

KoNaR

Koło Naukowe Robotyków

Raport z budowy robota mobilnego klasy micromouse

„Let Me Out”

Bartłomiej Kurosz

Koło Naukowe Robotyków KoNaR

WWW.KONAR.PWR.EDU.PL

15 Marca 2015

Spis treści

1 Wstęp **2**

2 Założenia projektowe **3**

3 Konstrukcja Mechaniczna **4**
3.1 Napęd 4
3.1.1 Charakterystyka i właściwości użytych silników krokowych 4
3.1.2 Koła 7
3.1.3 Mocowania silników 8
3.2 Płytka PCB 9
3.2.1 Warstwa top 10
3.2.2 Warstwa bottom 11

4 Elektronika **12**
4.1 Zasilanie 12
4.1.1 Zasilanie silników 13
4.1.2 Zasilanie logiki 13
4.1.3 Konwerter stanów logicznych 13
4.2 Procesor 14
4.3 Czujniki odległości 16
4.4 Sterowniki silników 18
4.5 Interfejs komunikacyjny 20

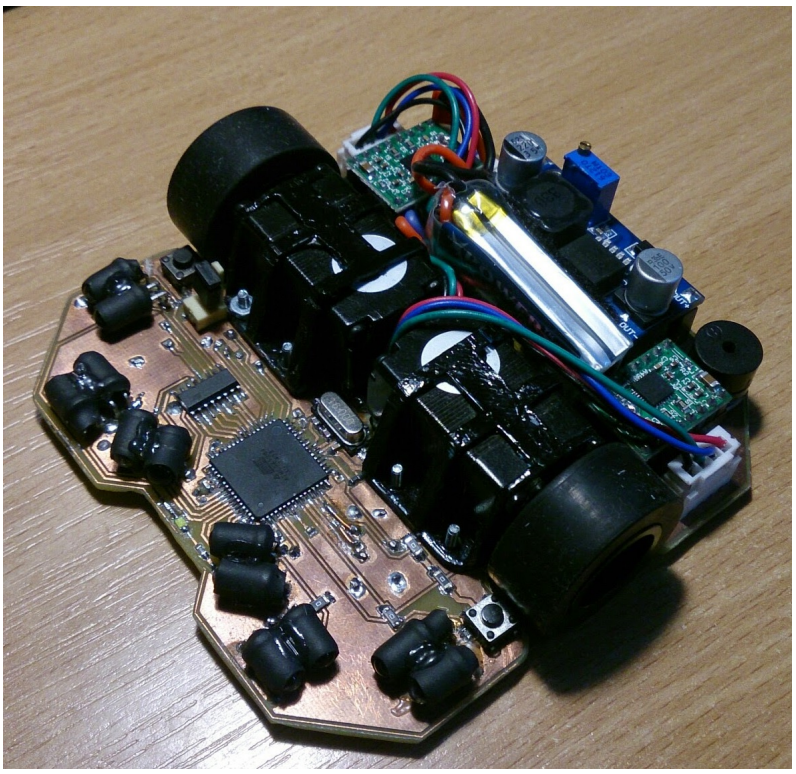
5 Oprogramowanie **20**
5.1 Pomiary odległości 20
5.2 Sterowanie prędkością robota 20
5.3 Algorytm 21

6 Podsumowanie **22**
6.1 Sprawność silników krokowych w robocie mobilnym 22
6.2 Sterowanie robotem klasy (2.0) w otwartej pętli regulacji . . . 22
6.3 Zdjęcia robota 22

7 Materiały źródłowe **25**

Streszczenie

Dokument traktuje o projektowaniu, budowie, analizie problemów konstrukcyjnych, popełnionych błędach oraz wstępnych testach robota mobilnego klasy micromouse wyposażonego w napęd oparty na silnikach krokowych.



Rysunek 1: Gotowy robot z wszystkimi podzespołami.

1 Wstęp

Realizacja projektu miała dwa główne cele. Pierwszym z nich było zaprojektowanie i zbudowanie robota mobilnego klasy micromouse, który spełniałby wymagania ogólnie przyjęte na zawodach robotycznych w Polsce, pozwalając mu tym samym na wzięcie w nich udziału.
Drugim celem było poznanie zagadnienia sterowania silnikami krokowymi, zbadanie ich w robocie mobilnym oraz próba wysterowania robota działającego w otwartej pętli sterowania.

2 Założenia projektowe

- Spełnienie podstawowych warunków konstrukcyjnych oraz programowych zawartych w regulaminie[2] konkurencji micromouse.
- Oparcie projektu o procesor z rodziny AVR.
- Konstrukcja umożliwiająca poruszanie się po skosie labiryntu.
- Zastosowanie silników krokowych jako napędu głównego robota.
- Umożliwienie bezprzewodowej komunikacji z robotem.
- Zaprojektowanie płytki PCB w sposób umożliwiający wykonanie jej metodą fototransferu.
- Implementacja algorytmu pozwalającego na rozwiązywanie algorytmu metodą "floodfill".

3 Konstrukcja Mechaniczna

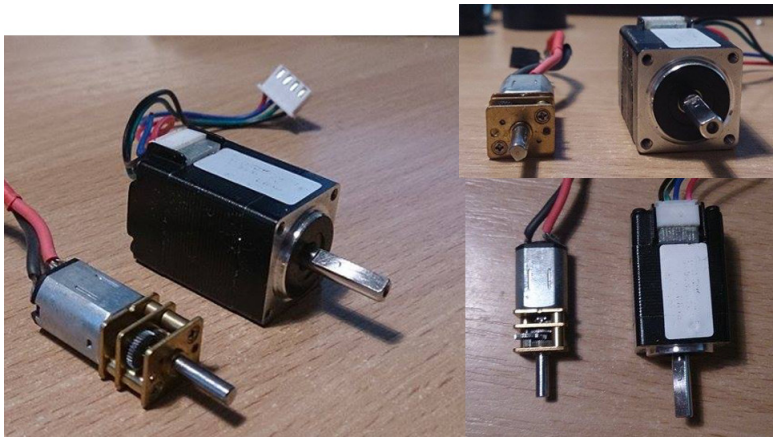
3.1 Napęd

Jako napęd zdecydowano się na użycie silników krokowych. Powodami zastosowania tego typu silników były chęć zapoznania się z ich strukturą, sterowaniem i możliwościami, oraz próba wysterowania robota z napędem pracującym w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, czyli bez użycia dodatkowych enkoderów obrotowych.
W projekcie użyte zostały bipolarne silniki firmy Pololu o kodzie produktu S20STH30-0604A.

3.1.1 Charakterystyka i właściwości użytych silników krokowych

Silniki krokowe znacząco różnią się w budowie, sterowaniu i osiągach od standardowo używanych w napędach robotów mobilnych silników DC. Poniżej opisano wady i zalety z nich wynikające.

Budowa i wymiary Użyte silniki są najmniejszymi łatwo dostępnymi silnikami krokowymi. Ich wymiary to 20x20x30 mm (rozmiar NEMA8), a waga silnika to 60 g. W porównaniu do popularnych mikrosilników Pololu o wymiarach 10x12x24 mm i wadze 10 g wypadają one zdecydowanie gorzej, drastycznie zwiększając wagę i rozmiar robota.

