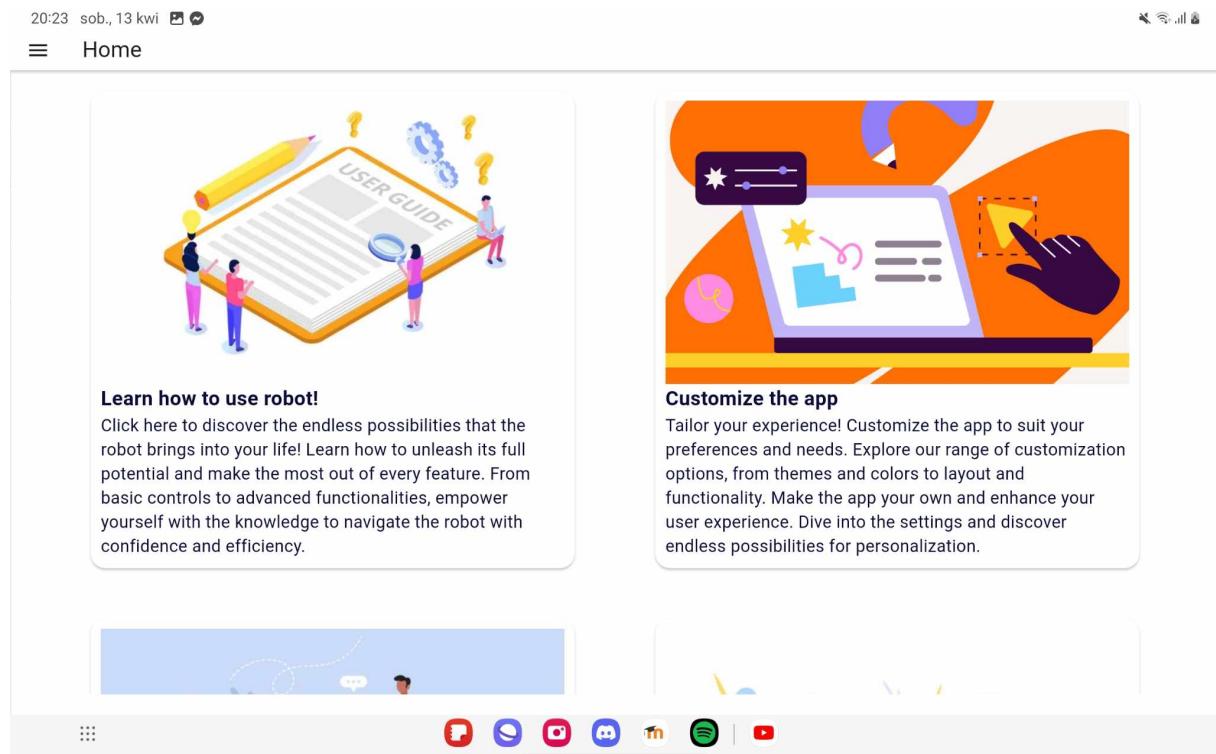
Przez wzgląd na tematykę projektu implementacja aplikacji nie zostanie w poniższym raporcie szczegółowo omówiona. Zostanie przedstawiony podstawowy interfejs graficzny oraz zasada działania kluczowych funkcji, takich jak połączenie lub realizacja przesyłu danych. Autor uważa, iż pewne wyszczególnienie części metod oraz zastosowanych bibliotek może pomóc niektórym osobom w prostszym znalezieniu informacji na temat poprawnie działającego połączenia z mikrokontrolerem Arduino poprzez Bluetooth.

2.2. Interfejs użytkownika aplikacji

Interfejs użytkownika został zaprojektowany w celu umożliwienia podstawowej kontroli nad robotem. Z tego względu, nie poświęcono mu znacznej ilości czasu na poprawę estetyki.

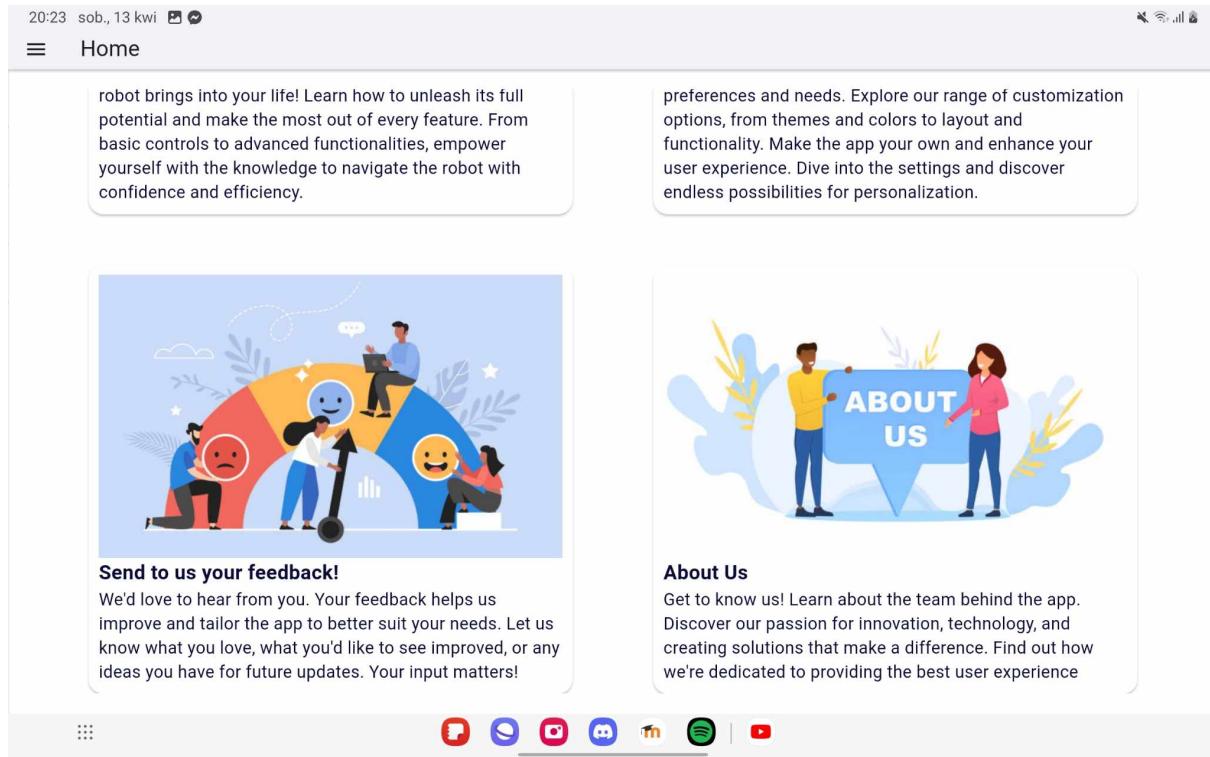
Po uruchomieniu aplikacji użytkownik trafia na ekran początkowy (ang. Home), przedstawiony na Rysunku 1. Ekran ten zawiera cztery wyróżnione obszary, każdy z których pełni określona funkcję. Pierwsza sekcja ma na celu wprowadzenie nowego użytkownika w sposób bezpiecznego i poprawnego korzystania oraz sterowania robotem.

Druga sekcja prowadzi do ustawień wyglądu aplikacji, gdzie użytkownik może dostosować kolorystykę i inne elementy graficzne interfejsu.



Rysunek 1: Ekran początkowy aplikacji

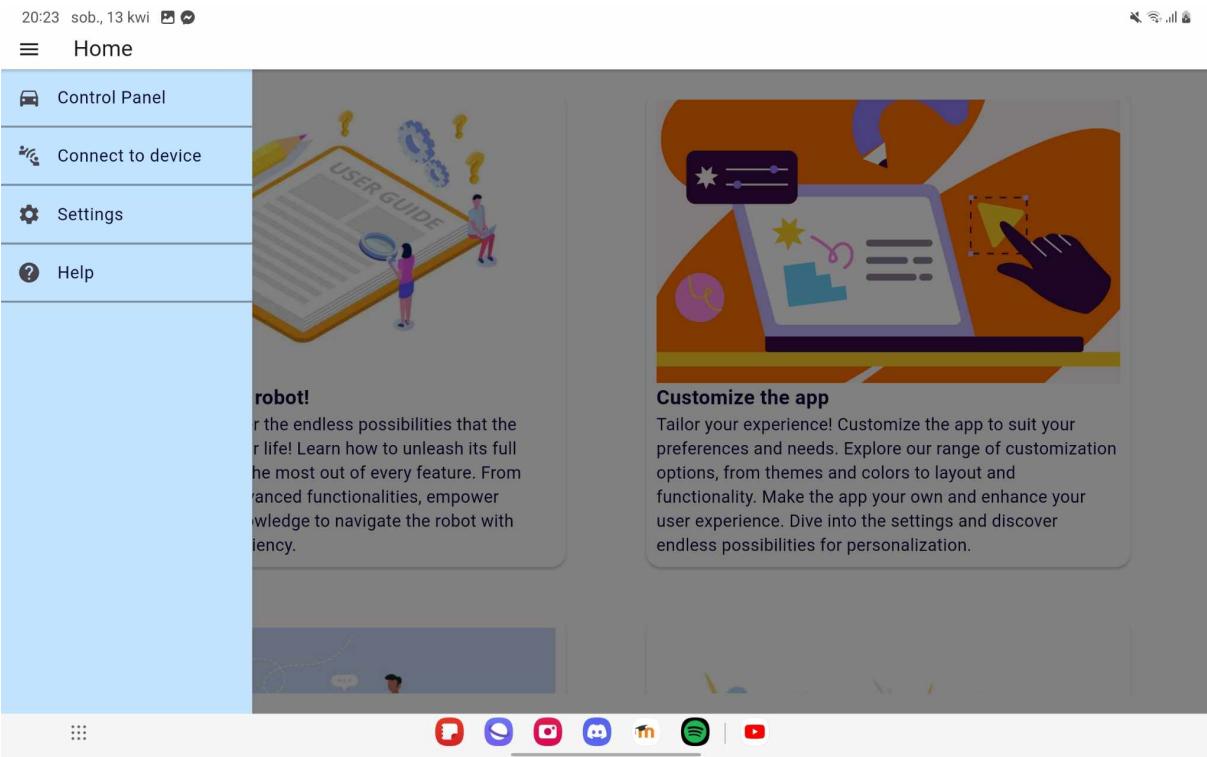
Trzecia i czwarta sekcja dotyczą genezy projektu oraz zespołu, który stworzył robota i aplikację. Ponadto, umożliwiają one użytkownikom przesyłanie opinii, co pozwala na wprowadzenie przyszłych aktualizacji mających na celu poprawę jakości korzystania z aplikacji.



Rysunek 2: Obraz prezentujący ekran początkowy aplikacji

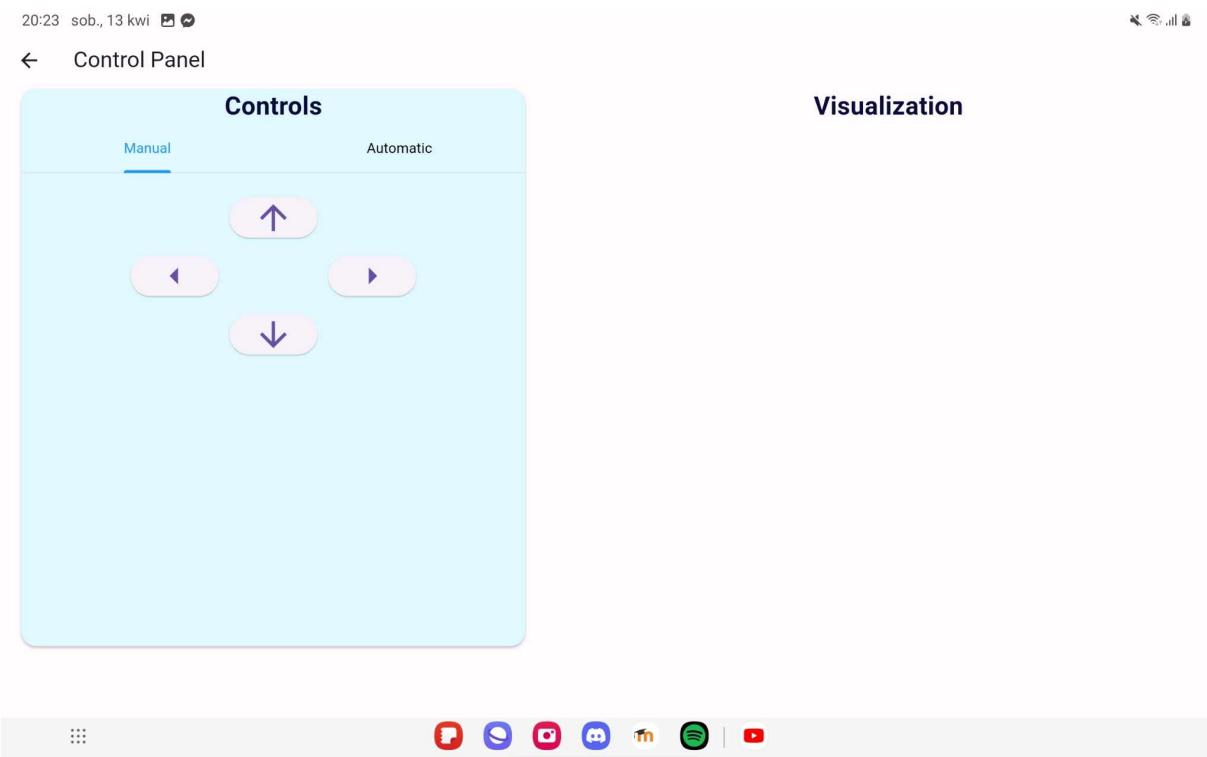
W lewym górnym rogu ekranu znajduje się standardowy dla aplikacji mobilnych przycisk rozwijający menu boczne. Menu zawiera wszystkie niezbędne zakładki, takie jak:

- *Control Panel* (Panel Kontrolny) – umożliwia sterowanie robotem,
- *Connect to device* (Połącz z urządzeniem) – pozwala na wyszukiwanie i łączenie z urządzeniem,
- *Settings* (Ustawienia) – umożliwia dostosowanie parametrów robota,
- *Help* (Pomoc) – zawiera informacje o korzystaniu z aplikacji oraz dane kontaktowe działu wsparcia.



