



UNIVERZITET “DŽEMAL BIJEDIĆ”  
FAKULTET INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

ZAVRŠNI RAD

# Samobalansirajući robot

elektronički bazirani projekat za održavanje robota na dva točka uspravnim

**Profesor:**  
Doc.dr. Elmir Babović

**Student:**  
Adi Šoš, IB160034

Akadska godina: 2018/2019

Mostar, 2019. godina

# IZJAVA O AUTORSTVU

Ja, **ADI (AMIR) ŠOŠE**, student Fakulteta informacijskih tehnologija, Univerziteta "Džemal Bijedić" u Mostaru, pod punom moralnom, materijalnom i krivičnom odgovornošću,

**Izjavljujem**

da je rad pod naslovom

**SAMOBALANSIRAJUĆI ROBOT**

u potpunosti rezultat sopstvenog istraživanja, gdje su korišteni sadržaji (tekst, ilustracije, tabele itd.) drugih autora jasno označeni pozivanjem na izvor i ne narušavaju bilo čija vlasnička ili autorska prava.

U Mostaru, 17.09.2019.

---

ADI ŠOŠE, IB160034

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Sažetak</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Arduino</b>	<b>3</b>
3.1	Proces kompajliranja	3
3.2	Pisanje koda	4
3.3	Razvojno okruženje	4
3.3.1	Arduino IDE	4
3.3.2	PlatformIO	6
3.4	Tipovi varijabli	7
3.5	Konstante	8
3.6	Funkcije	8
3.7	Pinovi	9
3.8	MEGA	10
<b>4</b>	<b>HC05</b>	<b>12</b>
4.1	Tehnologije	12
4.1.1	Piconet	12
4.1.2	Scatternet	13
4.1.3	Adaptive Frequency Hopping	13
4.1.4	Phase Shift Keying	13
4.1.5	Enhanced Data Rate	14
4.1.6	BlueCore4-Ext	14
4.2	Specifikacije	14
4.3	Pinovi	15
4.4	AT komande	16
<b>5</b>	<b>Koračni motori</b>	<b>18</b>
5.1	Elektromagneti	18
5.2	Proces rotacije osovine	18
5.3	Tipovi	19
5.4	Načini upravljanja	20
<b>6</b>	<b>A4988</b>	<b>22</b>
6.1	Digitalno-analogni konverter	22
6.2	H-most	23
6.3	Miješano propadanje	24
6.4	Pinovi	24
6.5	Specifikacije	25
<b>7</b>	<b>MPU6050</b>	<b>26</b>
7.1	Žiroskop	26
7.2	Akcelerometar	26
7.3	Digital Motion Processing	27
7.3.1	Eulerovi uglovi	27

7.3.2	Kvaternioni . . . . .	28
7.4	I <sup>2</sup> C . . . . .	29
7.4.1	Paketi . . . . .	30
7.5	Specifikacije . . . . .	31
7.5.1	Pinovi . . . . .	31
7.6	I2Cdevlib . . . . .	32
<b>8</b>	<b>PID kontroler . . . . .</b>	<b>33</b>
8.1	Proporcionalni dio . . . . .	33
8.2	Integralni dio . . . . .	34
8.3	Derivativni dio . . . . .	34
8.4	PID . . . . .	35
8.5	Podešavanje parametara . . . . .	36
8.6	Modifikacije . . . . .	37
8.6.1	Integralni zamah . . . . .	37
8.6.2	Deadband . . . . .	37
<b>9</b>	<b>Android aplikacija . . . . .</b>	<b>38</b>
9.1	Dizajn . . . . .	38
9.1.1	GridLayout . . . . .	38
9.1.2	ImageButton . . . . .	39
9.2	Kod . . . . .	40
9.2.1	Bluetooth servis . . . . .	40
9.2.2	MainActivity . . . . .	41
<b>10</b>	<b>Robot . . . . .</b>	<b>44</b>
10.1	Konstrukcija . . . . .	44
10.1.1	Navojne šipke . . . . .	44
10.1.2	Pleksiglas . . . . .	44
10.1.3	Točkovi . . . . .	45
10.2	Komponente . . . . .	45
10.2.1	HC-05 . . . . .	45
10.2.2	Koračni motori . . . . .	46
10.2.3	A4988 . . . . .	46
10.3	MPU6050 . . . . .	47
10.4	Matador ploča . . . . .	47
10.4.1	Napajanje . . . . .	48
10.5	Kabliranje . . . . .	49
10.6	Proces balansiranja . . . . .	50
10.7	Arduino program . . . . .	51
10.7.1	Biblioteke . . . . .	51
10.7.2	Motors biblioteka . . . . .	51
10.7.3	Tok programa . . . . .	52
<b>11</b>	<b>Zaključak . . . . .</b>	<b>55</b>

# 1 Sažetak

## 2 Uvod

U nadolazećem tekstu imat ćete priliku da se detaljnije upoznate sa teoretskim i praktičnim procesom izrade samobalansirajućeg robota. U prvih nekoliko sekcija, čitaoc će se upoznati sa tehnologijama i uređajima korištenim u svrhe izrade diplomskog rada. Također, osvrnut ćemo se na osnove elektronike koje je neizbježno razumijeti da bi se shvatio praktični dio rada. Još jedna stavka o kojoj ću pisati jesu matematičke kontrolne petlje koje su jedan od glavnih aspekata samobalansirajućeg robota.