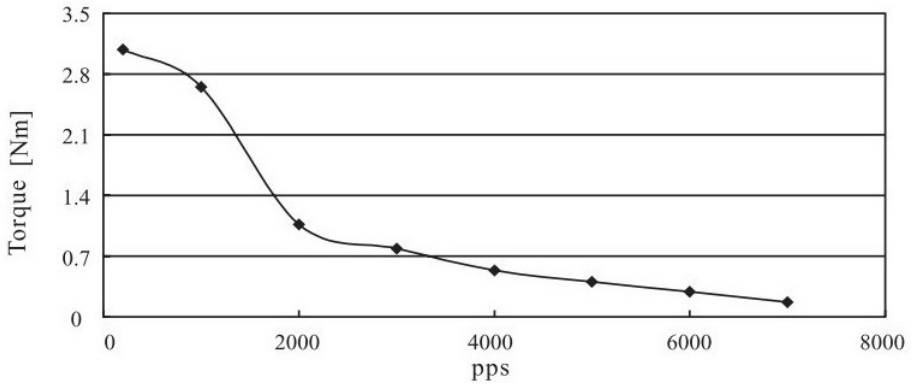


Rysunek 2: Silnik krokowy o rozmiarze Nema 8 obok mikrosilnika firmy Pololu

W silniku nie zastosowano żadnej przekładni, co związane jest ze stosunkowo niskim momentem obrotowym (140 g-cm) na osi silnika.

Sterowanie Silnik krokowy sterowany jest impulsowo. Prędkość obrotowa związana jest więc z częstotliwością podawanych impulsów. Zastosowany silnik potrzebuje 200 impulsów, aby wykonać pełny obrót.

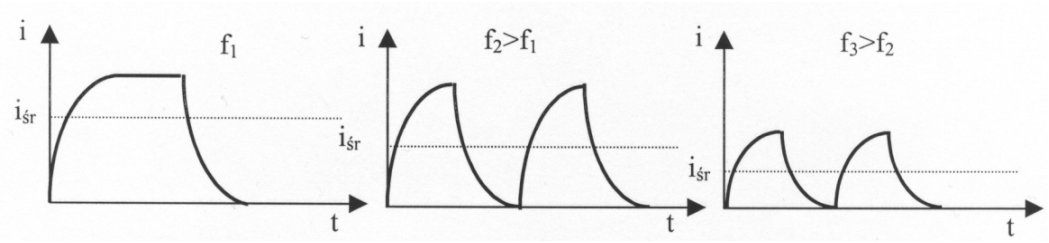
Podstawowym problemem związanym z zastosowaniem silników krokowych w napędach jest moment obrotowy malejący wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Silnik krokowy jest w stanie dostarczyć pełny moment przy kilku, maksymalnie kilkunastu obrotach na sekundę.



Rysunek 3: Zależność momentu obrotowego od prędkości impulsowania silnika krokowego. (PPS - Pulse Per Second)

Zjawisko to związane jest to z faktem, że przy każdym impulsie zasilana zostaje kolejna cewka. Pole magnetyczne, powodujące moment obrotowy, generowane jest przez prąd płynący przez cewkę.

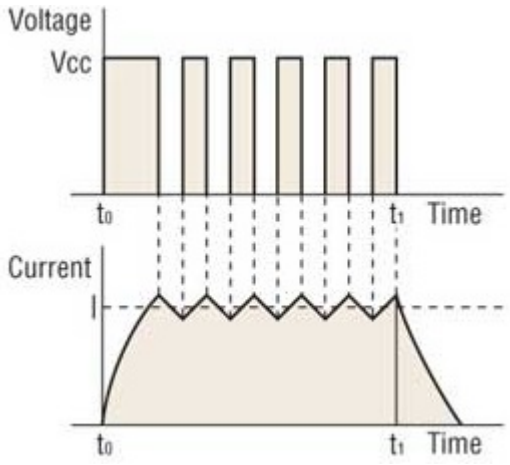
Prąd na cewce opóźniony jest w fazie względem napięcia, a zbocze narastające nie jest nieskończenie krótkie. Prąd, a tym samym moment, narastają więc z opóźnieniem czasowym względem impulsu sterującego. Wynika z tego fakt, że przy wysokiej częstotliwości impulsowania silnika, napięcie zmienia sie tak szybko, ze prąd nie jest w stanie za nim "nadążyć".



Rysunek 4: Wpływ wzrostu częstotliwości pracy silnika na kształt impulsu prądowego i wartość średniego prądu w uzwojeniach silnika.

Prąd na cewkach nie zdąża narastać do wartości maksymalnej, w konsekwencji nie generując pełnego pola magnetycznego a więc i momentu, powodując tym samym nieprawidłową pracę silnika (gubienie kroków bądź całkowite zatrzymanie się silnika).

Aby wymusić szybsze narastanie prądu na cewkach, należy zastosować wyższe napięcie zasilające silnik. W tym celu zastosowano w robocie przetwornicę napięcia step-up. Dzięki wyższemu napięciu prąd szybciej osiąga wartość potrzebną do uzyskania pełnego momentu. Konsekwencją takiego rozwiązania jest konieczność ograniczania prądu płynącego przez cewkę na ustalonej wartości, podanej w dokumentacji silnika. W tym celu zastosowano sterowniki silników krokowych oparte na module A4988. Zasada działania takiego ogranicznika polega na odłączaniu napięcia po przekroczeniu ustalonej wartości prądu i podłączeniu go z powrotem, po obniżeniu się wartości prądu poniżej ustalonego przez histerezę ogranicznika progu.



Rysunek 5: Wykres przedstawiający zasadę działania ogranicznika prądowego w sterowniku silnika krokowego.

Parametry elektryczne zastosowanego silnika to:

- Napięcie znamionowe: 3.9 V
- Prąd znamionowy: 600 mA
- Rezystancja cewki: 6.5 Ω
- Indukcyjność cewki: 1.7 mH

Do zasilania silnika w robocie użyto napięcia 24 V. Umożliwia to osiągnięcie wystarczających prędkości obrotowych. Jak dotąd przeprowadzono testy dla maksymalnej prędkości obrotowej wynoszącej 25 obrotów na sekundę.
Zastosowanie sterowników silników krokowych poza ograniczaniem prądu daje możliwość sterowania mikrokrokami, czyli dzielenia jednego kroku na wiele mniejszych. Umożliwia to dokładniejsze oraz łagodniejsze sterowanie robotem.
W robocie na obecną chwilę zastosowano sterowanie ćwierćkrokami, co wymusza podanie 800 impulsów z jednostki sterującej, aby wykonać jeden obrót wału silnika.

3.1.2 Koła

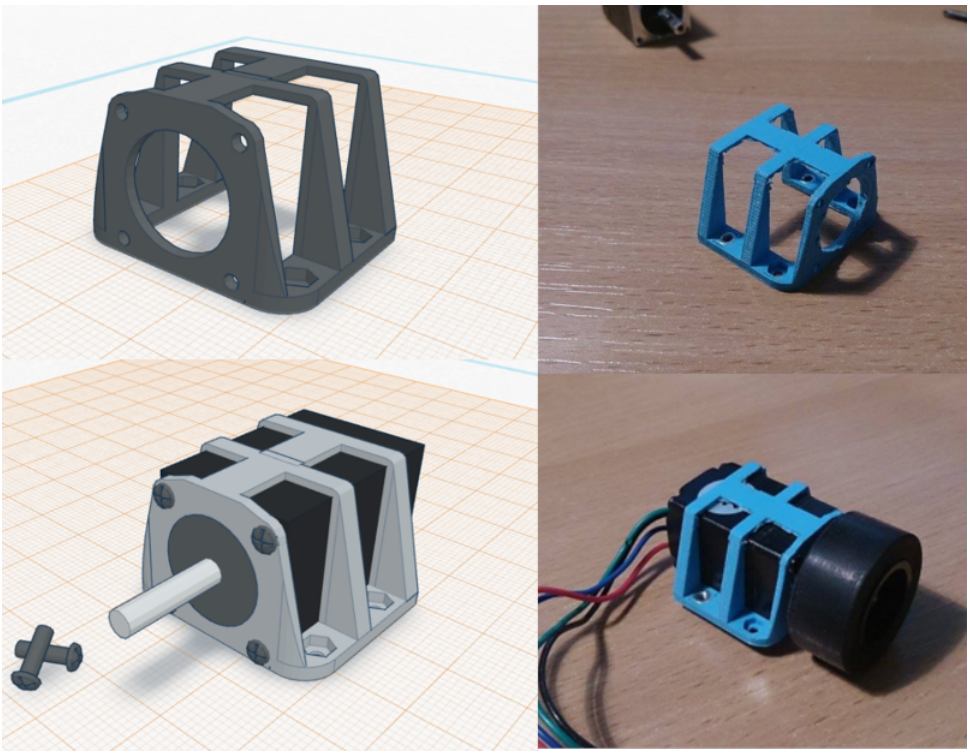
Jako koła wybrano gumowe koła firmy Solarbotics o średnicy 2.8mm i szerokości 13mm. Koła mają świetną przyczepność i doskonale nadają się do tego zastosowania. Jedyną jak dotąd zaobserwowaną wadą jest bardzo duża zdolność do zbierania kurzu i drobnych odpadów, przez co jazda po zabrudzonej powierzchni szybko doprowadza do zmniejszenia przyczepności kół.