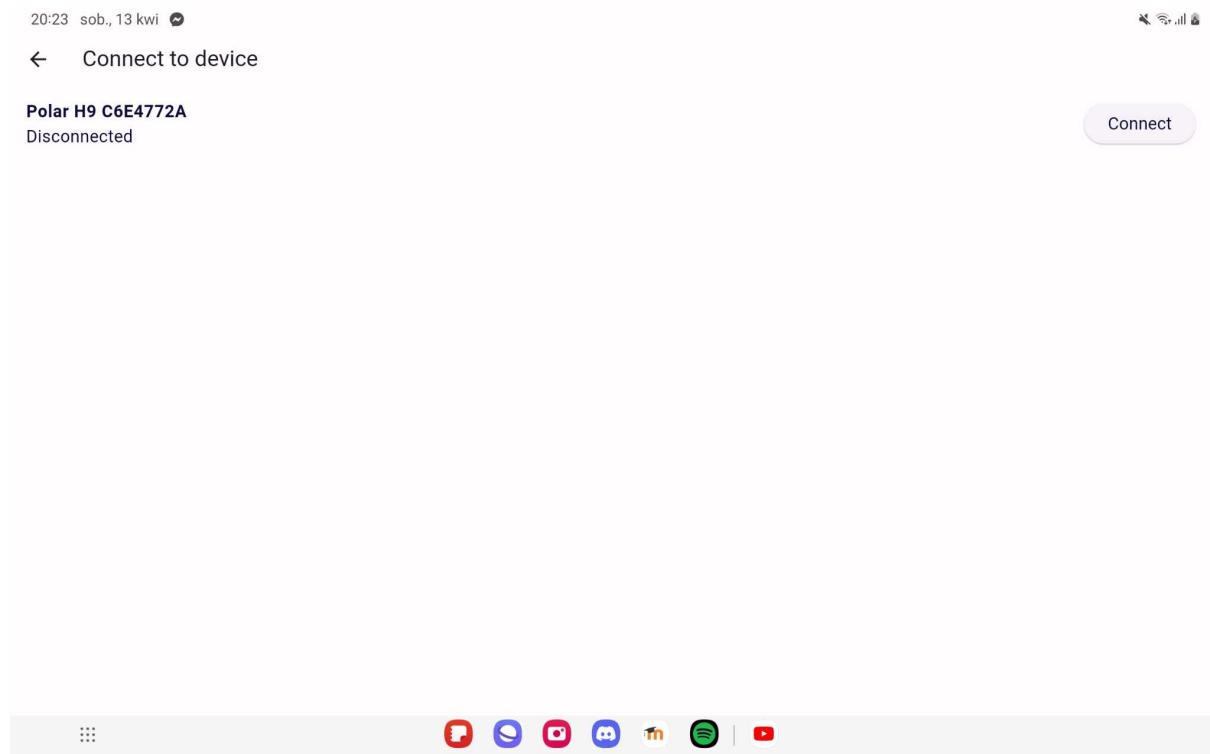
Rysunek 3: Menu boczne aplikacji

Po włączeniu pierwszej zakładki użytkownik zostaje przekierowany do strony odpowiedzialnej za sterowanie robotem. Ekran ten podzielony jest na dwie sekcje. Pierwsza z nich, zatytułowana *Controls* (Kontrolki), umożliwia bezpośrednie sterowanie robotem poprzez odpowiednie przyciski. Po prawej stronie znajduje się sekcja, która w przyszłości ma wyświetlać animację przedstawiającą robota w ruchu.



Rysunek 4: Ekran kontroli robota

Kolejną zakładką jest ekran wyświetlający dostępne urządzenia Bluetooth. Użytkownik może połączyć aplikację z wybranym urządzeniem poprzez naciśnięcie przycisku *Connect* (Połącz). Zaleca się łączenie wyłącznie z urządzeniami będącymi częścią systemu robota.



Rysunek 5: Ekran połączenia z urządzeniami

Zakładki takie jak *Settings* (Ustawienia) i *Help* (Pomoc) nie zostały zaimplementowane z powodu zmiany priorytetów podczas rozwoju projektu. Niemniej jednak aplikacja ma duży potencjał rozwoju i może zostać rozbudowana w przyszłości.

2.3. Implementacja połączenia Bluetooth

Kluczową informacją potrzebną do nawiązania połączenia z mikrokontrolerem Arduino UNO R4 jest fakt, iż mikrokontroler ten korzysta ze specyficznego rodzaju Bluetooth - Bluetooth Low Energy (BLE). W związku z tym konieczne było wykorzystanie odpowiedniej biblioteki, takiej jak *flutter_blue*. Bibliotekę tę można pobrać za pomocą narzędzia w terminalu, wpisując komendę:

```
flutter pub add flutter_blue
```

Drugą istotną kwestią jest konieczność wykorzystania fizycznego urządzenia do uruchamiania aplikacji. Jest to zalecane ze względu na brak możliwości wyszukiwania urządzeń Bluetooth w niektórych emulatorach.

Pierwszym krokiem do nawiązania połączenia jest wyświetlenie listy wszystkich dostępnych urządzeń Bluetooth. W tym celu wykonywana jest funkcja *_startScan()*, której zadaniem jest pobranie wszystkich dostępnych urządzeń i dodanie ich do listy w celu późniejszego wyświetlenia.

Funkcja *_getPairedDevices()* zwraca wszystkie urządzenia, które zostały pomyślnie sparowane.

Po zakończeniu skanowania proces jest zamknięty przy pomocy funkcji *_stopScan()*.



```
1 void _getPairedDevices() {
2     flutterBlue.connectedDevices.then((List<BluetoothDevice> devices) {
3         setState(() {
4             pairedDevices = devices;
5         });
6     });
7 }
8
9 void _startScan() {
10    flutterBlue.scanResults.listen((List<ScanResult> results) {
11        setState(() {
12            devices.clear();
13            for (ScanResult result in results) {
14                if (!devices.contains(result.device)) {
15                    devices.add(result.device);
16                }
17            }
18        });
19    });
20    flutterBlue.startScan();
21 }
22
23 void _stopScan() {
24     flutterBlue.stopScan();
25 }
```

Rysunek 6: Fragment kodu źródłowego zawierający implementację wyszukiwania dostępnych urządzeń

Kolejnym krokiem jest nawiązanie połączenia z wybranym urządzeniem. Proces ten jest realizowany przez funkcję `_connectToDevice()`, która jako parametr przyjmuje referencję do wybranego urządzenia z listy. Funkcja ta wywołuje metodę kończącą skanowanie, a następnie na instancji klasy `BluetoothDevice` wywołuje metodę `connect()`, która realizuje połączenie. Klasa `BluetoothDevice` jest dostępna dzięki użyciu biblioteki `flutter_blue`.



```
1 void _connectToDevice(BluetoothDevice device) async {
2     _stopScan();
3     await device.connect();
4     setState(() {
5         connectedDevice = device;
6     });
7     Provider.of<ConnectedDeviceProvider>(context, listen: false)
8         .setConnectedDevice(device);
9     PopupInfo.showInfo(
10         context,
11         'The connection have been established correctly with device: ${device}',
12         InfoType.success);
13 }
```

Rysunek 7: Fragment kodu źródłowego zawierający implementację nawiązywania połączenia BLE

2.4. Implementacja przesyłania danych

Proces przesyłania informacji do urządzenia Bluetooth opiera się na metodzie `sendValueToArduino()`. Ta metoda przyjmuje dwa parametry: referencję do połączonego urządzenia oraz wartość, która ma zostać przesłana.

Pierwszym krokiem w tej metodzie jest weryfikacja, czy urządzenie zostało poprawnie połączone oraz, czy jest możliwe przesłanie danych. W przypadku niepowodzenia tej weryfikacji, w konsoli zostaje wyświetlona stosowna informacja diagnostyczna, co pozwala na szybkie zidentyfikowanie problemu.

Następnie metoda wyszukuje urządzenia o konkretnej charakterystyce, która jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania połączenia. Znalezienie urządzenia o odpowiedniej charakterystyce jest kluczowe, ponieważ zapewnia, że dane zostaną przesłane do właściwego odbiorcy.

Jeśli charakterystyka urządzenia zgadza się z oczekiwana, wartość jest przesyłana. Taki proces zapewnia nie tylko prawidłowość przesyłania danych, ale również bezpieczeństwo połączenia.

Poniżej znajduje się fragment kodu źródłowego, który ilustruje implementację logiki przesyłania informacji do urządzenia.



```
1 class SendingServices {
2     Future<void> sendValueToArduino(
3         BluetoothDevice? connectedDevice, int value) async {
4     if (connectedDevice != null) {
5         List<int> dataToSend = [value];
6         List<BluetoothService> services =
7             await connectedDevice.discoverServices();
8         BluetoothCharacteristic? characteristic;
9
10        services.forEach((service) {
11            service.characteristics.forEach((char) {
12                if (char.uuid.toString() == '19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1215') {
13                    characteristic = char;
14                }
15            });
16        });
17
18        if (characteristic != null) {
19            await characteristic!.write(dataToSend, withoutResponse: false);
20            print('Sent value $value to Arduino.');
21        } else {
22            print('Error: Characteristic not found.');
23        }
24    } else {
25        print('Error: Not connected to any device.');
26    }
27 }
28 }
```

Rysunek 8: Fragment kodu źródłowego zawierający implementację logiki przesyłania informacji do urządzenia

2.5. Implementacja prostego skryptu w odczytującego dane z kanału BLE

Fragment prezentowanego kodu rozpoczyna się od zadeklarowania zmiennych globalnych opisujących charakterystyki połączenia Bluetooth. Pierwsza charakterystyka określa identyfikator typu GUID serwisu, następna określa, na jaki identyfikator przesyłane są zdarzenia typu "request". Ostatnia wartość definiuje identyfikator, na jaki są przesyłane zdarzenia typu 'response". W przypadku aktualnej wersji aplikacji istotna jest tylko wartość identyfikująca serwis oraz zdarzenia typu request, ponieważ mikrokontroler nie zwraca żadnej informacji do aplikacji. W razie dalszego rozwoju projektu zostanie zaimplementowanie wyświetlanie diagnostyki robota, stanu naładowania baterii oraz stanu pracy silników.

Funkcja `t5Callback()` ma za zadanie pobierać wartość, która aktualnie została przesłana do kanału Bluetooth z poziomu aplikacji. Argumenty wejściowe funkcji to urządzenie, z którym Arduino nawiązało połączenie, drugi argument to wcześniej wspomniany identyfikator zdarzenia "request".

Następnie wartość jest odczytywana z kanału za pomocą funkcji `readValue()`. Funkcja ta jest częścią biblioteki `ArduinoBLE.h`.

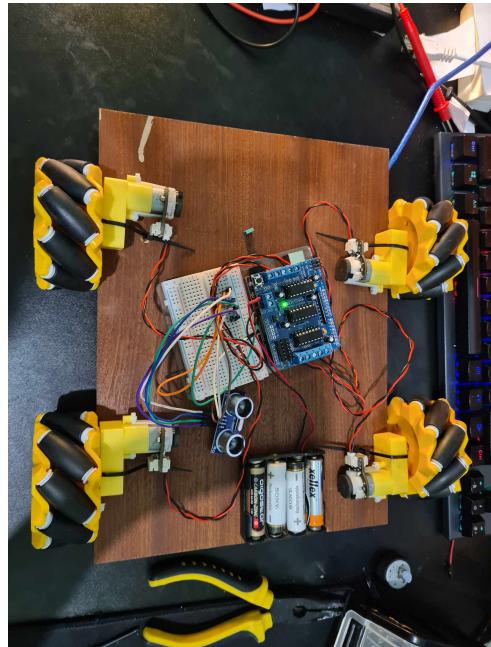
W funkcji `setup()` następuje inicjalizacja odpowiednich charakterystyk oraz za pomocą funkcji `setEventHandler()` zostaje określona sytuacja, w której nastąpi wywołanie funkcji `t5Callback` oraz odczytanie danych z kanału.

```
 1 const char *deviceServiceUuid = "19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214";
 2 const char *deviceServiceRequestCharacteristicUuid = "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1215";
 3 const char *deviceServiceResponseCharacteristicUuid = "19b10001-e8f2-537e-4f6c-d104768a1216";
 4
 5 BLEService servoService(deviceServiceUuid);
 6 BLEStringCharacteristic servoRequestCharacteristic(
 7   deviceServiceRequestCharacteristicUuid, BLEWrite, 20); // Increased buffer size to 20
 8 BLEStringCharacteristic servoResponseCharacteristic(
 9   deviceServiceResponseCharacteristicUuid, BLENotify, 20); // Increased buffer size to 20
10
11 void t5Callback(BLEDevice central, BLECharacteristic characteristic) {
12   if (central.connected()) {
13     if (characteristic == servoRequestCharacteristic)
14     {
15       int16_t value = 0;
16       servoRequestCharacteristic.readValue(&value, 2);
17       Serial.println("Received value: ");
18       Serial.println(value);
19     }
20   }
21 }
22
23
24 void setup() {
25   Serial.begin(9600);
26
27   BLE.setDeviceName("Arduino APP");
28   BLE.setLocalName("Arduino APP");
29
30   if (!BLE.begin()) {
31     Serial.println("- Starting Bluetooth® Low Energy module failed!");
32     while (1);
33   }
34
35   BLE.setAdvertisedService(servoService);
36   servoService.addCharacteristic(servoRequestCharacteristic);
37   servoService.addCharacteristic(servoResponseCharacteristic);
38   servoRequestCharacteristic.setEventHandler(BLEWritten, t5Callback); // Set the callback function for when data is written to the characteristic
39   BLE.addService(servoService);
40   servoResponseCharacteristic.writeValue("0");
41
42   BLE.advertise();
43
44   Serial.println("Arduino BLE (Peripheral Device)");
45   Serial.println(" ");
46 }
```