Osnovni cilj ovog projekta jeste uspješna izrada robota koji se može uspravno balansirati na dva točka i kretati se pomoću komandi koje će primiti putem bluetooth veze.

Nakon teoretskog dijela rada detaljnije ću govoriti o samoj Android aplikaciji kao i najzanimljivijem dijelu projekta - izradi robota koji se kontroliše pomoću Arduino mikrokontrolera. Bitno je naglasiti da se radi o multidisciplinarnom radu koji integriše polja matematike, fizike, elektronike, komunikacijskih protokola, mehanike, inženjeringa i razvoja mobilnih aplikacija.

## 3 Arduino

Arduino je elektronički bazirana platforma otvorenog koda<sup>1</sup>. Radi se o ploči koja na sebi najčešće ima Atmel-ov 8-bitni AVR mikrokontroler. Iako postoji više vrsta Arduino ploča (Uno, Nano, Mega, Leonardo itd.), koncept programiranja njihovog ponašanja je isti. Međutim, ono što čini razlike među ovim verzijama, jeste količina radne memorije, kao i broj ulazno/izlaznih pinova. Ono što čini ovu platformu veoma popularnom jeste njena pristupačnost, kako cijenom, tako i stepenom potrebnog predznanja iz polja elektronike i integralnih kola[3].

Arduino, kao platforma, nije namijenjen za rješenja u produkciji i masovnu proizvodnju, već za izradu prototipa uređaja ili projekte koji spadaju u kategoriju hobija. Osobina, koja za to ima najveći značaj, je opća namjenjenost Arduina što ga u proizvodnji čini skupljim od ploča koje su napravljene da služe samo jednoj svrsi.

Obzirom sam kroz razvoj ovog projekta koristio Arduino Mega, sve buduće reference će se odnositi na Mega model.

### 3.1 Proces kompajliranja

Programski jezik u kojem se pišu datoteke koje sadrže Arduino izvorni kod je C++. Međutim većina standardnih biblioteka je preuzeta iz C programskog jezika, zbog male količine radne memorije kontrolera. Arduino datoteke je moguće prepoznati po njihovoj ".ino" ekstenziji. Ove datoteke se još nazivaju i skicama.

Nakon što se pokrene proces kompajliranja projekta, Arduino okruženje pravi male promjene u kodu, kako bi se nakon toga mogao proslijediti gcc i g++ kompajleru. U ovoj fazi se sve datoteke u direktoriju kombinuju u jednu i na njen početak se dodaje `#Include<Arduino.h>` zaglavlje. Zatim slijedi povezivanje koda sa standardnim Arduino bibliotekama, a nakon toga i sa ostalim bibliotekama uključenim u direktoriji skice. Kako bi bila uključena u proces prevođenja, biblioteka (njen .cpp i .h dokument) se mora nalaziti na `libraries\{NazivBiblioteke}` putanji[4].

Kada je skica povezana i prevedena, vrijeme je da takva bude prebačena u Arduino memoriju gdje će se izvršavati.

---

<sup>1</sup><https://github.com/arduino>

## 3.2 Pisanje koda

Kao što je spomenuto u sekciji 3.1, Programski jezik koji koristimo pri programiranju Arduino kontrolera je C++. Najjednostavnija “.ino” datoteka se sastoji iz dvije funkcije:

1. Setup
2. Loop

Funkcija “Setup” se izvršava samo jednom pri pokretanju kontrolera i služi za inicijalizaciju komponenti i objekata. Druga funkcija, pod nazivom “Loop”, je sama srž načina rada ovih ploča. Kod koji se nalazi unutar ove funkcije će se ciklično izvršavati sve dok je Arduino upaljen. Taj kod je sekvenca koja predstavlja i ponašanje isprogramirane ploče u upotrebi.

## 3.3 Razvojno okruženje

### 3.3.1 Arduino IDE

Arduino posjeduje svoje oficijelno okruženje pod nazivom “Arduino IDE”. Ono dolazi u dvije verzije - online<sup>2</sup> i verzija koju instaliramo na lokalni računar. U ovom tekstu ću se fokusirati na offline okruženje, jer se uz njegovu instalaciju automatski instaliraju i Windows driveri potrebni za prebacivanje koda na Arduino..