Rysunek 6: Koła firmy Solarbotics użyte w robocie.

3.1.3 Mocowania silników

Mocowania silników zostały zaprojektowane w programie TinkerCad dostępnym w wersji przeglądarkowej. Zamówienie przyjęło i wykonało techniką druku 3D koło naukowe działające przy Politechnice Wrocławskiej, „Rapid Troopers".



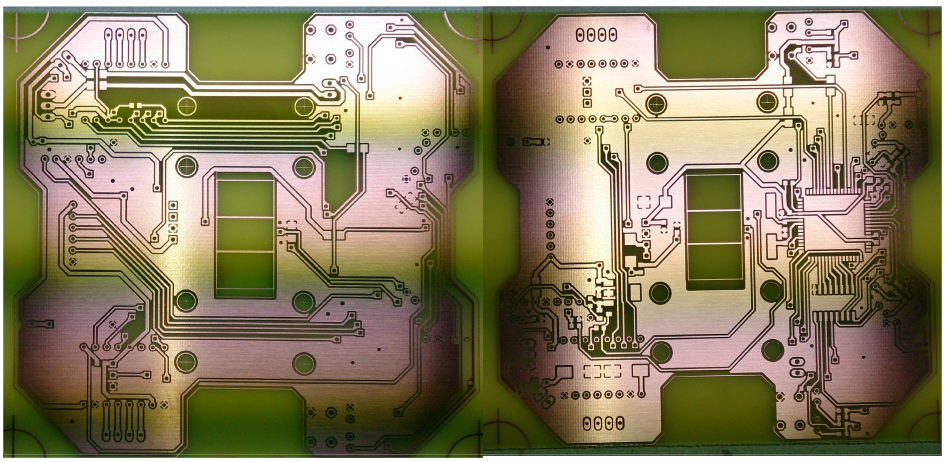
Rysunek 7: Mocowanie silnika krokowego użyte w robocie.

Mocowania zawierają 4 otwory na śruby mocujące silnik do elementu, oraz 4 otwory na śruby służące do przytwierdzenia silnika wraz z mocowaniem do platformy.

Otrzymane mocowania spełniają wymagania konstrukcyjne przed nimi postawione. Z uwagi na swoją strukturę, użyty materiał i technikę wytworzenia posiadają jedną wadę. Tworzywo sztuczne użyte do ich wydrukowania bardzo łatwo poddaje się naciskowi, przez co przez nieuwagę można połamać niektóre elementy mocowania.

3.2 Płytka PCB

Płytka PCB na której zostały umieszczone wszystkie elementy robota została zaprojektowana za pomocą programu CadSoft Eagle.
Długość: 101 mm
Szerokość: 94 mm
Plytka pełni jednocześnie funkcję podwozia robota. Takie wymiary pozwalają na swobodny obrót w miejscu robota między ścianami, oraz jazdę po skosie w labiryncie.



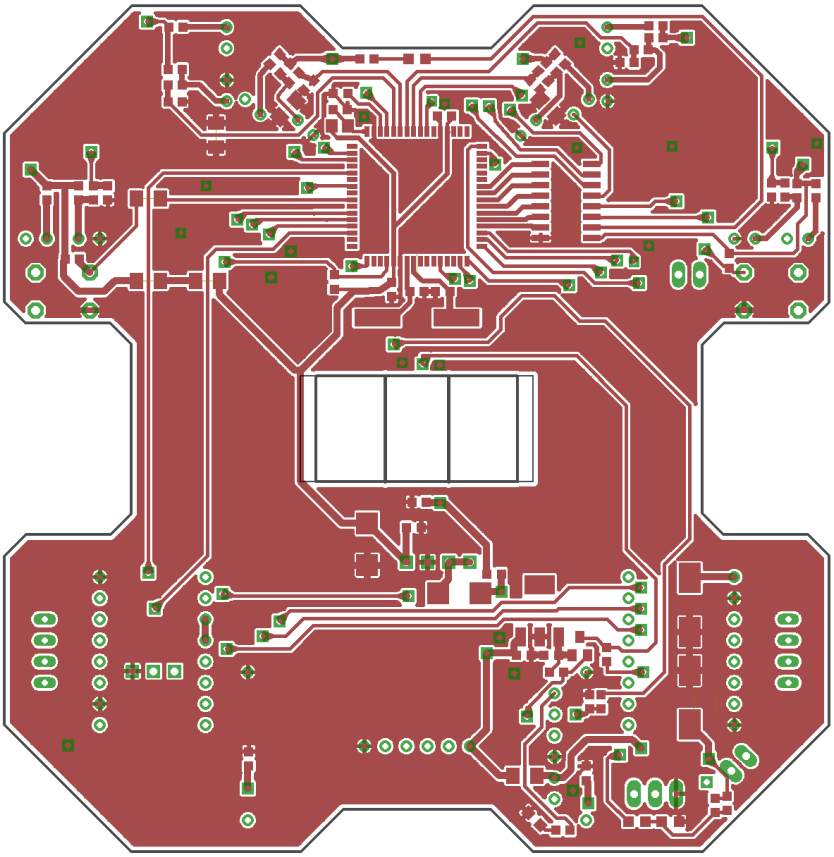
Rysunek 8: Płytka PCB gotowa do montażu elementów.

Wszystkie ścieżki sygnałowe mają szerokość 16 mili. Ścieżki zasilania 32 mili. Płytka w swoim kształcie jest symetryczna, lecz masa elementów skupiona została przy tylnej części. Powoduje to brak efektu kołysania się robota ze względu na dociśnięcie tyłu do podłoża. Płytka została stworzona metodą fototransferu oraz wytrawiona w warunkach domowych. Otwory wykonano na wiertarce stołowej.

Prostokątny otwór na środku płytki jest miejscem na wystające elementy silników, w których znajdują się gniazda przewodów zasilających.

Dokładność metody fototransferu jest wystarczająca, aby otrzymać płytkę bez zwarć oraz przerwanych ścieżek. Minusem tej metody jest brak możliwości utworzenia cynowanych przelotek i otworów, przez co wszystkie przelotki muszą być przylutowane ręcznie.

3.2.1 Warstwa top



Rysunek 9: Warstwa top obwodu elektrycznego.