Rysunek 9: Fragment kodu źródłowego przedstawiający implementację konfiguracji kanału Bluetooth na Arduino

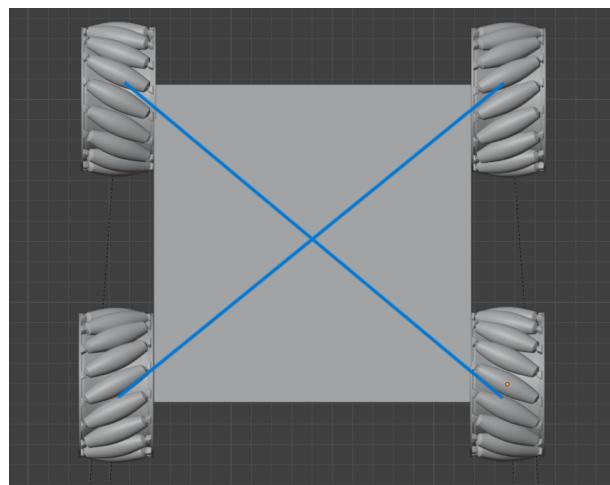
2.6. Proces wykonywania projektu obudowy robota

Proces projektowania obudowy dla platformy jeżdżącej stanowił wieloetapowe zadanie, które wymagało dokładnego zaplanowania i licznych poprawek. Pierwsza faza obejmowała stworzenie prototypu, który miał na celu optymalne rozmieszczenie komponentów oraz weryfikację ich poprawnego działania. Ten etap pozwalał zidentyfikować ewentualne problemy konstrukcyjne i funkcjonalne na wczesnym etapie prac.

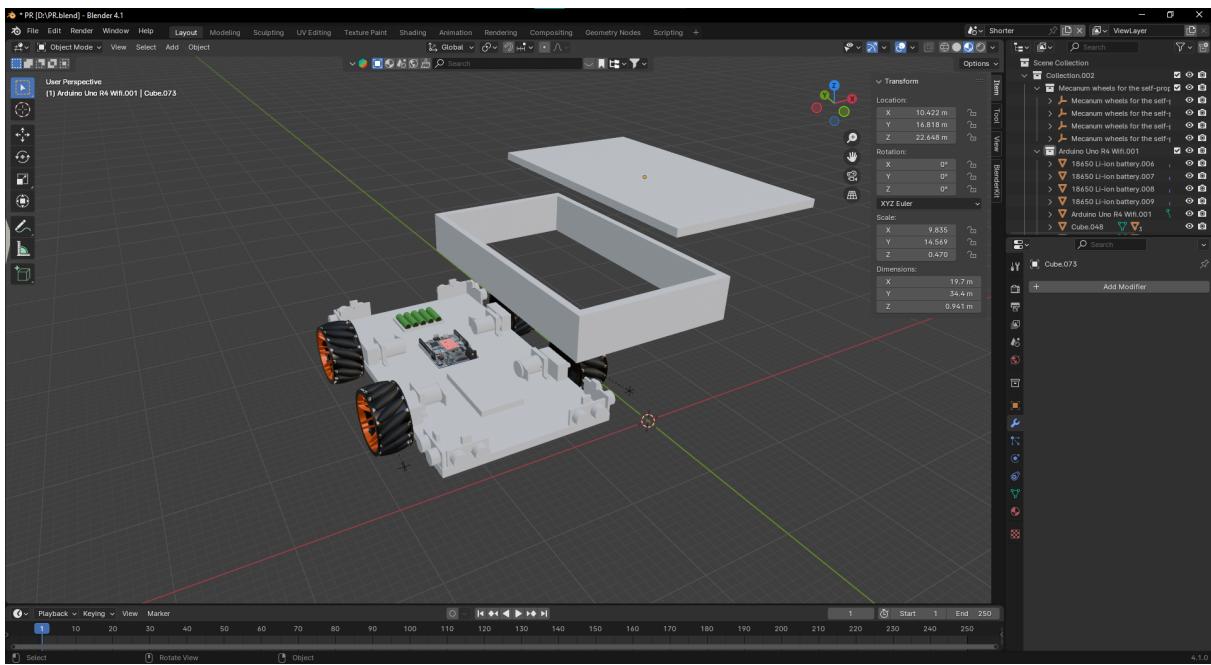


Rysunek 10: Prototypowa konstrukcja mająca na celu sprawdzenie poprawności działania komponentów.

Kolejnym krokiem było opracowanie specjalnej obudowy, zdolnej pomieścić wszystkie wymagane elementy, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej geometrii kół szwedzkich (zwanych również kołami Mecanum). Aby robot działał zgodnie z założeniami, koła musiały być rozmieszczone w orientacji X Y równych odstępach od siebie, a ich rolki powinny być skierowane do środka. Konieczne jest, aby z rzutu górnego posiadał przedłużenie osi kół w kształcie znaku X.

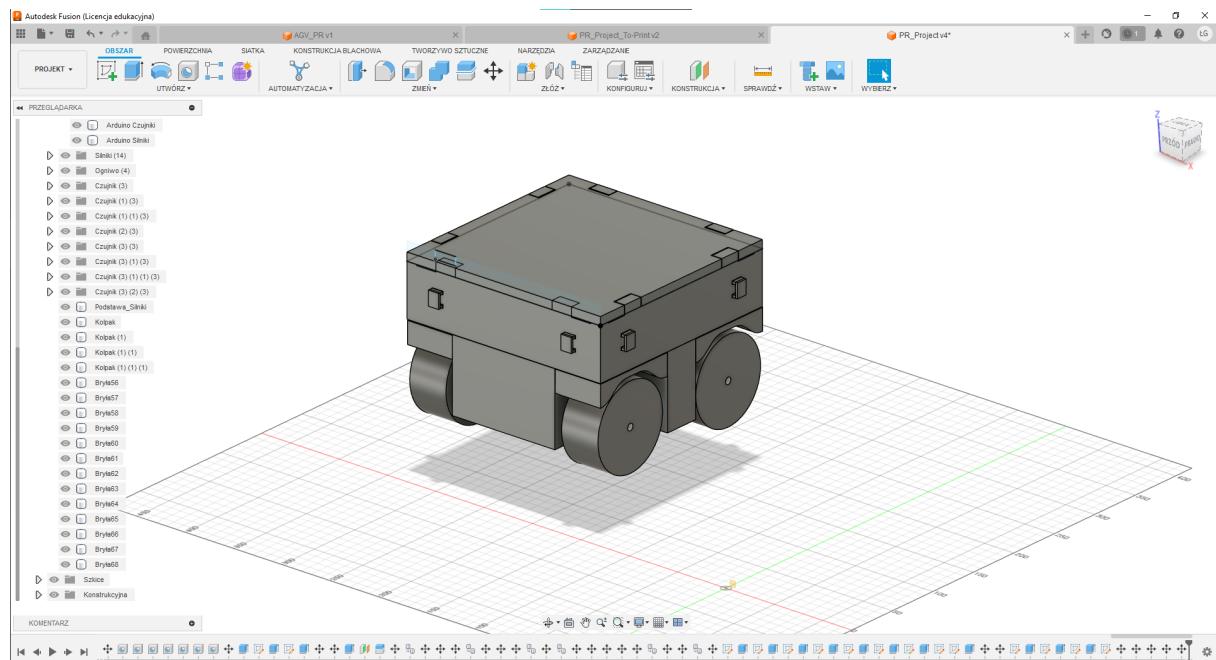


Rysunek 11: Plan rozmieszczenia kół szwedzkich. Kluczowe jest zachowanie kół w równych odstępach od siebie oraz utworzenie znaku X.



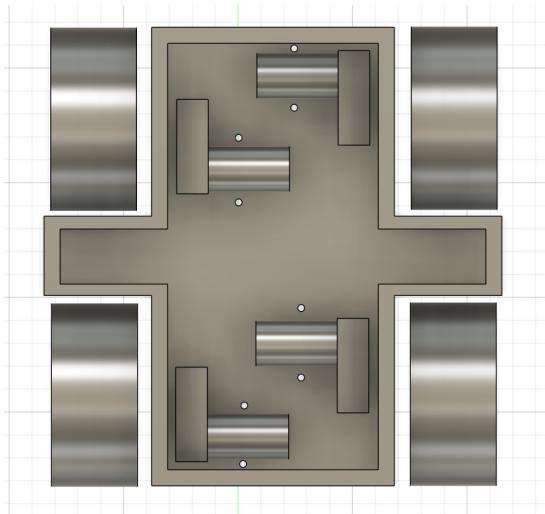
Rysunek 12: Pierwsza wersja projektu zamodelowana w programie Blender 4.1.

Jednakże podczas pierwszego etapu projektu nastąpiły problemy logiczne i konstrukcyjne. Pierwotnie używany darmowy program Blender 4.1 okazał się niewystarczający ze względu na niezgodność formatów eksportu z wymaganiami dostępnej drukarki 3D. W związku z tym konieczne było przejście na bardziej zaawansowane narzędzie, jakim jest AutoDesrk Fusion. To oprogramowanie pozwoliło na dokładniejsze zaprojektowanie modelu, uwzględniając specyfikację drukarki, która posiadała obszar roboczy o wymiarach 25 cm x 25 cm. Z tego powodu, model musiał zostać zaprojektowany od nowa, z uwzględnieniem ograniczeń.

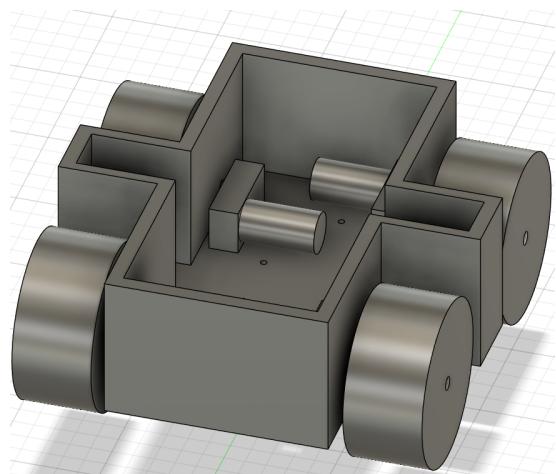


Rysunek 13: Wizualizacja gotowego modelu w programie AutoDesrk Fusion.

Gotowy produkt składa się z dwóch pięter, z których każde pełni inną funkcję. Pierwsze piętro to "piętro maszynowe", gdzie umieszczone zostały moduły napędowe, takie jak silniki kątowe wraz z przekładnią oraz ogniva zasilające w ilości dwóch wraz ze sterownikiem BMS. Wszystkie istotne kable zostały przeprowadzone przez specjalnie przygotowany otwór do drugiego piętra.

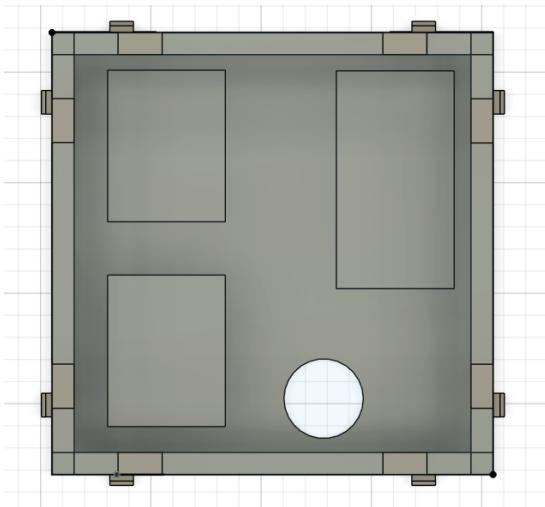


Rysunek 14: Widok rzutu górnego na pierwsze piętro modelu. Znajdują się w nim silniki kątowe z przekładnią oraz miejsce na ogniva zasilające wraz z BMS.

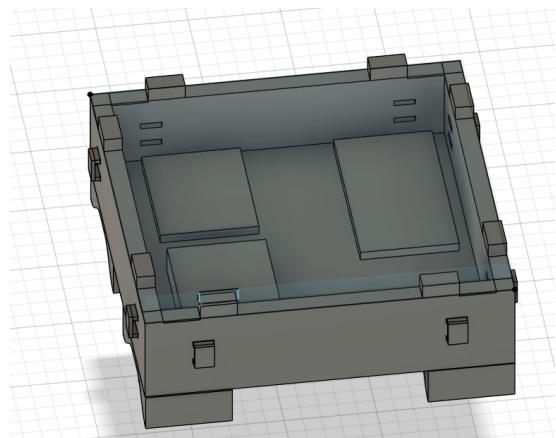


Rysunek 15: Widok rzutu bocznego na pierwsze piętro modelu.