Pri kreiranju prve skice ispred korisnika se nalazi “prazna” datoteka.

```
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
}  
  
void loop() {  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
}
```

## Alati

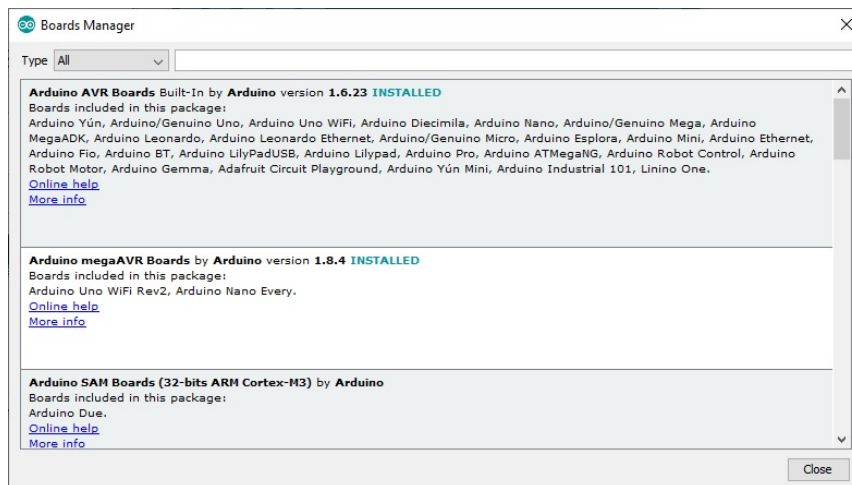
**Boards manager** je opcija koja se nalazi u alatnoj traci pod stavkom “Tools”. Koristeći ovaj alat, biramo trenutnu arhitekturu ili model ploče na koju ćemo postaviti kod. S obzirom da je program otvorenog koda, kroz ovaj proces se mogu instalirati i

---

<sup>2</sup><https://create.arduino.cc/editor>

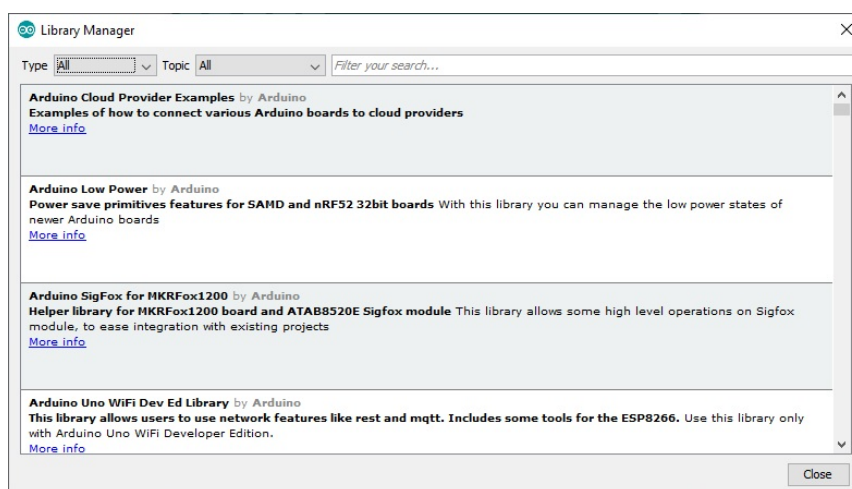


datoteke koje nisu ugrađene u IDE, s tim da je u tim slučajevima potrebno obratiti pažnju na sigurnost. Na ovaj način moguće je koristiti ovo razvojno okruženje u svrhu pisanja koda i za druge platforme ili klonove Arduino ploča. Unutar alata je moguće preuzeti i instalirati nove ploče, kao i nadograditi već postojeće.



Slika 1: Boards manager prozor

**Library manager** - ovaj alat se također nalazi pod stavkom “Tools”. Arduino IDE već dolazi sa predefinisanim repozitorijem biblioteka koje se nude za preuzimanje i instaliranje. Ukoliko korisnik želi preuzeti biblioteke iz drugih izvora to je moguće uraditi na dva načina: Instalacijom direktno iz “.zip” datoteke ili dodavanjem putanje repozitorija u postavkama okruženja. Brisanje biblioteka je nešto komplikovanije jer se mora raditi ručno na putanji %HOMEPATH%\Documents\Arduino\libraries.



Slika 2: Library manager prozor

**Serial monitor** je jedan od načina da se uspostavi komunikacija sa Arduino uređajem dok je isti pokrenut. Kada se ovaj alat pokrene, korisnik može pomoću serijske komunikacije razmjenjivati tekstualne poruke sa Arduinoom. Pored toga, na dnu prozora se nalazi padajući izbornik čija trenutno odabrana stavka definiše brzinu komunikacije u bitovima po sekundi.



Slika 3: Serial monitor prozor

### 3.3.2 PlatformIO

Pored Arduino IDE, programerima na izboru stoji još razvojnih okruženja u kojima mogu razvijati svoje Arduino kodove. Jedno od tih okruženja je PlatformIO<sup>3</sup>.

PlatformIO se instalira u vidu nadogradnje za Visual Studio Code, koji i sam spada u kategoriju programa otvorenog koda. Kao i Arduino IDE, i ovaj alat nudi izbor ploče koja će se programirati, među kojima je, pored samog Arduina, oko 700 ponuđenih[9]. S obzirom da je sada razvojno okruženje Visual Studio Code, to donosi sve njegove prednosti(markiranje sintakse, Intellisense, personalnim postavkama okruženja itd.).