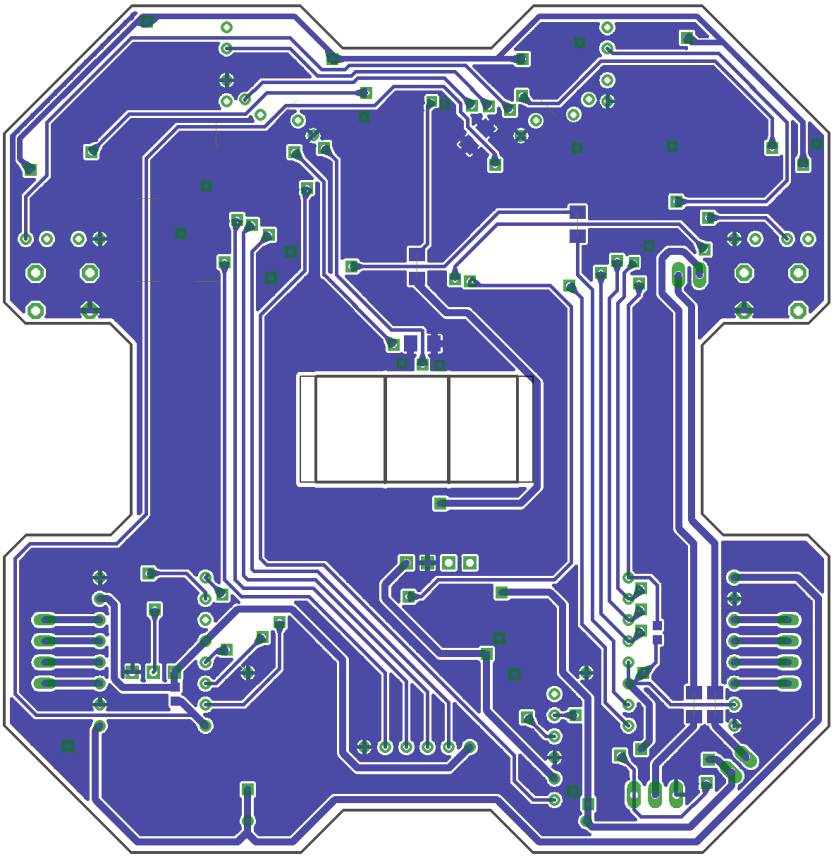
Na stronie górnej płytki umieszczono wszystkie układy scalone, czujniki, silniki, akumulatory i złącza. Podyktowane było to niewielkim prześwitem wynoszącym 2.5 mm.

W przedniej części robota znajdują się czujniki, procesor, układ ULN2003 oraz jeden z akumulatorów.

Z tyłu umieszczono sterowniki silników krokowych, obydwie przetwornice, moduł bluetooth, drugi akumulator oraz buzzer.

Silniki znajdują się w osi symetrii robota.

3.2.2 Warstwa bottom



Rysunek 10: Warstwa bottom obwodu elektrycznego.

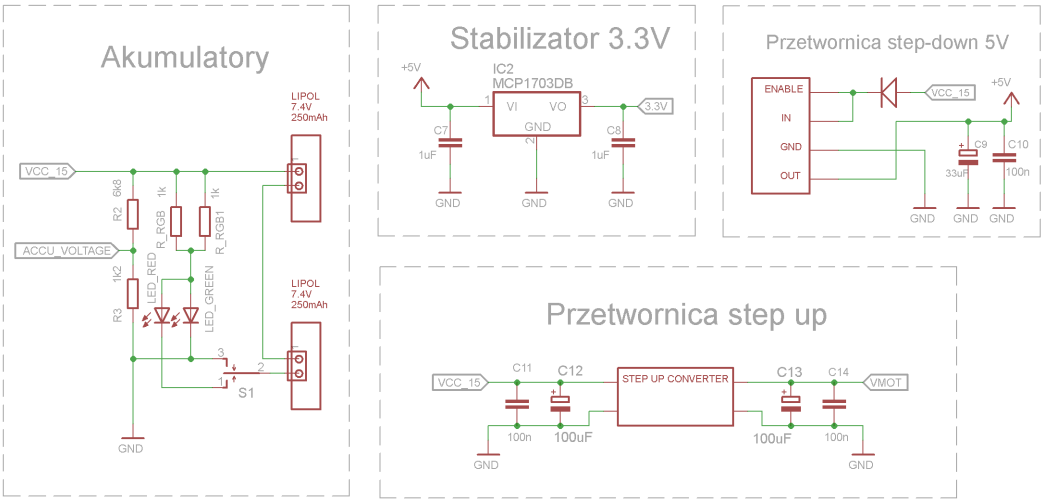
Na dolnej stronie płytki umieszczono jedynie kilka rezystorów oraz ślizgacz, znajdujący się w diametralnej robota, w jego tylnej części.

4 Elektronika

Schemat elektryczny robota został zaprojektowany za pomocą programu CadSoft Eagle.

4.1 Zasilanie

Robot zasilany jest z dwóch akumulatorów Li-PO 7.4 V każdy o pojemności 250 mAh połączonych szeregowo, co przy pełnym naładowaniu akumulatorów (max 8.4 V) daje 16.8 V napięcia zasilającego. Taka konfiguracja pozwala na pracę robota przez kilkanaście minut.
Do sygnalizowania stanu włączenia zasilania użyto diody RGB. Przy braku podłączonych obydwu akumulatorów dioda nie świeci. Jeżeli akumulatory są podłączone poprawnie, lecz włącznik robota jest w stanie OFF, dioda świeci na czerwono. Po włączeniu robota dioda zmienia kolor na zielony.



Rysunek 11: Schemat elektryczny układów zasilania.

4.1.1 Zasilanie silników

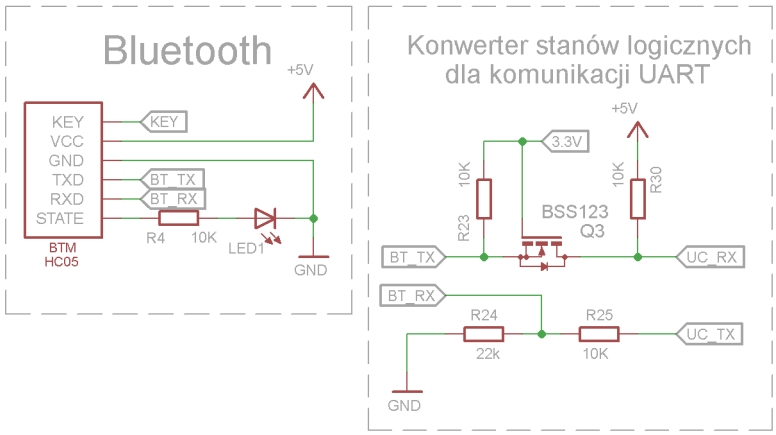
Silniki zasilane są napięciem 24 V, podawanym z przetwornicy step-up opartej o układ XL6009. Przy pracy pobierają 1-1.2 A prądu, co wymusza na wejściu przetwornicy dużo większy prąd przy zastosowaniu napięcia zasilania rzędu 8-12 V. Jest to powodem zastosowania dwóch akumulatorów.

4.1.2 Zasilanie logiki

Wszystkie układy logiczne zasilane są napięciem 5V uzyskiwanym z przetwornicy step-down D24V6F5.
Powodem zastosowania przetwornicy zamiast stabilizatora liniowego, jest różnica napięć na wejściu i wyjściu układu. Występuje tu obniżenie napięcia z 16 V do 5 V, co przy stabilizatorze liniowym generowałoby bardzo duże ilości ciepła i mogłoby prowadzić do jego uszkodzenia lub poparzenia podczas dotykania robota.