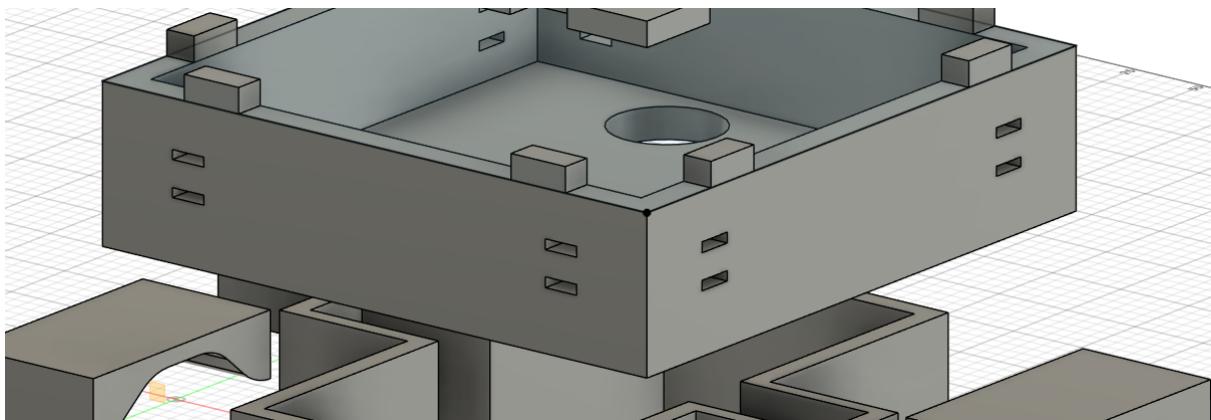
Drugie piętro to "mózg operacyjny" całego projektu. Zawiera ono kluczowe połączenia elektroniczne, w tym dwa mikrokontrolery Arduino UNO 4 i 3 w konfiguracji Master-Slave, oraz osiem czujników laserowych umieszczonych w przygotowanych otworach na ścianach bocznych. Takie rozmieszczenie i organizacja komponentów pozwalały na efektywne zarządzanie funkcjami robota.



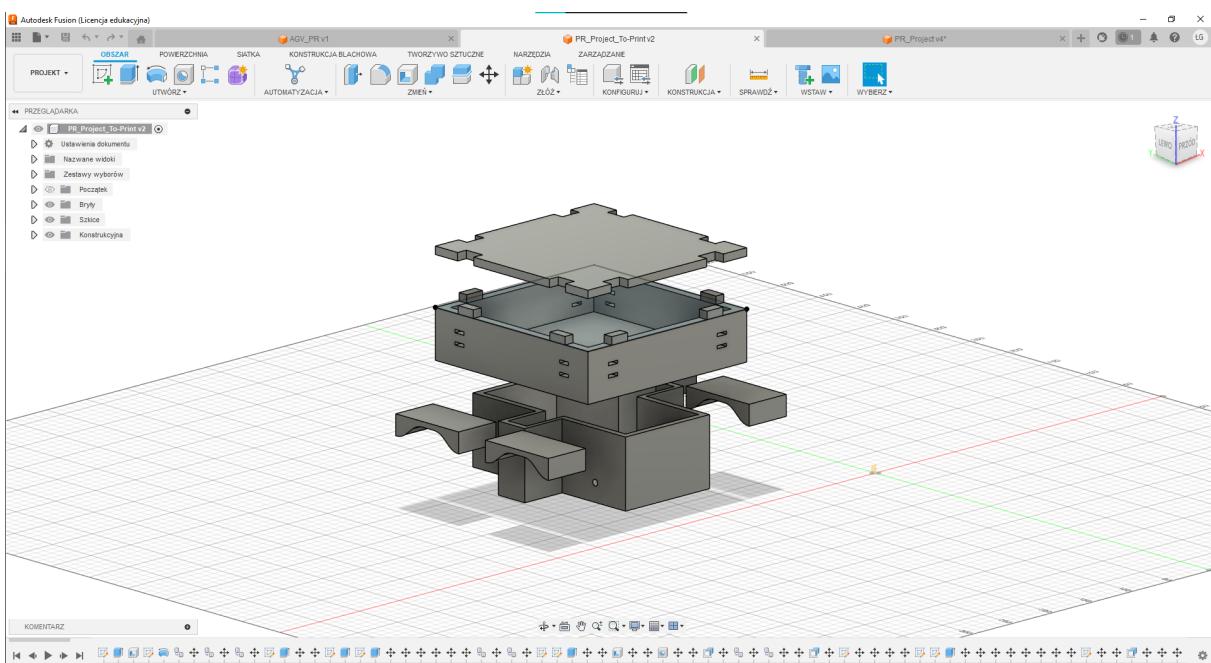
Rysunek 16: Widok rzutu górnego na drugie piętro modelu. Znajdują się w nim dwa mikrokontrolery Arduino UNO oraz płytka stykowa.



Rysunek 17: Widok rzutu bocznego na drugie piętro modelu.

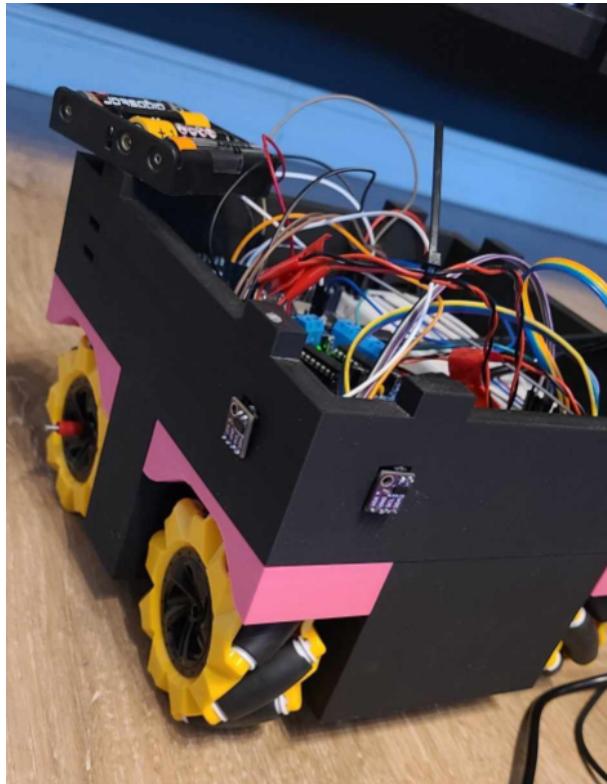


Rysunek 18: Widok rzutu bocznego na specjalnie przygotowane miejsca do wsunięcia czujników laserowych.



Rysunek 19: Gotowy model przesłany do wydruku. Został pozbawiony elementów stylistycznych takich jak koła, silniki kątowe, mikrokontrolerów Arduino UNO oraz czujników laserowych.

Gotowy model zawiera się w wymiarach 20 cm x 20 cm x 15 cm oraz wykonuje wszystkie zadane ruchy zdolne do wykonania tylko przy pomocy kół szwedzkich. Pojazd wykonuje jazdę w kierunku w przód i w tył oraz w lewo i w prawo, jak i obrót w miejscu.



Rysunek 20: Gotowy model po złożeniu wszystkich elementów w całość.

2.7. Implementacja prostego kodu weryfikującego prawidłowe połączenie silników

Do połączenia silników z Arduino wykorzystano nakładkę Iduino ST1138. Umożliwia ona sterowanie czterema silnikami prądu stałego, o poborze prądu do 600 mA i napięciu zasilania do 36 V. Nakładka jest zasilana dwoma ogniwami 18650.

Weryfikacja połączenia silników została wykonana przy użyciu skryptu zamieszczonego poniżej. Na początku skryptu dodane są biblioteki Wire i AFMotor. Biblioteka Wire jest wykorzystywana do połączenia obu modułów Arduino w konfiguracji master-slave, natomiast biblioteka AFMotor służy do sterowania silnikami z nakładki Iduino.

W następnych liniach zdefiniowane są: adres urządzenia slave oraz globalna wartość bezpiecznego dystansu, który jest potrzebny, aby w przypadku wystającego gzymsu, który mógłby ominąć czujniki, pojazd nie zahaczył o niego.

Dalsza część kodu zawiera wykorzystanie biblioteki AFMotor i przypisanie konkretnych silników do zmiennych.

W ostatniej części, czyli setup, znajduje się połączenie przez bibliotekę Wire, rozpoczęcie komunikacji z prędkością 9600 bitów na sekundę (`Serial.begin(9600)`) oraz ustawienie prędkości wszystkich silników.

Do weryfikacji działania silników można zakomentować pozostałe ustawienia `setSpeed`, tak aby pozostało tylko jedno i sprawdzić, który silnik jest uruchomiony.

```

#include <Wire.h>
#include <AFMotor.h>

#define SLAVE_ADDR 9           // Address of the slave device
#define THRESHOLD_DISTANCE 20 // borderline for distance to the wall

// -----
// Creation of all necesary global instances
// -----

// Motor drivers
AF_DCMotor motor1(1);
AF_DCMotor motor2(2);
AF_DCMotor motor3(3);
AF_DCMotor motor4(4);

// -----
// Other global variables
// -----

int rd; // Global variable that stores value from I2C BUS

// -----
// -----


void setup() {

    Wire.begin(SLAVE_ADDR);
    Wire.onReceive(receiveEvent);
    Serial.begin(9600);
    motor1.setSpeed(250);
    motor2.setSpeed(250);
    motor3.setSpeed(250);
    motor4.setSpeed(250);
    Serial.println("Set up done.");
}

```

Rysunek 21: Fragment kodu źródłowego przedstawiający weryfikację prawidłowego połączenia silników

2.8. Podłączenie oraz weryfikacja poprawności działania czujników laserowych

We wczesnej fazie planowania zakładano wykorzystanie ultradźwiękowych czujników odległości. Pomyśl ten okazał się nietrafiony ze względu na sposób przekazywania danych przez te czujniki. Każdy czujnik posiada dwa wyprowadzenia, co przy użyciu ośmiu czujników wymagałoby wykorzystania co najmniej 16 pinów Arduino.

Następnie analiza skupiła się na wykorzystaniu magistrali I2C, która umożliwia podłączenie dużej

liczby czujników za pomocą niewielkiej liczby pinów. Kluczowym warunkiem jest poprawna komunikacja między czujnikiem a mikrokontrolerem.

Laserowe czujniki odległości VL53L0X okazały się trafnym wyborem ze względu na ich korzystny stosunek jakości do ceny. Pomiary odległości są wystarczająco dokładne, a biorąc pod uwagę charakter obiektu wykrywanego, wysoka precyzja nie jest wymagana.

Czujniki zostały podłączone zgodnie z przeznaczeniem poprzez magistralę I2C. Kluczową rolę w podłączaniu wielu identycznych czujników odegrało użycie dodatkowego pinu XSHUT oraz odpowiedniej sekwencji kodu, aby pomyślnie zmienić adres czujnika na magistrali I2C.

Pierwszym krokiem jest ustawienie odpowiedniego pinu GPIO (ang. General Purpose Input/Output) Arduino, podłączonego do pinu XSHUT czujnika, w trybie OUTPUT. Następnie należy skorzystać z funkcji `setAddress()`, aby ustawić odpowiedni adres dla wybranego czujnika. Kolejnym krokiem jest przełączenie stanu pinu Arduino na INPUT oraz odczekanie 10 milisekund.

Wykonanie powyższej sekwencji gwarantuje poprawną zmianę adresu czujnika na magistrali I2C. Użycie samej funkcji `setAddress()` bez zastosowania pinu XSHUT nie zmieni adresu czujnika.



```
1 #define Sensor2_newAddress 42
2
3 pinMode(XSHUT_pin2, OUTPUT);
4
5 Sensor2.setAddress(Sensor2_newAddress);
6 pinMode(XSHUT_pin2, INPUT);
7 delay(10);
```

Rysunek 22: Fragment kodu źródłowego przedstawiający sekwencję konieczną do zmiany adresu czujnika

2.9. Montaż silników wewnętrz dolnej komory obudowy

Silniki zostały przymocowane do dolnej części pojazdu za pomocą taśmy aluminiowej. Po wykonaniu tego kroku przystąpiono do montażu kół na silnikach. Koła zostały zamontowane na wygwintowanej szprysze, która została przymocowana bezpośrednio do silników.

W celu wyeliminowania luzów na silnikach podjęto dodatkowe działania. Wycięto dwie listwy aluminiowe, które zamontowano w taki sposób, aby przez nie przechodziły szprychy. Dzięki zastosowaniu tych listew, luz na kołach został znacznie zminimalizowany, co zapewniło stabilność całej konstrukcji.

Wykonanie tych czynności pozwoliło na usztywnienie wału silnika i zapewniło solidne połączenie kół z silnikami.



Rysunek 23: Listwa boczna usztywniająca mocowanie silnika i eliminująca luzy na kole.

2.10. Montaż ogniw wraz z układem BMS oraz podłączenie czujników

Wszystkie uprzednie kroki realizacji projektu były wykonywane przy prowizorycznym zasilaniu przez cztery baterie alkaliczne połączone szeregowo. Tego typu zasilanie posiada szereg problemów, które utrudniałyby użytkowanie robota, a także nie zostało zgłębione pod względem efektywności. W związku z tym następnym krokiem do stworzenia w pełni funkcjonalnego robota AGV jest analiza zapotrzebowania energetycznego i potencjalnych źródeł energii.

2.10.1. Obliczanie parametrów zasilania

Robot AGV korzysta z czterech silników kątowych z przekładnią SJ02. Każdy silnik sterowany jest z nakładki na zestaw Arduino L293D Motor Driver Board. Moduł ten pozwala na regulowanie prędkości obrotowej i kierunku czterech silników prądu stałego o prądzie do $I_n = 600mA$ i napięciu do $U_n = 36V$. Zasilanie silników zaleca się poprowadzić przez kanał odseparowany od linii zasilania z USB. Sam moduł musi być zasilany napięciem 4,5 do 16 V, w przypadku napięcia wyższego niż 12 V, zaleca się zasilać osobno moduł i Arduino zdejmując zworkę PWR_IMP. Specyfikację L293D Motor Driver Board przedstawiono na Rysunku 24.