Razlog, pored već navedenih, zbog kojeg sam ja izabrao PlatformIO jeste njegova arhitektura projekta. Naime, u ovoj platformi se koristi standardna arhitektura cpp-a, što je nekome ko dolazi iz tog svijeta, daleko lakše za održavati. Još jedna minorna razlika između ova dva okruženja je to da glavna datoteka sa izvornim kodom u PlatformIO nije “ino”, već “main.cpp” u kojoj je obavezno uključiti `Arduino.h` biblioteku.

---

<sup>3</sup><https://platformio.org/>

### 3.4 Tipovi varijabli

Pošto ploča ima ograničenu radnu memoriju, izbor tipova podataka je veoma bitan zbog njihovog predefinisano memorijskog prostora koji zauzimaju. Neki od najčešće korištenih tipova[3] su:

- bool (8 bita) - može sadržati jednu od dvije vrijednosti (da ili ne)
- byte (8 bita) - cijeli broj od 0 do 255, bez predznaka
- char (8 bita) - cijeli broj između -127 i 127 kojeg će kompajler pokušati prevesti u karakter
- word (16 bita) - cijeli broj bez predznaka između 0 i 65 535
- int (16 bita) - cijeli broj između -32 768 i 32 767
- long (32 bita) - cijeli broj između 2 147 483 648 i 2 147 483 647
- unsigned long (32 bita) - cijeli broj između 0 i 294 967 295, bez predznaka.
- float (32 bita) - broj sa plutajućom tačkom između -3.4028235E38 i 3.4028235E38

**Niz** je indeksirana kolekcija varijabli bilo kojeg tipa.

**String** se, pored već navedenih tipova, u praksi veoma često koristi kao tip podatka. Ovaj tip podatka nema fiksnu veličinu koju zauzima u memoriji i sastoji se od niza karaktera. Ono što ga čini korisnim su funkcije koje su ponuđene za rad sa stringovima kao što su:

- CharAt(n) - vraća karakter na poziciji n
- IndexOf(c) - vraća prvu poziciju karaktera c u stringu
- Concat(val) - dodaje vrijednost iz varijable val na kraj stringa
- Replace(sub1, sub2) - vrši zamjenu svih instanci sub1 instancom sub2 u stringu
- Substring(n, k) - vraća komad stringa između n i k pozicija
- Length() - vraća dužinu stringa

**Pokazivači** su tipovi podataka koji upućuju na adresu. Diferenciraju se pomoću znaka \*. Ako je varijabla x, onda je &x adresa te varijable.

### 3.5 Konstante

`Arduino.h` biblioteka dolazi sa korisnim konstantama[2].

- `INPUT | OUTPUT` - ova konstanta upravlja električno ponašanje pina, i priprema pin da prihvata ulazne ili šalje izlazne signale.
- `HIGH | LOW` - odnosi se na pinove i ima može imati različito ponašanje
  1. Kada je pin postavljen kao `INPUT`, tada se radi o povratnoj vrijednosti koju vraća očitavanje struje sa tog pina. Ukoliko je struja u njemu veća od 3.0V ili 2.0V (u zavisnosti od ploče koja se koristi), vratit će se `HIGH`, a ukoliko je manje, `LOW`.
  2. Kada je pin postavljen kao `OUTPUT`, sa `HIGH` će se njen izlaz postavlja na 3.3V ili 5V (u zavisnosti od ploče koja se koristi), a sa `LOW` na 1.5V ili 1.0V.
- `e | E` - koriste se zbog lakše čitljivosti koda te predstavljaju eksponencijalni dio izraza  $10^n$  koji se množi sa brojem koji mu prethodi.

### 3.6 Funkcije

Ono što omogućava kontrolisanje ulaza i izlaza, kao i upravljenje Arduino pločom jesu funkcije `Arduino.h` biblioteke.