4.1.3 Konwerter stanów logicznych

Koniecznym okazało się zastosowanie konwertera stanów logicznych między napięciami 3.3 V a 5 V. Wynikało to z tego, że wszystkie układy logiczne w robocie działają na napięciu 5 V, a moduł bluetooth na liniach sygnałowych zgodnie ze specyfikacją wymaga stanu wysokiego o wartości 3.3 V. Do konwertera stanów logicznych podawane jest napięcie ze stabilizatora 3.3 V MCP1703DB. Napięcie obniżane jest z 5 V, stąd nie występuje tutaj konieczność użycia przetwornicy.



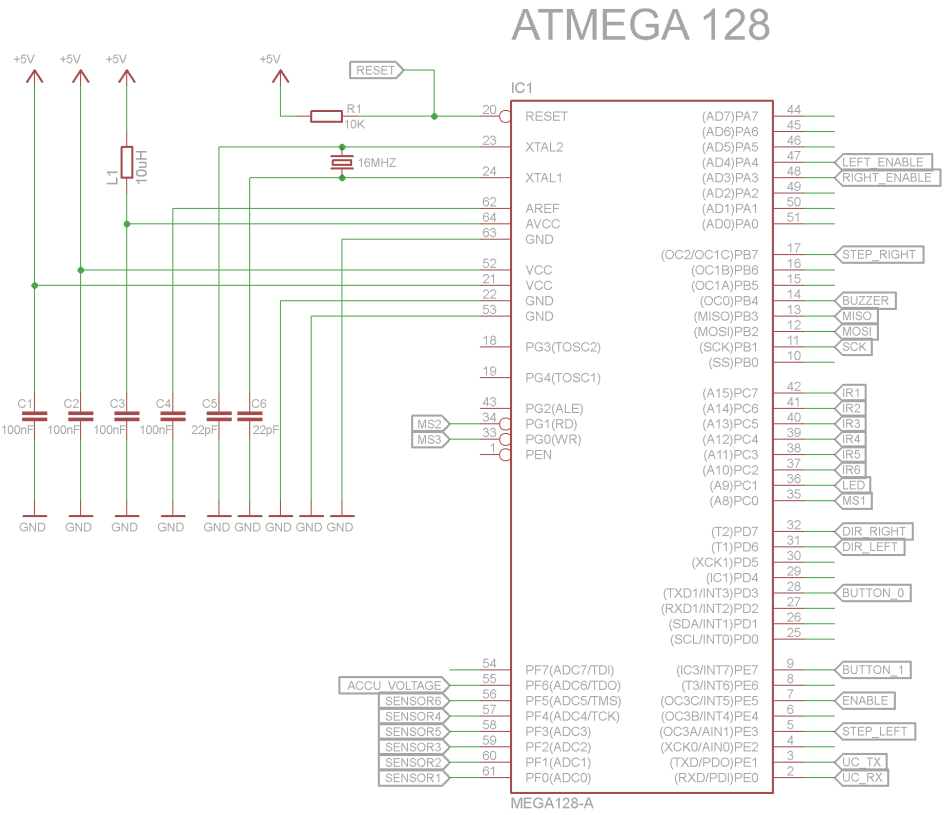
Rysunek 12: Schemat elektryczny konwertera stanów logicznych oraz podłączenia modułu bluetooth HC-05.

4.2 Procesor

Jednostką sterującą całego robota jest ośmiobitowy procesor AVR Atmega 128 firmy Atmel, taktowany zewnętrznym kwarcem 16 Mhz. Procesor zasilany jest napięciem 5 V.
Główne cechy zastosowanego procesora istotne dla tego projektu to:

- 128 KB pamięci Flash,
- 4 KB pamięci EEPROM,
- 4 KB pamięci SRAM,
- dwa ośmiobitowe timery,
- dwa szesnastobitowe timer,
- ośmio kanałowy przetwornik ADC o rozdzielczości 10 bit,
- 53 programowalne linie wejścia/wyjścia,
- dwa programowalne interfejsy USART.

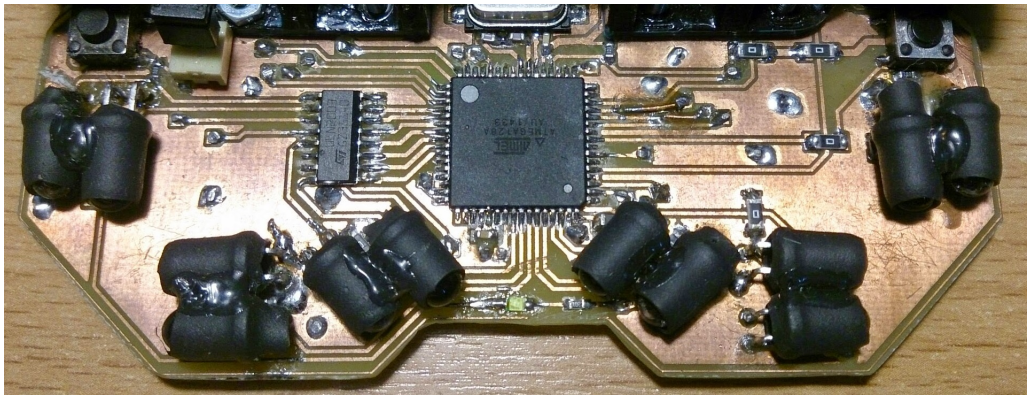
W celu zmniejszenia rozmiarów robota, zastosowano procesor w obudowie TQFP64.



Rysunek 13: Schemat elektryczny podłączenia wyprowadzeń mikrokontrolera.

4.3 Czujniki odległości

Jako czujnik odległości zastosowano diodę LED SFH4550 działającą w paśmie podczerwieni, oraz fototranzystor SFH 313 działający jako odbiornik, również w paśmie podczerwieni. W robocie umieszczono 6 takich zestawów. Dwa skierowane w przód, dwa na boki oraz dwa odchylone od diametralnej robota o 45 stopni.



Rysunek 14: Zamontowane czujniki odległości w przedniej części robota.

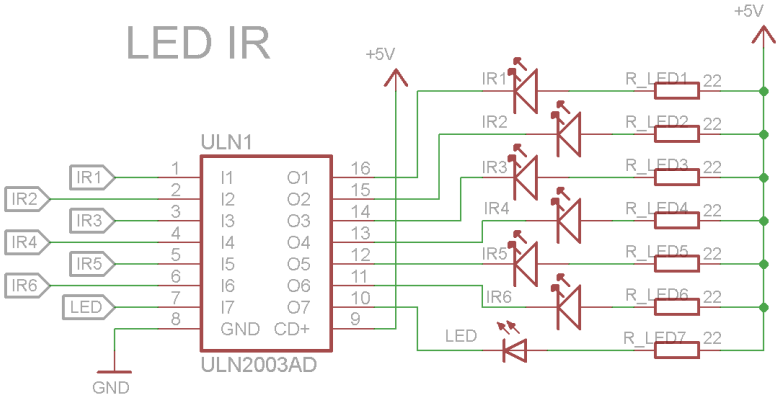
Czujniki takie są czujnikami odbiciowymi. Ich zasada działania opisana została poniżej:

- Dioda LED działająca w paśmie podczerwieni wysyła wąską wiązkę światła.