Specyfikacja sterownika silników krokowych

- Napięcie zasilania: 4,5 V do 16 V
- Sterownik: 2 x L293D
- Maksymalny prąd na kanał: 600 mA (chwilowy do 1,2 A)
- Rejestr przesuwny 74HC595
- Liczba obsługiwanych silników:
 - 4 silniki DC
 - 2 silniki krokowe
 - 2 złącza serw
 - Przycisk reset

Rysunek 24: Specyfikacja modułu L293D Motor Driver Board. [BOT24a]

Silniki prądu stałego posiadają następującą specyfikację (Rys. 25). Silnik na biegu jałowym pobiera prąd od $I_{o_{min}} = 140mA$ do $I_{o_{max}} = 170mA$, a podczas zwarcia (unieruchomiony wał) może płynąć maksymalnie prąd $I_{stall} = 2,8A$.

Specyfikacja silnika kątowego z przekładnią

- Napięcie pracy silnika: od 3 V do 7,5 V
- Przekładnia: 120:1
- Parametry dla pracy bez obciążenia przy zasilaniu 6 V
 - Prędkość: 160 obr/min
 - Prąd: 0,17 A
- Parametry dla pracy bez obciążenia przy zasilaniu 3 V
 - Prędkość: 60 obr/min
 - Prąd: 0,14 A
- Maksymalny prąd: 2,8 A
- Maksymalny moment obrotowy: 0,8 kg*cm (0,07 Nm)
- Szacunkowy moment obrotowy: 0,2 kg*cm (0,02 Nm)
- Napięcie pracy enkodera: od 4,5 V do 7,5 V
- Średnica wału: 5,4 mm (obustronnie ścięty)
- Temperatura pracy: od -10 °C do 60 °C
- Masa: 50 g

Rysunek 25: Specyfikacja silnika TT Geared Motor with Encoder. [BOT24d]

Zasilanie silników powinno w związku z tym posiadać napięcie jednego silnika $U = 3 \dots 7,5V$ i sumę prądów znamionowych każdego silnika czyli $I = 560 \dots 680mA$, a także posiadać gotowość na pobór maksymalnego prądu zwarciowego, w przypadku zatrzymania wszystkich kół robota $I_{stall} = 11,2A$, wartości te umieszczone w tabeli (Tab. 1). Dodatkowo, warto zadbać o maksymalnie dużą pojemność, by robot mógł działać jak najdłużej.

Specyfikacja zasilania silników prądu stałego	Wartość min	Wartość max
U[V]	3	7,5
I [mA]	560	680
I_{stall}	11200	

Tabela 1: Wymagane wartości zasilania silników.

Arduino i moduł sterujący silnikami mogą być wspólnie zasilane dowolnym pakietem ogniw o napięciu $U_{ster} = 4,5 \dots 12V$. Komfortowym rozwiązaniem może okazać się użycie powerbanka, jako że posiada on wbudowane wejście na kabel USB, które pozwala na łatwe połączenie.

2.10.2. Dobór zasilania

Robot musi być zasilany przez baterie, żeby mógł być w pełni mobilny. Znając wymagania zasilania, należy teraz rozpatrzyć możliwe typy ogniw i ich połączenia. Połączenie równoległe ogniw sumuje pojemność i obciążalność pakietu $I_{rownolege} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$, a połączenie szeregowe napięcie $U_{szeregowe} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$. Pakiety te oznacza się nomenklaturą XSYP, gdzie X to liczba ogniw połączonych szeregowo, a Y ilość ogniw połączonych równolegle dla każdej baterii w szeregu, np. 3S2P oznacza pakiet 6 ogniw, 3 połączone szeregowo i 2 równolegle dla każdej baterii w szeregu.

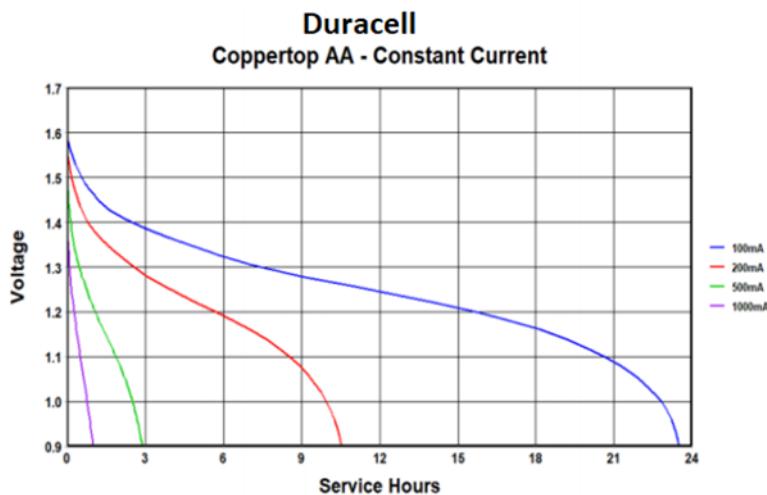
Pakiet powinien mieć wypadkowe napięcie $U = 3 \dots 7,5V$, a także być gotowy na pobór prądu zeweariowego $I_{stall} = 11,2A$ w przypadku zaklinowania wszystkich kół robota. W związku z tym moc zasilania powinna wynosić $P = 33,6 \dots 67,2W$.

(A) Baterie alkaliczne

Ten rodzaj baterii charakteryzuje się jednorazowością, wykorzystując roztwór alkaliczny jako elektrolit. Napięcie ogniwa zwyczajowo wynosi 1,5 V. Ich dużą zaletą jest dostępność i niska cena.

Producenci baterii nie podają pojemności, jako że zależy ona w dużej mierze od warunków, w których bateria pracuje, ale można założyć, że dobre ogniwo alkaliczne typu AA powinno mieć maksymalnie do 2300 mAh. Brakuje także bezpośrednich informacji o maksymalnym prądzie obciążenia, producenci zazwyczaj testują spadek napięcia dla maksymalnie prądu 1 A. Najprawdopodobniej bateria tego typu byłaby w stanie zostać obciążone większym prądem, jednakże patrząc na pojemność widzimy, że czas działania robota spadł by gwałtownie.

Ogniwa tego typu nie są odpowiednie dla zastosowania w robocie, by uzyskać potrzebne napięcie trzeba połączyć dwie baterie szeregowo (2S), jednak z powodu niskiej prędkości obrotowej i spadku napięcia, które następuje gwałtownie wraz z dużym poborem prądu (Rys. 26), należy zastosować 3S lub 4S by uzyskać odpowiedni woltaż.



Rysunek 26: Wykres spadku napięcia do czasu pracy dla prądów ogniwa Duracell. [BOT24c]

Następnym problemem jest jednorazowość ogniw, jeśli wypadkowa pojemność będzie zbyt mała to używanie ich szybko przestanie być opłacalne. Należy także zwrócić uwagę na to, by wypadkowe napięcie nie spadło poniżej 3 V, czyli dla pakietu 3 baterii szeregowych (3S) 1 V na każdej baterii, a dla 4 ogniw szeregowych (4S) 0,75 V. Z wykresu spadków napięć (Rys. 26) widać, że dla prądu 1 A, czas ten nie przekracza nawet 1,5 godziny. Nawet z zgrubnych obliczeń, przyjmując, że prąd obciążenia jednego silnika wynosi 600 mA, pobór prądu robota będzie wynosił 2,4 A. By ograniczyć pobór prądu na jednym pakiecie ogniw szeregowych do wartości wartych uwagi, należy połączyć je równolegle pięciokrotnie (5P), robot będzie wtedy w stanie pracować w układzie 3-szeregowym (3S5P) przez około 2 godziny i 45 minut, w układzie 4-szeregowym (4S5P) czas ten wydłuży się w przybliżeniu do niecałych 3 godzin (należy jednak pamiętać, że z wzrostem napięcia zasilania silniki pobierają większy prąd, co może skrócić te szacowanie [Rys. 25]). W przypadku zwarcia silnika, baterie te zostaną gwałtownie rozładowane i czas pracy robota znacznie spadnie.

Praca robota nie przekracza trzech godzin, a żeby osiągnąć taki wynik trzeba użyć 15 do 20 baterii. Podsumowując krótko, użycie ogniw alkalicznych jest nieopłacalne.

(B) Akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion)

Ogniwa te można ładować, rolę elektrolitu pełnią w nich sole litowe. Napięcie znamionowe wynosi 3,6 V. Ich zaletą jest duża gęstość energii. Ogniwa te nie mogą zostać nadmiernie naładowane, ani rozładowane, w związku z tym potrzebują układu BMS (ang. Battery Management System). Stosunkowo duża cena wymusza budowanie mniejszych pakietów, jednakże możliwość ładowania ogniw znacznie zwiększa funkcjonalność nawet dla krótkiego czasu pracy robota.

Ze względu na dostępność, do obliczeń posłużyono się ogniwem 18650 Li-ion Samsung INR18650-25R 2500mAh 20A (Rys. 27). Ognisko te ma przystępna cenę, wysoką pojemność i przede wszystkim wysoki maksymalny prąd rozładowania, daje to pewność, że w przypadku awarii i zwarcia wszystkich silników nie dojdzie do uszkodzenia baterii i potencjalnego pożaru.

Specyfikacja techniczna ogniska

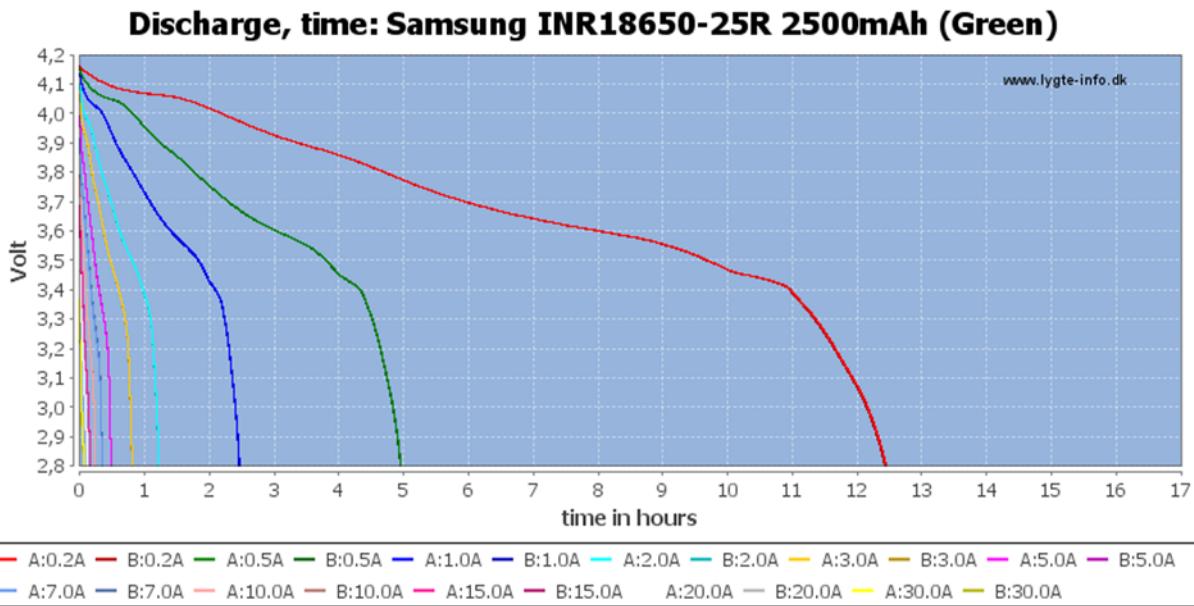


- Oznaczenie: 18650
- Model: Samsung INR18650-25R 20A
- Typ: akumulator litowo-jonowy
- Pojemność typowa: 2500 mAh
- Pojemność minimalna: 2450 mAh
- Napięcie nominalne: 3,7 V
- Maksymalny prąd ładowania: 4 A
- Maksymalny prąd rozładowania: 20 A
- Średnica: 18,3 mm
- Wysokość: 64,85 mm
- Masa: 45 g

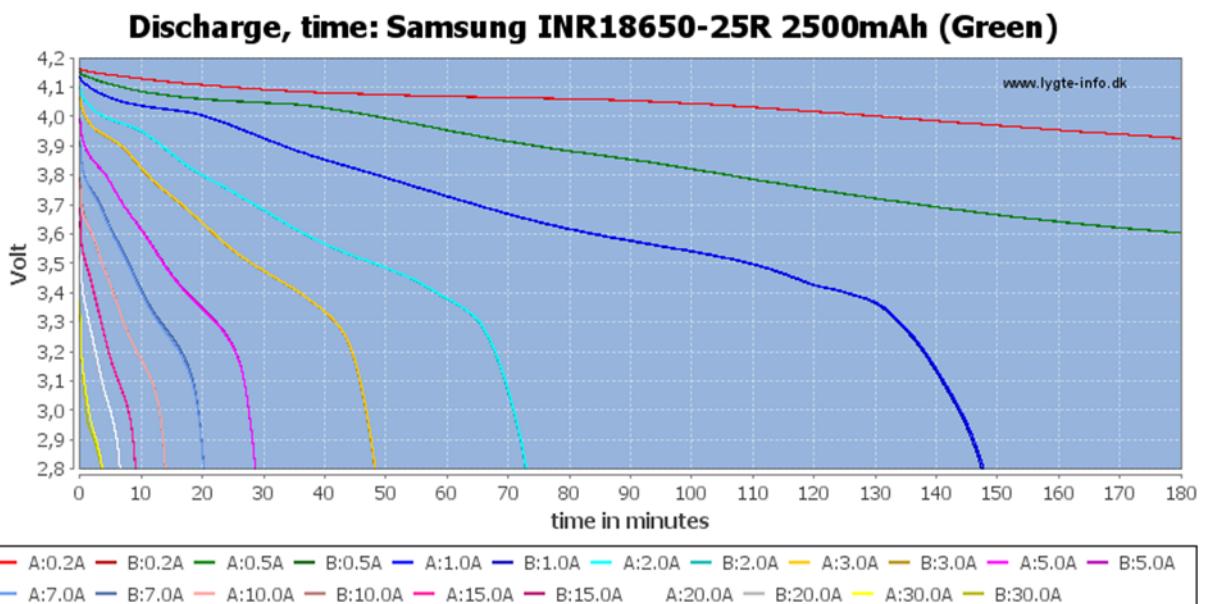
Rysunek 27: Specyfikacja ogniska 18650 Li-ion Samsung INR18650-25R [BOT24b].