**`delayMicroseconds(value)`** pravi zastoje vremenske dužine `value` u mikrosekundama.

**`micros()`** vraća `unsigned long` koji predstavlja broj mikrosekundi koje su prošle od paljenja Arduino ploče.

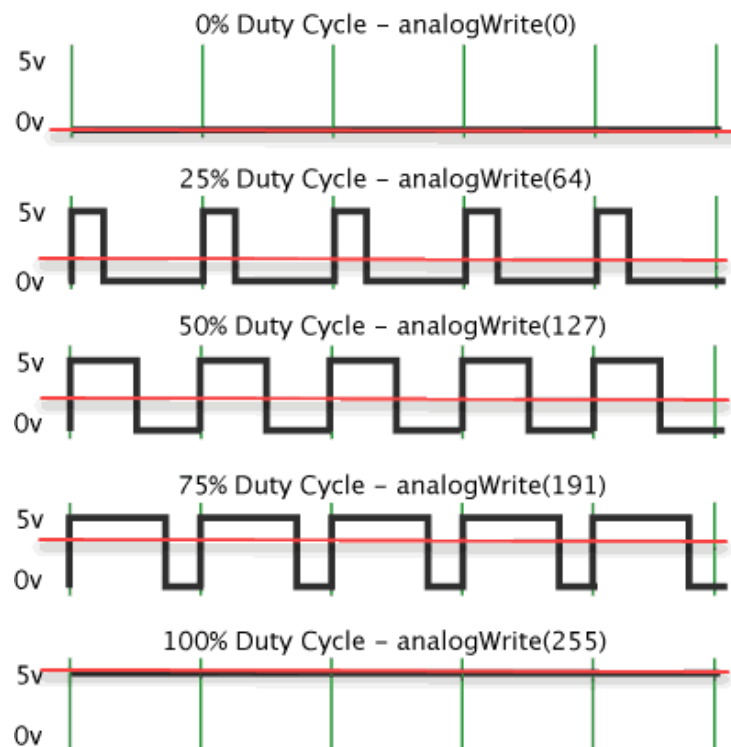
**`pinMode(pin, INPUT | OUTPUT)`** upravlja ponašanjem pina i na osnovu konstante `INPUT` ili `OUTPUT` određuje da li će pin očitavati ili slati struju na svom kraju.

**`digitalRead(pin)`** očitava trenutno stanje pina čije je ponašanje postavljeno na očitavanje i vraća `LOW` ili `HIGH` konstantu u zavisnosti od voltaže koju očitava.

**`digitalWrite(pin, HIGH | LOW)`** postavlja voltažu struje na izlazu pina na visoko ili nisko.

**`analogRead(pin)`** vraća integer vrijednost između 0 i 1024, koja je direktno proporcionalan voltaži struje na pinu.

**analogWrite(pin, value)** radi modulaciju širine pulsa u što simulira jačinu struje na izlazu pina, pošto analogni izlaz na Arduino ne postoji. Value ima raspon između 0 i 255 što je proporcionalno prividnoj voltaži struje koju će pin proizvesti.



Slika 4: Primjer modulacije širine pulsa

**Serial.Begin(rate)** inicijalizira serijski protok podataka, gdje je rate brzina prenosa podataka u bitovima po sekundi.

**Serial.Read()** vraća prvi bajt serijske komunikacije na ulazu.

**Serial.Write(String)** šalje podatke u binarnom obliku na serijski izlaz.

**attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin), ISR, mode )** Povezuje stanje pina mode (CHANGE, LOW, RISING, FALLING) sa prekidom u izvršenju loop funkcije i poziva ISR (rutina interapcije) koji je funkcija koja ne prima niti vraća parametre.

### 3.7 Pinovi

Svaka verzija ploče na sebi ima različit broj i mogućnosti pinova, ali svaka posjeduje barem po jedan pin svake vrste (sa izuzecima), kako bi se omogućile jednake funkcionalnosti svih ploča.

Dakle tipovi pinova koji postoje su:

- Digitalni - mogu biti ulazni i izlazni. Postavljaju se i očitavaju samo 2 stanja, pomoću funkcije `pinMode()` (poglavlje 3.6) se odabire režim u kojem će raditi, a nakon toga se može ili slati struja voltaže 1.0V/1.5V ili 3.3V/5V postavljajući `digitalWrite()` (poglavlje 3.6) HIGH ili LOW respektivno ili očitavati voltaža struje koristeći `digitalRead()` (poglavlje 3.6)
- PWM - digitalni pinovi koji podržavaju Pulse Width Modulation, tj. modulaciju širine pulsa (Slika 4)
- TX - digitalni pin, koristi se za serijsku transmisiju podataka, `Serial.Write()` (poglavlje 3.6) vrši ispis na ovaj pin.
- RX - digitalni pin, koristi se za serijsko čitanje podataka, `Serial.read()` (poglavlje 3.6) vrši učitavanje sa ovog pina.
- SCL - linija sata koja se koristi u I<sup>2</sup>C komunikaciji (sekcija 7.3.2)
- SDA - linija podataka koja se koristi u I<sup>2</sup>C komunikaciji
- INT - digitalni pinovi koji podržavaju prekide, aktiviraju se `attachInterrupt()` (poglavlje 3.6) funkcijom
- Analogni - pinovi koji imaju mogućnost analognog čitanja voltaže struje pomoću `analogRead()` (poglavlje 3.6) funkcije
- Power - pinovi vezani za ulaz i izlaz struje u ploči
  - 5V - izlaz sa strujom voltaže 5V
  - 3.3V - izlaz sa strujom voltaže 3.3V
  - GND - uzemljenje
  - VIN - pin kroz koji se Arduino može napajati strujom od 9V
  - RESET - spajanjem na ground restartuje Arduino

### 3.8 MEGA

Arduino MEGA je jedna od verzija Arduino ploče. Na sebi ima ATMEGA2560 mikrokontroler.