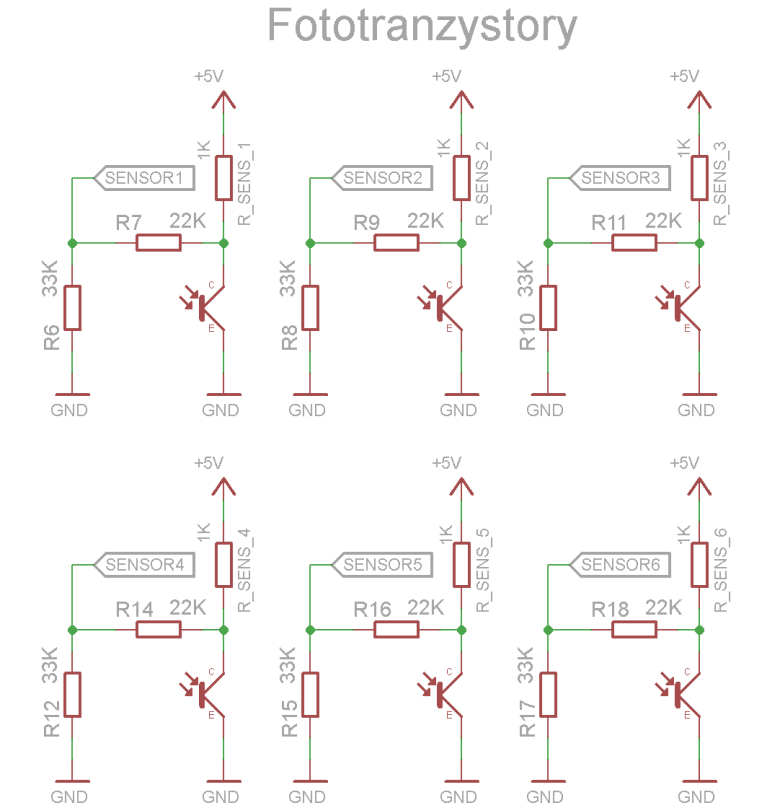
- Światło natrafiając na przeszkodę (w tym wypadku białą ścianę) zostaje odbite w kierunku robota. Jeżeli żadna przeszkoda nie wystąpi na drodze emitowanej wiązki, zostanie ona rozproszona.

- Fototranzystor, umieszczony przy diodzie nadawczej, zaczyna przewodzić wraz ze wzrostem natężenia wracającego odbitego światła. Jeżeli wiązka została rozproszona, żadne światło nie wróci do odbiornika i nie będzie on przewodził. Jeżeli światło natrafi na przeszkodę, z intensywnością proporcjonalną do odległości przeszkody wróci do odbiornika. Dzięki temu uzyskuje się odczyt analogowy z czujnika, który można mierzyć przetwornikiem ADC mikrokontrolera.

Prąd płynący przez diody IR to 95 mA, co daje wystarczające natężenie światła do dokładnego odczytywania odległości, przy jednoczesnym braku konieczności uważania na przepalenie się diody spowodowane długim świeceniem przy zbyt dużym prądzie.



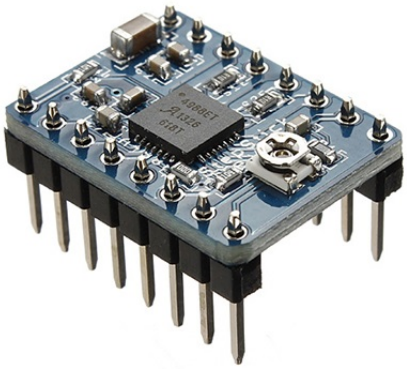
Rysunek 15: Schemat elektryczny podłączenia diod LED do układu ULN2003.



Rysunek 16: Schemat elektryczny podłączenia fototranzystorów.

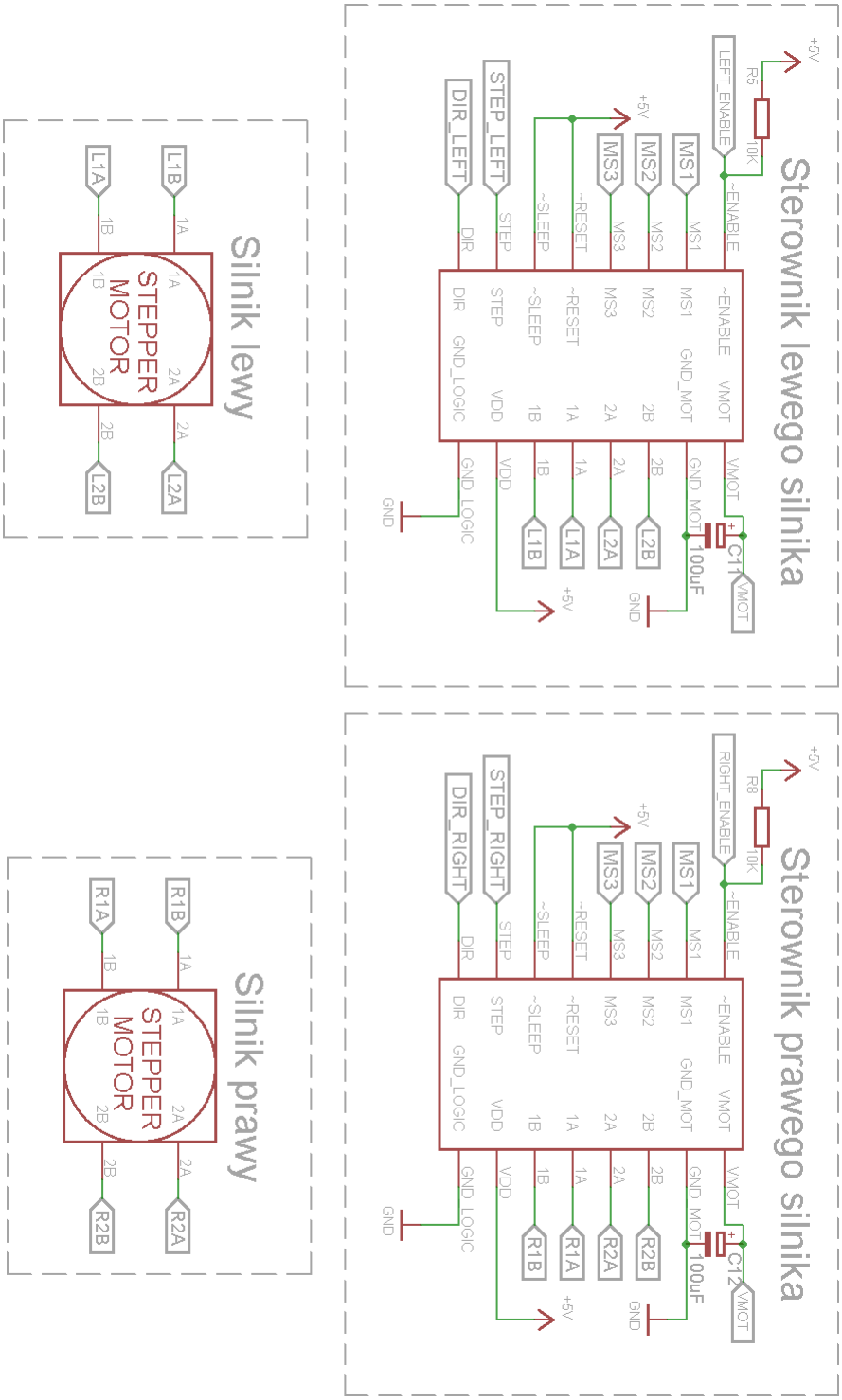
4.4 Sterowniki silników

Zastosowano sterowniki firmy Pololu oparte na module A4988. Sterowniki pozwalają na pracę w trybach pełnokrokowym, półkrokowym, cwierćkrokowym, 1/8 oraz 1/16 kroku. Funkcja ograniczania prądu (chopper) pozwala sterować silniki wyższym napięciem bez ryzyka uszkodzenia cewek silnika.



Rysunek 17: Sterownik silnika krokowego z modułem A4988.