Zgodnie z specyfikacją producenta nie należy ładować ognisk powyżej napięcia $4,20 \pm 0,05$ V, a także nie należy rozładowywać go do wartości poniżej 2,5 V [lyg24]. W przypadku użycia ognisk jako zasilania robota AGV, nie należy doprowadzić do obniżenia napięcia wypadkowego poniżej 3 V.

Napięcie znamionowe akumulatora Li-Ion wynosi 3,7 V, jest to wystarczająca wartość by zasilić robota w granicach dolnego napięcia zasilania. W związku z tym nie jest konieczne by łączyć więcej ognisk w szereg, jednak należy zwrócić uwagę na wykres spadku napięcia (Rys. 28, Rys. 29).



Rysunek 28: Wykres spadku napięcia w czasie dla prądów obciążenia ogniw INR18650-25R w godzinach. [lyg24]



Rysunek 29: Wykres spadku napięcia w czasie dla prądów obciążenia ogniw INR18650-25R w minutach. [lyg24]

Dla prądu obciążenia wysokości 3 A, który można uznać za przybliżony prąd pracy w obciążeniu, dla 4 silników robota, czas rozładowania pojedynczego akumulatora od pełnego naładowania do 3 V wynosi około 47 minut. Jest to znacznie lepszy czas w porównaniu z bateriami alkalicznymi, zwłaszcza, że ognisko po ponownym naładowaniu zachowuje zbliżone zależności napięcia do czasu (na rysunku 28 i 29 wykres B:2.0A pokrywa się z pierwszym rozładowaniem A:2.0A).

Połączenie ogniw równolegle pozwala ograniczyć prąd obciążenia na pojedynczym akumulatorze, wydłużając jednocześnie pracę robota. W teorii użycie BMS 1S pozwoli kontrolować tego typu pakiet, jeśli wybrany BMS odłączy ogniska przy napięciu 3 V.

Problematycznym jest fakt pracy silników na granicznym napięciu zasilania. Silniki stracą znacząco swoją prędkość obrotową, pogłębiającowy problem wraz z dłuższą pracą robota. Wyniki czasów pracy zapisano w tabeli (Tab. 2), za wyjściowy prąd obciążenia uznano 3 A, a czasy sczytano z

wykresów spadków napięć (Rys. 28, Rys. 29), dla wartości pośrednich wyznaczono wartość średnią. Obliczono także czas pracy z pojemności typowej (Tab. 3).

Układ pakietu	Prąd obciążenia na pojedyncze ogniwo [A]	Przybliżony czas pracy od 4,2 V do 3 V dla charakterystyk spadków napięć	
		[min]	[h]
1P	3	47	0,73
2P	1,50	108	1,80
3P	1	144	2,40
4P	0,75	216	3,60

Tabela 2: Przybliżony czas pracy pakietu ogniw względem wykresów spadków napięć.

Układ pakietu	Prąd obciążenia na pojedyncze ogniwo [A]	Przybliżony czas pracy od 4,2 V do 3 V dla typowych pojemności	
		[min]	[h]
1P	3	50	0,83
2P	1,50	100	1,67
3P	1	150	2,50
4P	0,75	200	3,33

Tabela 3: Czas pracy pakietu ogniw obliczony z typowej pojemności.

W celu zwiększenia prędkości obrotowej silników, można użyć pakietów dwóch ogniw szeregowych. Napięcie wypadkowe będzie wynosić wtedy 7,4 V.

W przypadku większego napięcia zwiększy się pobór prądu i czas pracy w pewnym stopniu się zmniejszy, ciężko oszacować teoretycznie tą różnicę, ale można założyć że nie będzie ona znacząca. Zaletą takiego połączenia jest zdecydowanie większa stabilność działania robota. Nawet gdy ogniwa rozładowują się do momentu 2,5 V, który niektórzy producenci BMS podają jako graniczne napięcie odcięcia, napięcie wypadkowe wynosić będzie 5 V. Tak wysokie napięcie pozwala na pracę silników w odpowiedniej prędkości, oznacza to, że przez cały czas pracy robota silniki nie stracą znacząco swoją efektywność.

Podsumowując, ogniwa Li-Ion nadają się idealnie jako zasilanie robota AGV, zwłaszcza biorąc pod uwagę potencjalnie wysoki prąd zwarciowy silników, który z sporym zapasem owe ogniwa są w stanie dostarczyć. Przez kwestie finansowe ograniczono ilość możliwych do użycia ogniw do 4, w związku z tym najlepszym rozwiązaniem jest użycie pakietu 2S2P maksymalizując prędkość obrotową i czas pracy.

Ostatecznie użyto pakiet 2S, który także jest wystarczający do zasilania.

2.10.3. Dobór układu BMS

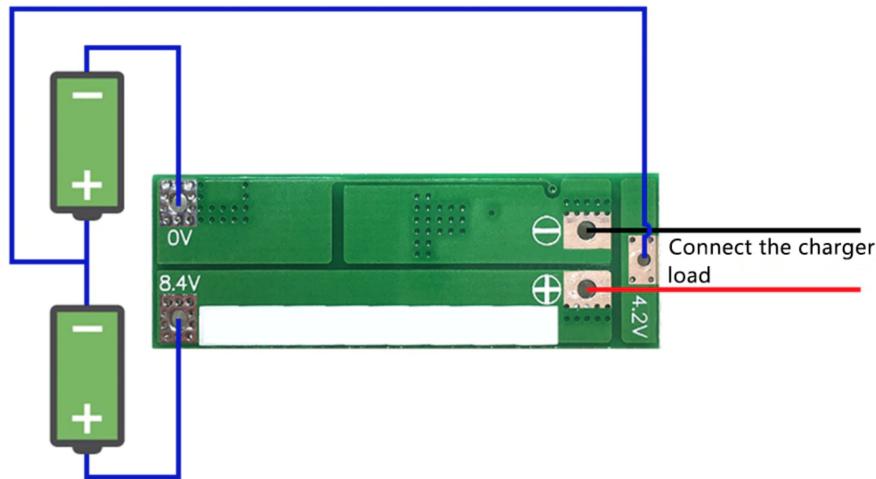
W celu zabezpieczenia układu należy użyć układ BMS, który będzie zabezpieczał przed nadmiernym rozładowaniem akumulatorów Li-Ion oraz nadmiernym naładowaniem. Dodatkowo BMS zabezpiecza przed zbyt dużym poborem prądu. W przypadku owego projektu, prąd rozruchowy silników może być bliski prądu zwarciowemu czterech silników, czyli 11,2 A. Zastosowano BMS o następujących specyfikacjach (Rys. 30).

Specyfikacja:

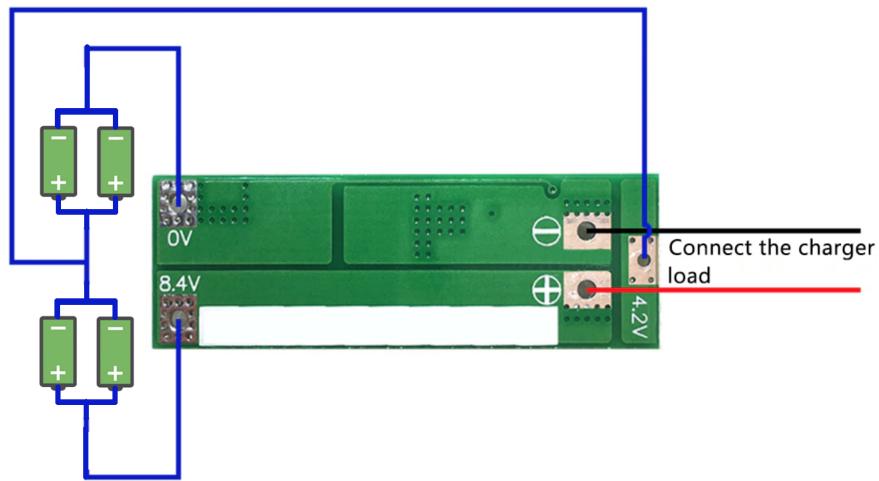
- BMS 2S
- obsługiwany typ ogniw: Li-Ion
- maksymalny prąd roboczy 20A
- maksymalny prąd chwilowy 25A
- napięcie ładowania: 8.4V - 9V
- maksymalny prąd ładowania: 10A
- napięcie przeładowania: 4.25V-4.35V \pm 0.05V
- napięcie max rozładowania: 2.5V-3.0V \pm 0.05V
- żywotność: ponad 50000 godzin
- prąd spoczynkowy: mniej niż 10uA
- wymiary: 41mm x 16mm x 4mm

Rysunek 30: Specyfikacja modułu BMS 2S 20A 8,4V [ele24].

By moduł BMS poprawnie kontrolował stan ogniw, należy go podłączyć w następujący sposób dla pakietu 2S (Rys. 31) oraz alternatywny pakietu 2S2P (Rys. 32). Wyjścia "0V", "4,2V" i "8,4V" z modułu BMS zostały przylutowane do koszyczków ogniw 18650, a wyjścia "+" i "-" wychodzą na zasilanie nakładek L293D Motor Driver Board.



Rysunek 31: Układ podłączenie ogniw z modułem BMS w pakiecie 2S [STO24].



Rysunek 32: Układ podłączenia ogniw z modułem BMS w pakiecie 2S2P.

2.11. Integracja czujników z silnikami oraz implementacja logiki sterowania

W celu osiągnięcia optymalnej integracji modułu czujników oraz modułu sterowania silnikami zastosowano strukturę opartą na magistrali I2C. W omawianym układzie wykorzystano architekturę typu Master-Slave. Moduł odczytu danych z czujników oraz moduł odpowiedzialny za sterowanie silnikami są realizowane przez dwa oddzielne mikrokontrolery Arduino UNO. Mikrokontroler odpowiedzialny za odczyt wartości z czujników pełni rolę Master, przetwarzając informacje uzyskane z czujników i na ich podstawie przesyłając sygnały sterujące do mikrokontrolera pełniącego rolę Slave.

Zastosowanie tej specyficznej architektury było niezbędne z uwagi na ograniczenia w dostępności pinów GPIO. Wykorzystanie czterokanałowego sterownika silników w formie nakładki na mikrokontroler Arduino spowodowało zmniejszenie liczby dostępnych pinów do pinów analogowych o adresach od A0 do A5. Jak wspomniano w sekcji 2.8, wykorzystanie kilku czujników wymaga dostosowania ich adresów. W związku z tym konieczne było uzyskanie dostępu do co najmniej siedmiu pinów ogólnego przeznaczenia I/O, co zapewnia drugie Arduino pełniące rolę Master.

2.11.1. Master

Kod źródłowy rozpoczyna się od deklaracji oraz inicjalizacji zmiennych oraz stałych globalnych. Są to między innymi adresy czujników, typ wyliczeniowy zawierający informacje o aktualnej trajektorii robota oraz adresy pinów do których zostaną podłączone piny XSHUT.

Następnie w funkcji `setup()` wykonywana jest inicjalizacja czujników. Proces inicjalizacji rozpoczyna się od ustawienia odpowiedniego adresu dla każdego czujnika. Proces ten został opisany wcześniej. Kolejnym etapem jest właściwa inicjalizacja czujnika. Wykonywana jest ona za pomocą funkcji `init()` wypożyczanej na każdej instancji obiektu czujnika. W przypadku błędnej inicjalizacji wyświetlany jest stosowny komunikat. Następnie dla każdego czujnika ustawiany jest czas maksymalnego oczekiwania na wartość (ang. timeout) za pomocą funkcji `setTimeout()`. Jest on ustawiony na wartość 500ms, zatem po tym czasie zostanie zwrócona wartość maksymalna dla typu `UINT16`. Ostatnim zadaniem jest przełączenia czujnika w tryb odczytu ciągłego za pomocą funkcji `setContinuous()`.

Następna funkcja typowa dla środowiska Arduino IDE to `setup()`. Funkcja ta zawiera wywołania czterech dodatkowych funkcji:

- `searchForDevices()` - odpowiada za wyszukiwanie dostępnych urządzeń na magistrali I2C,
- `readFromSensor()` - odpowiada za odczytanie wartości z czujników,
- `processSensorInfo()` - odpowiada za interpretację otrzymanych wyników,
- `sendSteering()` - odpowiada za przesłanie instrukcji sterowania do urządzenia Slave.

Funkcja `searchForDevices()`

Funkcja ta jest funkcją pomocniczą, niekonieczną do poprawnego działania programu. Jest ona jedna przydatna w celu weryfikacji poprawności połączenia urządzeń do magistrali I2C. W przypadku braku dostępnych urządzeń lub braku zgodności ich liczby należy zwrócić uwagę, czy wszystkie urządzenia są poprawnie podłączone do zasilania oraz do magistrali. Jeśli pierwsze w kolejności urządzenie podłączone do magistrali jest wadliwe lub zostało niepoprawnie podłączone, żadne kolejne urządzenie nie zostanie wykryte.