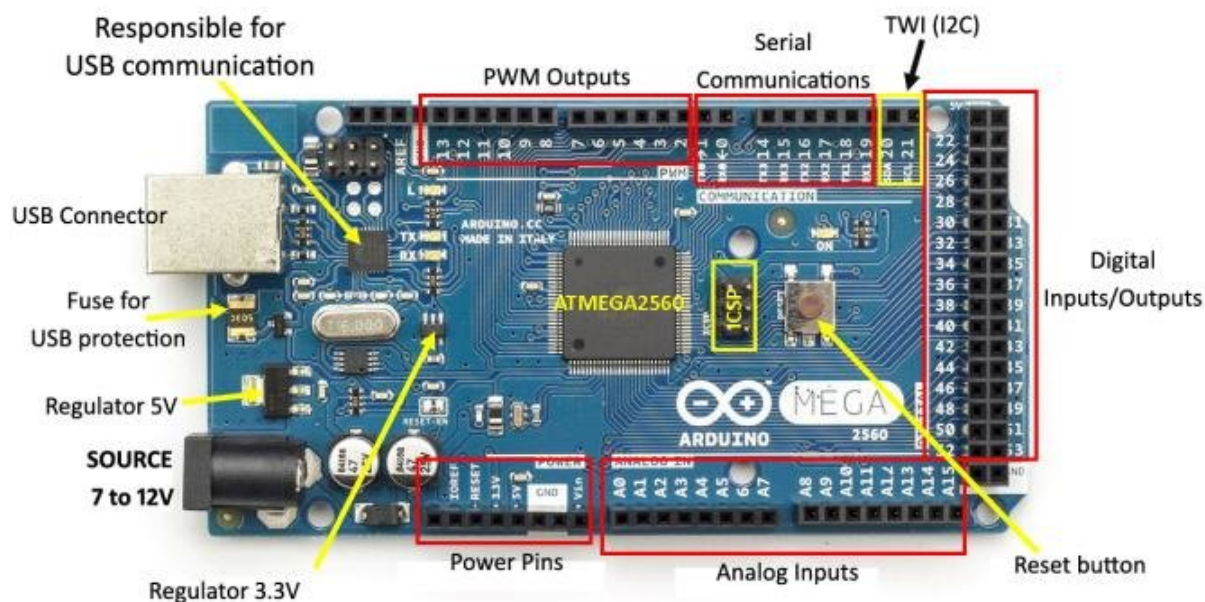
Ploča zahtjeva ulaznu struju od 6V do 20V, s tim da je preporučeno između 7V i 12V. Načini na koje se struja može dovesti u kontroler su kroz USB A interfejs, koji se ujedno

koristi i za povezivanje sa računarom, kroz 2.1mm priključak za napajanje sa pozitivnim centrom ili direktno kroz VIN pin.

Flash memorija	128 KB
Veličina bootladera	8 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Brzina sata	16 MHz
Jačina struje I/O pinova	40mA
Jačina struje na 3.3V pinu	60mA

Tabela 1: Arduino MEGA specifikacije

Na slici 5 je prikazana Arduino MEGA ploča te su pinovi označeni njihovim ulogama.



Slika 5: Šema pinova na ATMEGA2560

Dužina	101.6 mm
VŠirina	53.3 mm

Tabela 2: Arduino MEGA dimenzije

## 4 HC05

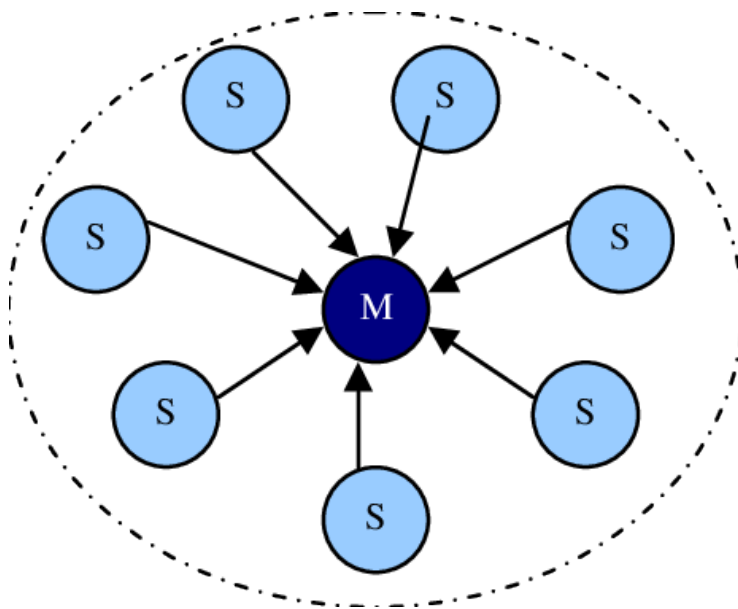
Obzirom da će se robotom moći upravljati pomoću Android aplikacije koja šalje bluetooth pakete, moramo osigurati način da ti paketi budu prihvaćeni od strane mikrokontrolera. To je u projektu postignuto koristeći bluetooth modul pod nazivom “HC-05”. Obzirom da je malih dimenzija i zanemarljive težine, HC-05 neće imati značajan utjecaj na sposobnost robota da se balansira.