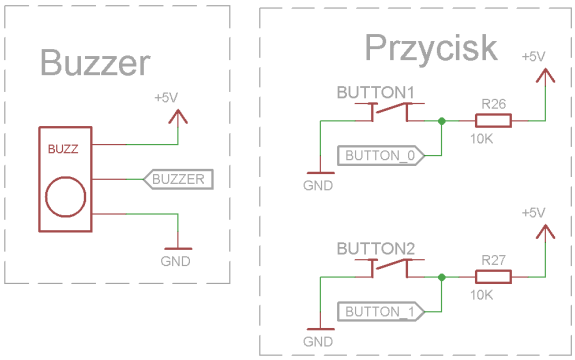
Kolejną zaletą zastosowania sterowników silników krokowych jest możliwość sterowania silnika za pomocą tylko jednego pinu (tylko jeden pin mikrokontrolera podaje sygnał częstotliwościowy odpowiedzialny za taktowanie silnika). W celu umożliwienia generowania sygnałów o różnej częstotliwości, każdy ze sterowników obsługiwany jest przez inny timer.
Obydwa szesnastobitowe timery sterujące działają w sprzętowym trybie Clear on Compare Match. Pozwala to na automatyczne generowanie sygnału o zadanej częstotliwości bez udziału procesora.



Rysunek 18: Schemat elektryczny podłączenia sterowników silników krokowych.

4.5 Interfejs komunikacyjny

Jako interfejs komunikacyjny robota służą dwie diody LED, buzzer, interfejs UART wraz z modułem bluetooth HC-05 oraz dwa przyciski.
Programowanie robota realizowane jest poprzez interfejs SPI.



Rysunek 19: Schemat elektryczny podłączenia buzzera oraz przycisków.

5 Oprogramowanie

Główną częścią projektu było rozwinięcie oprogramowania związanego z obsługą peryferii oraz algorytmem rozwiązującym labirynt. Program napisany został w języku C.
Środowisko programistyczne używane do jego tworzenia to Code::Blocks 12.11.
Programowanie mikrokontrolera realizowane jest za pomocą Sinaprog 1.4.5.10.

5.1 Pomiary odległości

Pomiar z każdego z czujników dokonywany jest z częstotliwością 200 Hz. Zastosowano pomiar różnicowy z uśrednianiem wyników. Każdy pomiar wykonywany jest przy włączonej oraz wyłączonej diodzie IR, a następnie wyniki są od siebie odejmowane. Wynik ostateczny jest średnią arytmetyczną z pięciu ostatnich pomiarów.

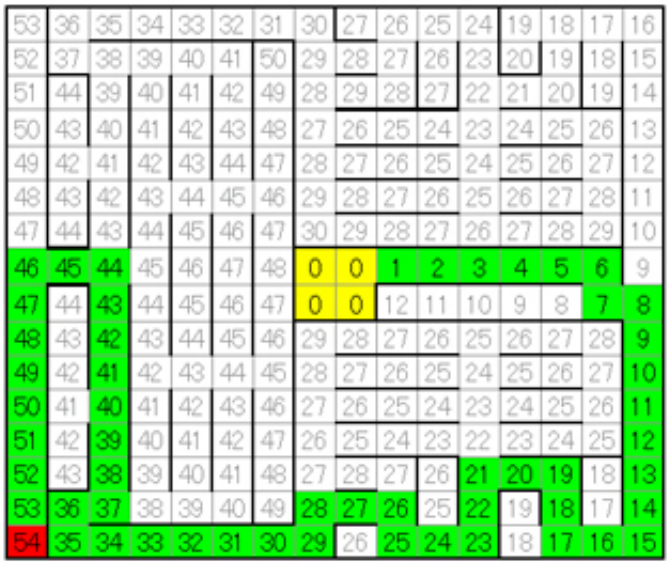
5.2 Sterowanie prędkością robota

Prędkość robota sterowana jest częstotliwością sygnału podawanego na sterowniki silników. Do tego celu wykorzystano dwa timery ośmiobitowe. Pracują one w trybie CTC, zmieniając stan pinu wyjściowego na przeciwny

kiedy timer doliczy do wartości zapisanej w rejestrze OCR. Następnie timer jest resetowany i liczy od nowa. Cała ta operacja realizowana jest przez timer sprzętowy, przez co procesor nie jest obciążany dodatkowymi obliczeniami. Zmniejszając wartość w rejestrze OCR, zwiększa się częstotliwość podawanego sygnału.

5.3 Algorytm

Zaimplementowany w robocie opera się na algorytmie Dijkstry, służącym do znajdywania najkrótszej drogi w grafie. Wierzchołki grafu reprezentowane są przez pola labiryntu, a krawędzie przez przejścia pomiędzy kolejnymi polami. Koszt przejść ustalany jest na podstawie ruchu, który może w danym momencie zostać wykonany przez robota. Ruch o mniejszym czasie wykonania (jazda na wprost) ma mniejszy koszt od operacji zajmujących większą ilość czasu (zakręty).
Algorytm rozpoczynany jest w środku labiryntu. Dla każdego kolejnego pola znajdowany jest czas przejazdu do wszystkich sąsiadujących z nim pól. Jeżeli pomiędzy polami występuje ściana, takie przejście nie jest możliwe i nie jest brane pod uwagę. Algorytm docierając do aktualnej pozycji robota, jednocześnie wyznacza najszybszą trasę do środka labiryntu.



Rysunek 20: Wizualizacja działania algorytmu floodfill

6 Podsumowanie

Projektowanie, budowa oraz zaprogramowanie robota zostały zrealizowane zgodnie z założeniami. Robot dobrze radzi sobie w labiryncie i jest gotowy do wzięcia udziału w zawodach.

6.1 Sprawność silników krokowych w robocie mobilnym

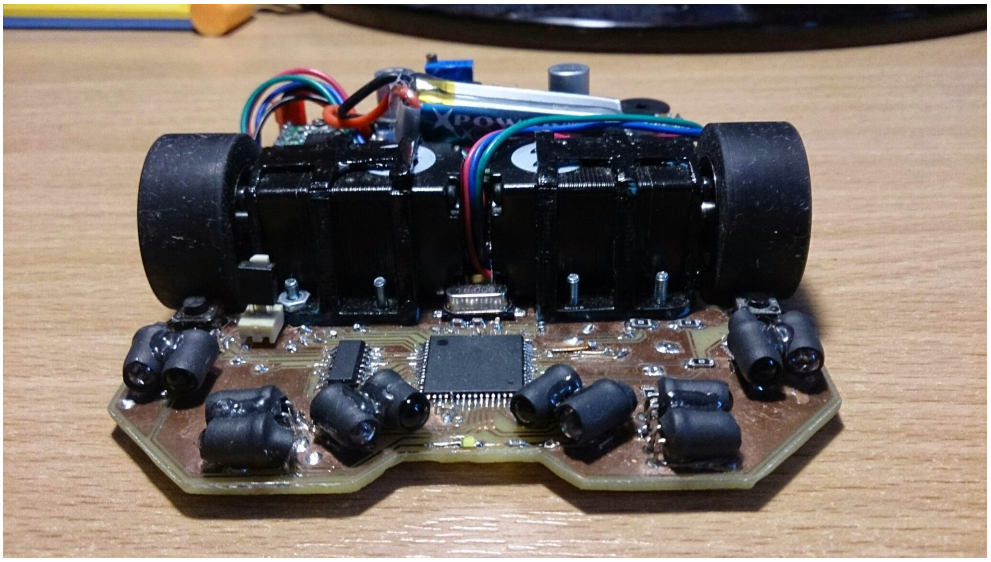
Podczas jazdy kroki są gubione dość rzadko, co pozwala na wystarczająco dokładne wysterowanie robota w otwartej pętli sterowania. Osiągane maksymalne prędkości podczas testów sięgają 2 m/s. Głównymi ich wadami w tej konstrukcji są masa, wielkość, konieczność zastosowania sterowników oraz wysokiego napięcia. Kolejną wadą jest konieczność ograniczania przyspieszeń, w celu zminimalizowania gubionych kroków. Zaletą zastosowania silników krokowych jest brak konieczności stosowania sprzężenia zwrotnego w postaci enkoderów obrotowych.