Realizacja wyszukiwania dostępnych urządzeń (adresów) jest relatywnie prosta. W pętli `for` poprzez wywołanie funkcji `Wire.beginTransmission(int addr)` rozpoczynana jest próbna transmisja do potencjalnego urządzenia. Jeśli urządzenie odpowie bez błędu, jego adres jest wyświetlany w konsoli w postaci liczby w formacie szesnastkowym.

```
1 // This function is used to search for discovering accessible devices on the I2C BUS
2 void searchForDevices() {
3     byte error, address;
4     int nDevices;
5     nDevices = 0;
6     for(address = 1; address < 127; address++ )
7     {
8         Wire.beginTransmission(address);
9         error = Wire.endTransmission();
10
11        if (error == 0)
12        {
13            Serial.print("I2C device found at address 0x");
14            if (address<16)
15                Serial.print("0");
16            Serial.print(address,HEX);
17            Serial.println(" !");
18
19            nDevices++;
20        }
21        else if (error==4)
22        {
23            Serial.print("Unknown error at address 0x");
24            if (address<16)
25                Serial.print("0");
26            Serial.println(address,HEX);
27        }
28    }
29    if (nDevices == 0)
30        Serial.println("No I2C devices found");
31    else
32        Serial.println("done");
33 }
```

Rysunek 33: Kod źródłowy realizujący wyszukiwanie urządzeń dostępnych na magistrali I2C

Funkcja `readFromSensor()`

Implementacja funkcji czytania wartości z sensora jest bardzo prostolinienna. Za pomocą metody `readRangeContinuousMillimeters()` wywołanej na odpowiednim obiekcie klasy VL53L0X odczytywana jest wartość odległości wyrażona w milimetrach. Jednocześnie odczytana wartość jest przypisywana do odpowiedniej komórki w tablicy pomiarów.

We fragmencie kodu źródłowego można zauważyc wykomentowany fragment wyświetlający wartość odległości. Został on wykorzystany w celu walidacji danych odczytywanych z czujników.



```
1 // This function is used to read data from sensors
2 void readFromSensor() {
3     // Serial.print("Odczyt z pierwszego czujnika: ");
4     // Serial.println(Sensor1.readRangeContinuousMillimeters());
5     dist_array[0] = Sensor1.readRangeContinuousMillimeters();
6
7     // Serial.print("Odczyt z drugiego czujnika: ");
8     // Serial.println(Sensor2.readRangeContinuousMillimeters());
9     dist_array[1] = Sensor2.readRangeContinuousMillimeters();
```

Rysunek 34: Kod źródłowy realizujący odczytywanie odległości z czujnika

Funkcja processSensorInfo()

Powyższa funkcja ma wagę fundamentalną pod kątem poprawności działania robota. Jednocześnie funkcja ta jest najbardziej złożona, przez co zostanie dodany cały kod źródłowy.

Funkcja rozpoczyna się odinicjalizacji zmiennej `currentTime()`, jej sens wyjaśni się w miarę zgłębiania logiki wyznaczającej sterowania.

Pierwsza instrukcja warunkowa sprawdza czy robot znajduje się we wnęce. Stan domyślny jest ustawiony na `false`. Następnie, zgodnie z dodanymi komentarzami, jeśli przed robotem oraz z prawej strony strony odległość jest większa niż stała `SAFE_DIST`, wtedy robot dojedzie do ściany. Funkcja zwraca wartość na podstawie typu wyliczeniowego nadmienionego wcześniej. Dodatkowo w celach pomocniczych wyświetlany jest komunikat o aktualnej trajektorii.

Następne instrukcje warunkowe realizują sterowanie zgodnie z komentarzami. Warto zwrócić uwagę na instrukcję warunkową rozpoczynającą się w linii 15. Jeśli robot wykryje ścianę przed sobą, robot rozpoczyna ruch w lewo oraz przełącza flagę `wnęka` na wartość `true`.

Jeśli została wykryta wnęka wykonuje się alternatywna sekwencja instrukcji warunkowych. Jeśli przed robotem ciągle znajduje się przeszkoda, jego ruch pozostaje niezmienny w lewo. W przypadku, gdy czujniki wykryją wolną przestrzeń, włączany jest tryb wyjeżdżania z wnęki.

Opuszczanie wnęki zostało zrealizowane za pomocą licznika, stąd deklaracja zmiennej `currentTime` na początku funkcji. W linii nr 55 sprawdzany jest warunek, czy czas przeznaczony na wyjazd z wnęki minął. Jeśli tak, pojazd przełącza się w tryb normalny, jeśli nie, pojazd kontynuuje jazdę prosto.

Wyjaśnienie wykorzystania takiej struktury zostanie opisane w sekcji 3.3.

```

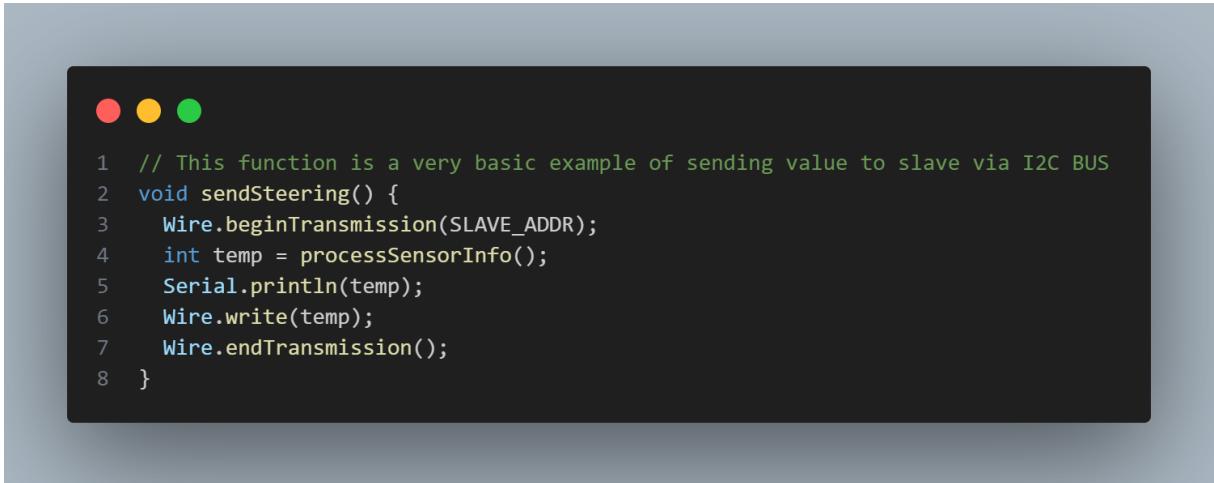
1 // This function will be used to process and prepare data to be sent to slave
2 int processSensorInfo() {
3     unsigned long currentTime = millis();
4
5     // Normal mode
6     if (!wneka) {
7         // If the robot is in an open space, it moves to the right
8         if ((dist_array[4] > SAFE_DIST && dist_array[4] > SAFE_DIST) &&
9             (dist_array[2] > SAFE_DIST && dist_array[1] > SAFE_DIST)) {
10            Serial.println("ENGINES TO RIGHT");
11            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_RIGHT;
12            return CURRENT_DIR::MOVE_RIGHT;
13        }
14        // If the robot encounters an obstacle in front, it enters recess mode
15        if ((dist_array[4] <= SAFE_DIST) || (dist_array[3] <= SAFE_DIST)) {
16            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_LEFT;
17            Serial.println("ENGINES TO LEFT");
18            wneka = true;
19            return CURRENT_DIR::MOVE_LEFT;
20        }
21        // If there are no obstacles in front of the robot, it moves forward
22        if (dist_array[4] > SAFE_DIST && dist_array[3] > SAFE_DIST) {
23            Serial.println("ENGINES FORWARD");
24            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_FORWARD;
25            return CURRENT_DIR::MOVE_FORWARD;
26        }
27        // If the distance from the wall is greater than the safe distance, it moves to the right
28        if ((current_direction != CURRENT_DIR::MOVE_LEFT) && dist_array[2] > SAFE_DIST && dist_array[1] > SAFE_DIST) {
29            Serial.println("ENGINES TO RIGHT");
30            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_RIGHT;
31            return CURRENT_DIR::MOVE_RIGHT;
32        }
33    }
34
35    // Alcove mode
36    if (wneka) {
37        // If there is an obstacle in front of the robot, it continues to move to the left
38        if ((dist_array[4] <= SAFE_DIST) || (dist_array[3] <= SAFE_DIST)) {
39            Serial.println("ENGINES TO LEFT - WNEKA");
40            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_LEFT;
41            return CURRENT_DIR::MOVE_LEFT;
42        }
43        // The condition of leaving the recess - if the robot has a safe distance in front and on the side
44        if(!exitingAlcove && dist_array[4] > SAFE_DIST && dist_array[3] > SAFE_DIST) {
45            Serial.println("EXITING ALCOVE, SWITCHING TO FORWARD MODE");
46            exitingAlcove = true;
47            alcoveExitTime = currentTime;
48            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_FORWARD;
49            return CURRENT_DIR::MOVE_FORWARD;
50        }
51    }
52
53    //After leaving the alcove, drive straight for a certain amount of time
54    if (exitingAlcove) {
55        if (currentTime - alcoveExitTime < FORWARD_TIME_AFTER_ALCOVE) {
56            Serial.println("ENGINES FORWARD AFTER ALCOVE");
57            current_direction = CURRENT_DIR::MOVE_FORWARD;
58            return CURRENT_DIR::MOVE_FORWARD;
59        } else {
60            Serial.println("RESUMING NORMAL MODE");
61            wneka = false;
62            exitingAlcove = false;
63        }
64    }
65 }

```

Rysunek 35: Kod źródłowy realizujący wyznaczenie odpowiedniego sterowania

Funkcja sendSteering()

Funkcja ta realizuje wysyłanie wartości odczytanej z funkcji przetwarzającej dane z sensorów. Pierwszym krokiem jest rozpoczęcie transmisji z urządzeniem o adresie 0x09 - taki adres jest typowo przydzielany dla drugiego mikrokontrolera Arduino. Następnie za pomocą funkcji `Wire.write()` odbywa się właściwy przesył danych poprzez magistralę I2C.

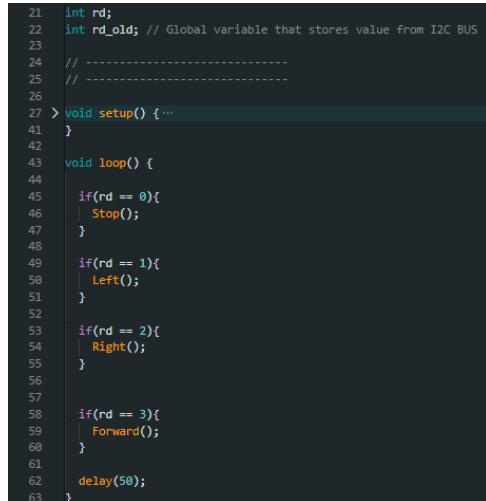


```
1 // This function is a very basic example of sending value to slave via I2C BUS
2 void sendSteering() {
3     Wire.beginTransmission(SLAVE_ADDR);
4     int temp = processSensorInfo();
5     Serial.println(temp);
6     Wire.write(temp);
7     Wire.endTransmission();
8 }
```

Rysunek 36: Kod źródłowy realizujący wysłanie instrukcji sterowania

2.11.2. Slave

Mikrokontroler Arduino UNO R3 skonfigurowany do pracy typu Slave odbiera paczkę danych przez zmienną "rd" wysyłane przez Master.



```
21 int rd;
22 int rd_old; // Global variable that stores value from I2C BUS
23
24 // -----
25 // -----
26
27 > void setup() { ...
41 }
42
43 void loop() {
44
45     if(rd == 0){
46         Stop();
47     }
48
49     if(rd == 1){
50         Left();
51     }
52
53     if(rd == 2){
54         Right();
55     }
56
57     if(rd == 3){
58         Forward();
59     }
60
61     delay(50);
62 }
```

Rysunek 37: Fragment kodu źródłowego przedstawiający odbiór komunikatów przesyłanych przez mikrokontroler Master.

Zgodnie z odbieranym komunikatami o zmianie kierunku indeksowanymi od 0 do 3, program wywołuje odpowiednie funkcje.

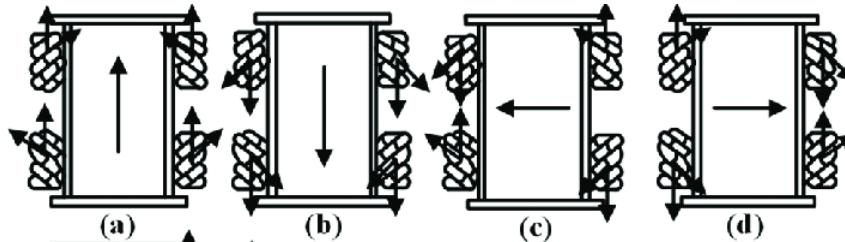
```

88 void Right(){
89     |   motor1.run(BACKWARD); //LT
90     |   motor2.run(FORWARD); //PT
91     |   motor3.run(BACKWARD); //PP
92     |   motor4.run(FORWARD); //LP
93 }
94
95 void Left(){
96     |   motor1.run(FORWARD); //LT
97     |   motor2.run(BACKWARD); //PT
98     |   motor3.run(FORWARD); //PP
99     |   motor4.run(BACKWARD); //LP
100 }
101
102 void Forward(){
103     |   motor1.run(BACKWARD);
104     |   motor2.run(BACKWARD);
105     |   motor3.run(BACKWARD);
106     |   motor4.run(BACKWARD);
107 }
108
109 void Stop(){
110     |   motor1.run(RELEASE);
111     |   motor2.run(RELEASE);
112     |   motor3.run(RELEASE);
113     |   motor4.run(RELEASE);
114 }
115
116 // TODO:
117 // This function is responsible for calculating the steering
118
119
120

```

Rysunek 38: Fragment kodu źródłowego przedstawiający implementację ruchu pojazdu w odpowiednich kierunkach.