### 4.1 Tehnologije

Prije nego što pređem na temu samih specifikacija uređaja, posvetit ću nekoliko paragrafa tehnologijama na kojima se rad modula zasniva.

#### 4.1.1 Piconet

Piconet je ad hoc mreža koja povezuje 2 ili više uređaja povezanih pomoću bluetooth protokola sa usklađen satovima, kao i sekvencom skoka. U jednom trenutku *master* uređaj može biti povezan na 7 aktivnih i do 255 neaktivnih *slave* uređaja. Zbog toga što bluetooth sistemi rade na 79 kanala, šansa da dođe do interferencije dva piconeta je oko 1.5%. Ova mreža se još često naziva i PAN (Personal Area Network).

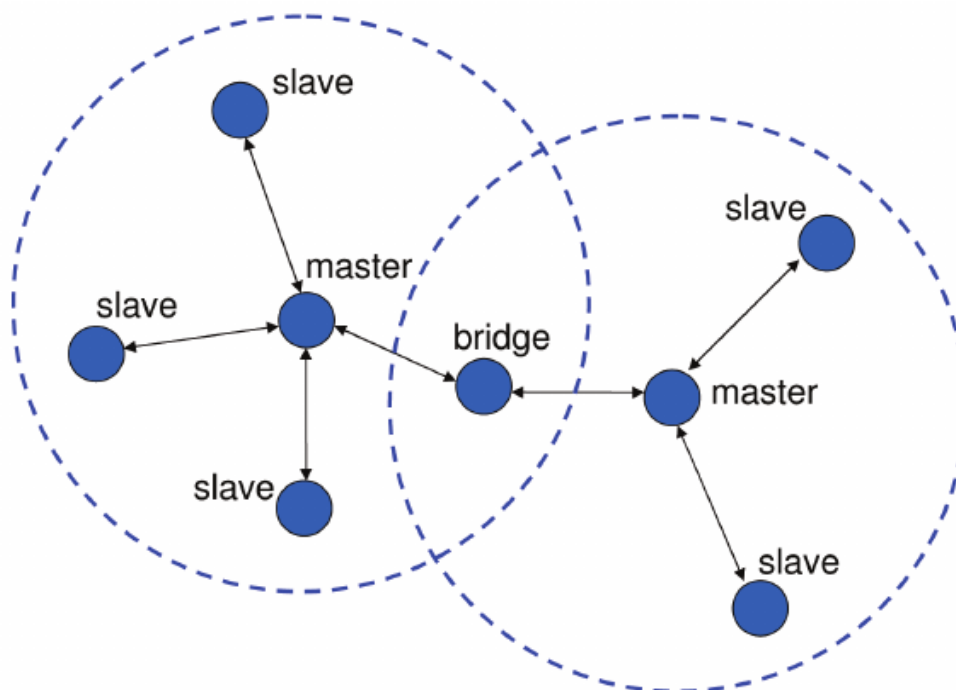


Slika 6: Piconet



### 4.1.2 Scatternet

Scatternet je mreža koja se sastoji od 2 ili više piconeta. Kako bi ovo bilo moguće, jedan slave uređaj mora biti povezan na 2 master uređaja ili se master uređaj iz jedne mreže ponaša kao slave uređaj druge.



Slika 7: Piconet

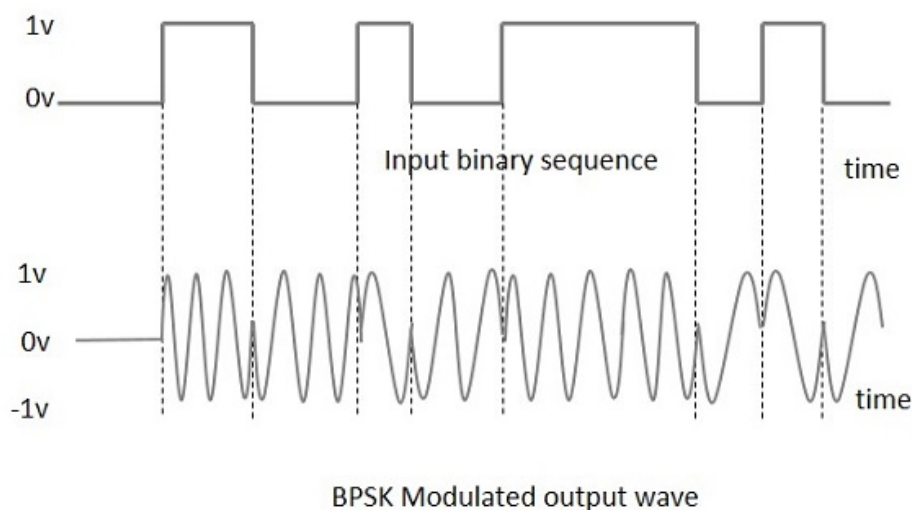
### 4.1.3 Adaptive Frequency Hopping

Skokovi u frekvenciji su neizbježna karakteristika bluetooth uređaja. Zbog toga što su bluetooth uređaji stalno u pokretu (mobiteli, satovi, slušalice, zvučnici itd.), mora postojati način da se izbjegne interferencija između ovih uređaja. Adaptive Frequency Hopping nastoji riješiti ovaj problem, mijenjajući frekvenciju na kojoj bluetooth uređaj radi. Što se tiče adaptivnosti, taj dio naziva proizlazi iz činjenice da uređaj prvo skenira kanale tražeći kanal sa najmanje prometa.