6.2 Sterowanie robotem klasy (2.0) w otwartej pętli regulacji

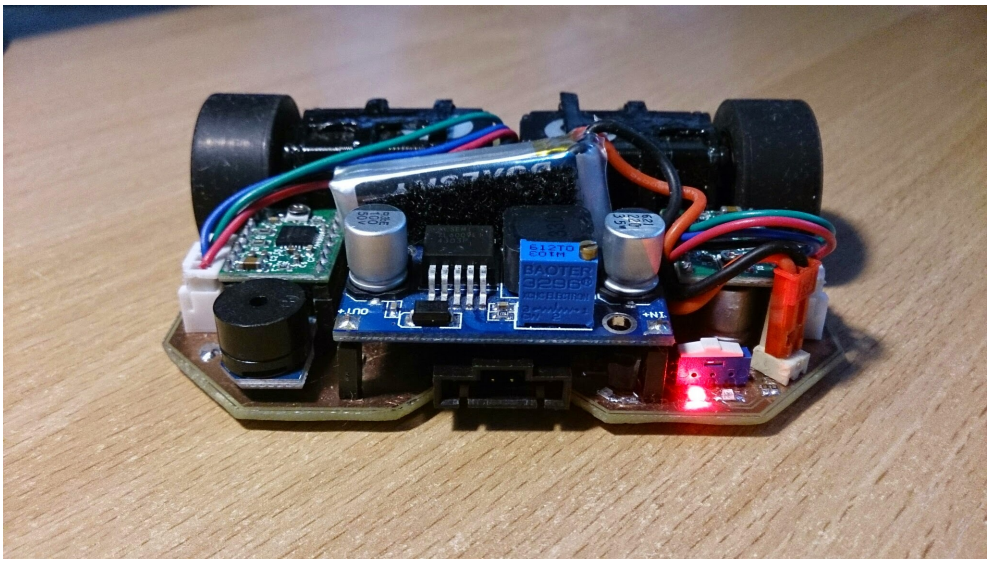
Sterowanie w otwartej pętli regulacji z wykorzystaniem silników krokowych jest możliwe. Rozwiązanie to jest wygodniejsze i prostsze do zrealizowania, aczkolwiek posiada bardzo dużą wadę, w postacie braku informacji o gubionych krokach. Cała kalibracja opierać musi się na odczytach z czujników.

Budowa tego robota przyczyniła się poszerzeniu wiedzy na temat budowy robotów mobilnych, projektowaniu schematów elektrycznych oraz płytek PCB, kategorii micromouse oraz silników krokowych.

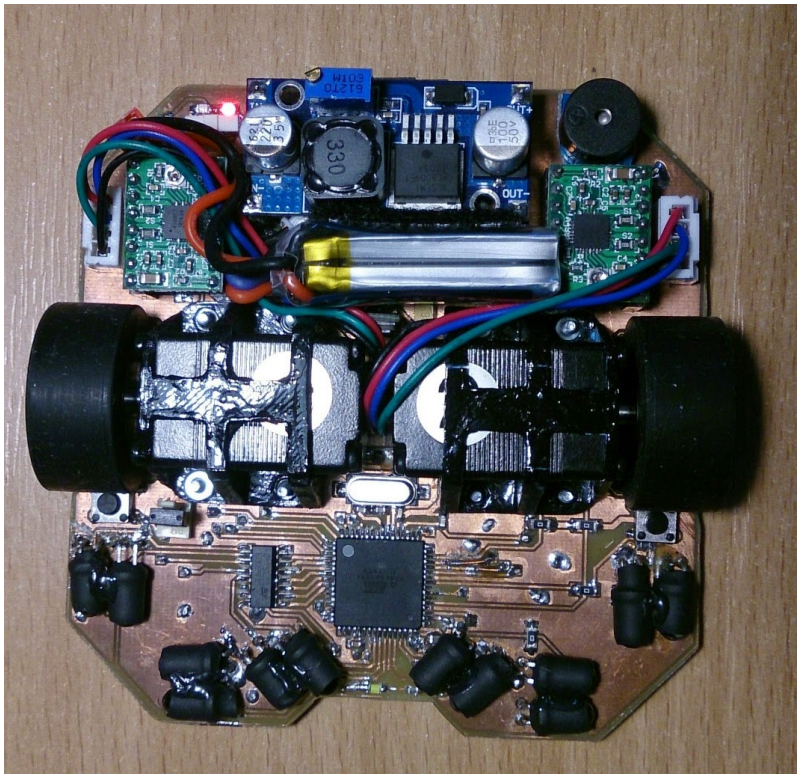
6.3 Zdjęcia robota



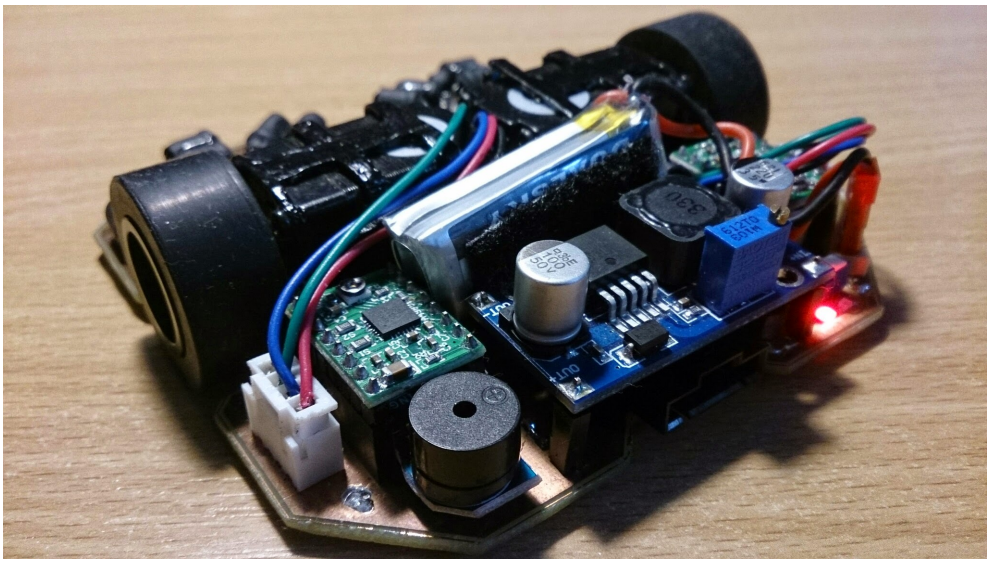
Rysunek 21: Widok robota z przodu.



Rysunek 22: Widok robota z tyłu.



Rysunek 23: Widok robota z góry.



Rysunek 24: Widok robota po skosie z tyłu.

7 Materiały źródłowe

Literatura

[1]

[2] Regulamin zawodów robotów klasy mocromouse, *http://mistrzostwapolskirobotow.pl/files/MicroMouse_ver_1.0.pdf*

[3] Paweł Urbaniak, System czujników do robota klasy Micromouse. Wrocław 2013.

[4] Texas Instruments, Increasing the High Speed Torque of Bipolar Stepper Motors, *http://www.ti.com/lit/an/snva029b/snva029b.pdf*

[5] Jerzy Kraśniewski, skrypt „Sterowanie silników skokowych"

[6] Micromouse Online, *http://www.micromouseonline.com/*

[7] Micromouse USA, *http://micromouseusa.com/*

[8] Strona internetowa Koła Naukowego Robotyków KoNaR, *http://www.konar.pwr.wroc.pl/*

[9] Blog o robotyce FORBOT, *http://forbot.pl/blog/*