Funkcje określające kierunek jazdy zostały skonstruowane wedle logiki i geometrii działania kół szwedzkich.



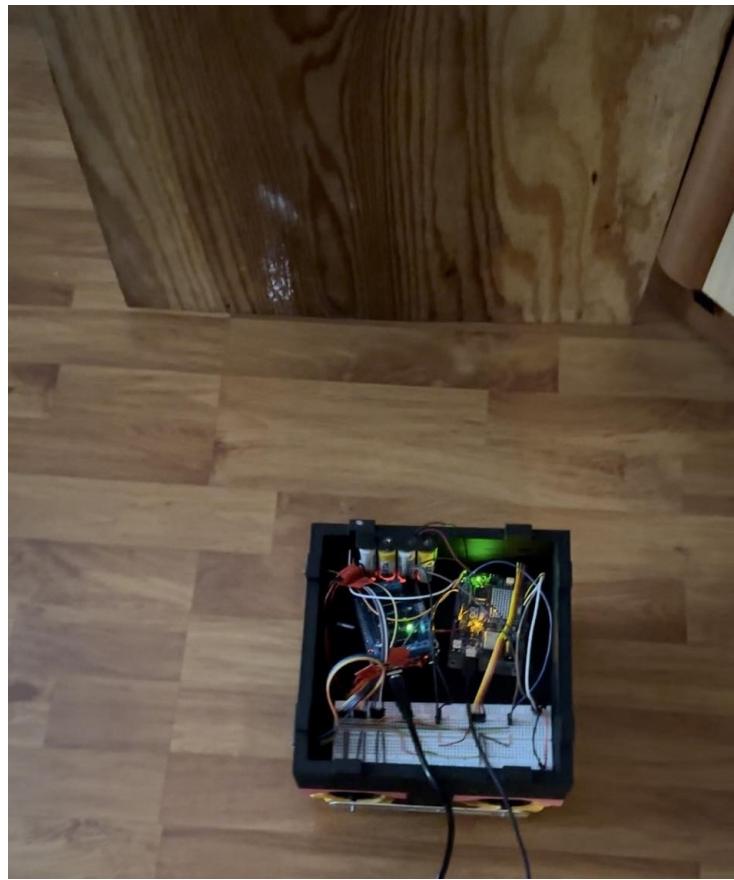
Rysunek 39: Wizualizacja zależności kierunku jazdy od obrotu kół szwedzkich.

2.12. Testy poprawności działania algorytmu sterującego

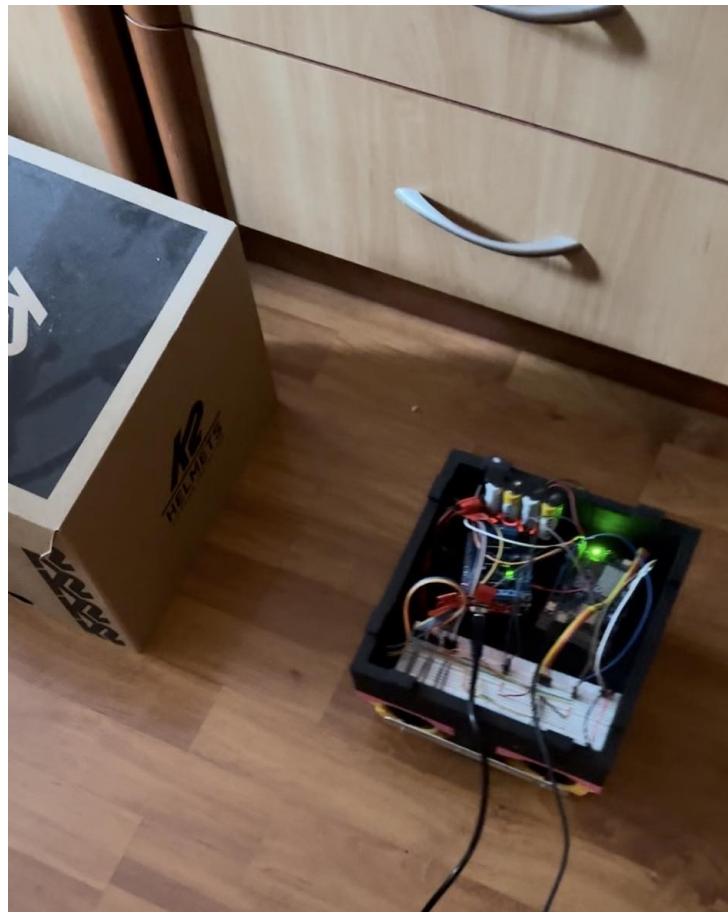
Testy algorytmu sterującego w początkowej fazie były przeprowadzane poprzez analizę danych wyświetlanego w konsoli środowiska Arduino IDE. Wartości zwieracane przez funkcje były weryfikowane w zależności od tego, które czujniki były zakryte.

Kolejnym etapem było wdrożenie algorytmu na rzeczywisty obiekt oraz ocena jego działania w środowisku rzeczywistym. Na podstawie dalszej analizy działania algorytmu, czas opóźnienia przełączenia w tryb normalny był dostosowywany w zależności od prędkości obrotowej silników.

Należy podkreślić, że algorytm sterujący w pełni spełnia założone wymagania. Jednakże, z powodu niedoskonałości konstrukcyjnych oraz ograniczeń elementów elektronicznych, robot nie realizuje założonych scenariuszy w sposób idealny.



Rysunek 40: Symulacja ściany, do której robot dojeżdża



Rysunek 41: Koniec symulowanej wnęki - robot rozpoczyna wyjazd z wnęki

3. Napotkane problemy

3.1. Podłączenie laserowych czujników odległości

Problematyczne okazało się użytkowanie więcej niż jednego czujnika laserowego przy wykorzystaniu magistrali I2C. Było to spowodowane domyślnym adresem, który był taki sam dla wszystkich czujników.

Naturalnym krokiem jest wykorzystanie funkcji `setAddress()`, ustawiającej inny niż domyślny adres dla czujnika. Niestety wykorzystanie tylko tej funkcji nie przyniosło oczekiwanych rezultatów, w wyniku czego należało szukać rozwiązań dalej.

Na podstawie dokumentacji oraz informacji znalezionych na forach internetowych, okazało się, że aby z sukcesem zmienić adres czujnika należy wykorzystać dodatkowy pin o nazwie XSHUT. Dzięki niemu czujnik zapamiętywał zmianę adresu i możliwe było wykorzystanie zamierzonej liczby sensorów.

Dokładny sposób podłączenia czujników oraz wykorzystania pinu XSHUT został opisany w sekcji nr 2.8.

3.2. Montaż silników oraz kół

Pierwszym problemem było zamontowanie samych silników, okazało się że otwory na mocowanie silników znajdowały się w innych miejscach niż było to potrzebne. W związku z tym, konieczne było wprowadzenie listwy aluminiowej, która pozwoliła na stabilne przymocowanie silników do dolnej części pojazdu.

Kolejnym wyzwaniem było mocowanie kół do silników. Początkowo użyto długich śrub, jednak okazało się, że koła są zbyt niestabilne. Aby wyeliminować luzy, wprowadzono boczne listwy aluminiowe, przez które przechodzą długie gwintowane szprychy. To rozwiązanie znaczenie poprawiło stabilność kół i zminimalizowało luzy, zapewniając lepsze diałanie całego układu.

Dzięki tym działaniom udało się rozwiązać napotkane problemy i zakończyć montaż kół i silników w sposób zapewniający solidność i niezawodność konstrukcji.

3.3. Implementacja logiki sterowania

Realizacja logiki realizującej śledzenie ściany bez elementu opuszczania wnęki była realtywnie prosta. Jednak dodanie sekwencji wyjeżdżania z wnęki okazało się wyzwaniem.

Było tak ze względu na kolejność instrukcji warunkowych. Pierwotnie jeśli robot dojeżdzał do ściany jednocześnie mając z prawej swojej strony przeszkodę, poprawnie rozpoczynał ruch w lewo. Jednak po otrzymaniu informacji z sensora o pustej przestrzeni przed, robot od razu rozpoczynał ruch w prawo, ze względu na oddalenie się od prawej strony ściany. W wyniku czego pojazd jeździł tam i z powrotem w kółko.

Rozwiązaniem okazało się zastosowanie dodatkowego warunku sprawdzającego stan flagi `wnekę` oraz wykorzystanie wymuszonego ruchu do przodu - opisany wcześniej licznik. Dzięki wykorzystaniu wymienionych ulepszeń, robot zarejestrowaniu pustej przestrzeni przed sobą, przez określony czas poruszał się przed siebie, w wyniku czego przynajmniej jeden z czujników z jego prawej strony otrzymywał owartość uniemożliwiającą ruch w prawo.

4. Podsumowanie

Cel projektu został zrealizowany z sukcesem. Robot został skonstruowany zgodnie z założeniami wstępnyymi i realizuje cele określone na początku projektu. Niemniej jednak, działanie robota nie jest idealne z powodu problemów uniemożliwiających jazdę w liniach prostych.

Problem ten mógłby zostać zminimalizowany poprzez zastosowanie enkoderów w silnikach. Enkodery umożliwiłyby precyzyjne określenie prędkości obrotowej i jej śledzenie w czasie rzeczywistym, co pozwoliłoby na bardziej precyzyjną regulację. Rozwiązanie to nie zostało wdrożone z powodu ograniczonego czasu oraz wątpliwości dotyczących możliwości podłączenia dodatkowych czujników do obecnego układu mikrokontrolerów.

Dodatkowo, poprawa jakości silników i zastosowanie bardziej zaawansowanych sterowników, na przykład dwóch wysokiej klasy sterowników dwukanałowych, mógłby znacząco zmniejszyć różnice w prędkościach obrotowych silników.

Projekt ten pozwolił zespołowi na dogłębne zapoznanie się z procesem tworzenia prostego robota mobilnego. Zdobyte doświadczenia w zakresie doboru ogniw zasilających, implementacji algorytmu sterowania oraz integracji czujników będą cennym zasobem w przyszłych projektach.

W trakcie realizacji projektu napotkano wiele nieprzewidzianych problemów, co z kolei przyczyniło się do rozwoju umiejętności rozwiązywania problemów, niezwykle cenionych na aktualnym rynku pracy.

Bibliografia

- [BOT24a] BOTLAND. *L293D Motor Driver Board - sterownik silników 16V/0,6A - nakładka dla Arduino - Iduino ST1138*. 2024. URL: <https://botland.com.pl/arduino-shield-kontrolery-silnikow-i-serw/8224-l293d-motor-driver-board-sterownik-silnikow-16v06a-nakladka-dla-arduino-duino-st1138-5903351241267.html>.
- [BOT24b] BOTLAND. *Ogniwo 18650 Li-ion Samsung INR18650-25R 2500mAh 20A*. 2024. URL: <https://botland.com.pl/akumulatory-li-ion/23832-ogniwo-18650-li-ion-samsung-inr18650-25r-2500mah-20a.html>.
- [BOT24c] BOTLAND. *Question: 2) Use the datasheet e for a Duracell AA battery to estimate the total energy (in joules) available from the battery if it is operated until its output*. 2024. URL: <https://www chegg com/homework-help/questions-and-answers/2-use-datasheet-e-duracell-aa-battery-estimate-total-energy-joules-available-battery-oper-q91841138>.
- [BOT24d] BOTLAND. *Silnik kątowy z przekładnią SJ02 120:1 6V 160RPM + enkoder*. 2024. URL: <https://botland.com.pl/silniki-dc-z-przekladnia-i-enkoderami/6288-silnik-katowy-z-przekladnia-sj02-1201-6v-160rpm-enkoder-6959420910199.html>.
- [ele24] elektroweb. *Moduł BMS 2S 20A 8,4V ładowarka Li-Ion z balansere*. 2024. URL: https://allegro.pl/oferta/modul-bms-2s-20a-8-4v-ladowarka-li-ion-z-balansere-12679801390?bi_s=ads&bi_m=listing%3Adesktop%3Aquery&bi_c=0TNmNDg3NTItOWRhNS00ZDY2LTg5NGMt0bi_t=ape&referrer=proxy&emission_unit_id=ca43e740-256d-4c4b-b7a9-c21c0136415b&fbclid=IwZXh0bgNhZWOCMTAAAR09SlzbWDEsLIXakBfh16CUiEjKYxkaIUoVbaIUTpI95RiMR7OhRmCfao_aem_AaodTfu5K3XsM8N0naqenDAfCsGCY0fEYhhE1vZcP15MLo2-KQsEachHMsWM5YihMt_2o7eh2hVWE97ilx4SyQI
- [lyg24] lygte-info. *Test of Samsung INR18650-25R 2500mAh (Green)*. 2024. URL: [https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20INR18650-25R%202500mAh%20\(Green\)%20UK.html](https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20INR18650-25R%202500mAh%20(Green)%20UK.html).
- [Nic24] Jacob Hylén Nicholas Zambetti Karl Söderby. *Inter-Integrated Circuit (I2C) Protocol*. 2024. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire/>.
- [ole16] oleglyan. *VL53L0X – maximum sensors on I2C arduino bus*. 2016. URL: <https://forum.pololu.com/t/vl53l0x-maximum-sensors-on-i2c-arduino-bus/10845>.
- [STM24] STMicroelectronics. *Datasheet - VL53L0X - Time-of-Flight ranging sensor*. 2024. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>.
- [STO24] MALIKA ALI STORE. *BMS 2S 20A Lithium Battery 18650 Charger BMS Protection Board Balance*. 2024. URL: <https://www.lazada.co.id/products/bms-2s-20a-lithium-battery-18650-charger-bms-protection-board-balance-i6008332656.html>.