### 4.1.4 Phase Shift Keying

Phase-shift keying (PSK) je metoda digitalne komunikacije u kojoj se informacija prenosi promjenom faze transmitovanog signala mijenja. Ovo je moguće postići sa nekoliko metoda, od kojih je najjednostavnija binarni PSK koji koristi dvije suprotne faze od  $0^\circ$  i  $180^\circ$  (slika 8). U ovoj metodi, stanje svakog bita se poredi sa prethodnim te se tako na

osnovu njihove (ne)jednakosti mijenja trenutni bit ili ostavlja istim. Postoje i kompleksnije metode koje uključuju faze od  $+90^\circ$ ,  $-90^\circ$  ili čak i polovine svih dosadašnjih uglova[12].



Slika 8: Binarni PSK

#### 4.1.5 Enhanced Data Rate

Enhanced Data Rate (EDR) je tehnologija u kojoj se pomoću PSK modulacione šeme postiže transmisija koja je 2 do 3 puta brža od one koju su prethodne bluetooth tehnologije mogle proizvesti. Pojavljuje se sa Bluetooth 2.0 verzijom kao opcionalna nadogradnja. Koristeći ovu tehnologiju brzina prenosa podataka doseže 2.1 Mbit/s.

#### 4.1.6 BlueCore4-Ext

Ovaj čip ima implementiran bluetooth 2.0 + EDR. Na sebi ima 8 Mbit flash memorije i ima punu podršku za piconet. Uređaj također može služiti kao most za dvije piconet mreže čime nastaje scatternet.

### 4.2 Specifikacije

HC-05 na sebi ima BlueCore4 eksterni čip i na njemu se zasniva rad modula. Sa time dolazi i kompletna podrška za sve tehnologije koje čip podržava. Pored BlueCore4 mogućnosti, HC-05 podržava Adaptive Frequency Hopping čime se osigurava stabilnost komunikacije. Na sebi ima radio transiver koji radi na 2.4GHz. U mrežama se može ponašati kao master

i slave uređaj. S obzirom da je domet uređaja i do 10 metara, broj scenarija u kojem može biti koristan za komunikaciju je velik.

Potrebna struja	4V-6V
Jačina struje	30mA
Domet	do 10m
Brzina prenosa	do 3Mbps
Piconet uloge	Master, Slave, Master/Slave

Tabela 3: HC-05 specifikacije

Podržane brzine prenosa u bitovima po sekundi su: 9600,19200,38400,57600,115200,230400,460800[5].

Dužina	27 mm
VŠirina	12.7 mm

Tabela 4: HC-05 dimenzije

HC-05 također ima sposobnost pamćenja zadnjeg uvezanog uređaja, te automatsko povezivanje ukoliko isti bude pronađen pri paljenju.

Standard na kojem se zasniva bežična komunikacija je IEE 802.15.1<sup>4</sup>

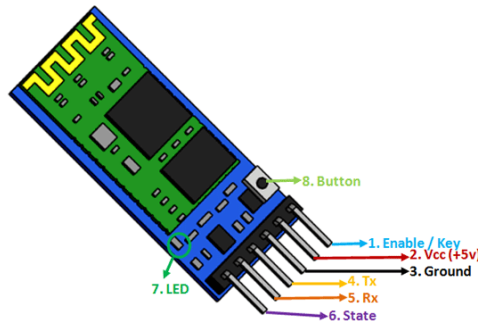
### 4.3 Pinovi

HC-05 ukupno ima 6 pinova.

- **GND** se spaja na uzemljenje
- **5 VCC** je pin pomoću kojeg se struja (5V) dovodi u modul
- **RX** prima bitove koji će biti poslani uređaju na koji je modul spojen
- **TX** je putanja kroz koju se vrši transmisija bitova koji su primljeni od strane uređaja
- **STATE** pin šalje podatke o trenutnom stanju uređaja (Upaljen, ugašen, konektovan, diskonektovan itd.)
- **ENALBE** pin isključuje uređaj kada je na njega upućena struja od 3.3V

---

<sup>4</sup><http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>



Slika 9: HC-05 Šema

```
void setup() {
    Serial.begin(9600); // Interna softverska serijska
    ↪ komunikacija
    Serial1.begin(38400); // Komunikacija sa HC-05
}

void loop() {
    if (Serial.available())
        Serial1.write(Serial.read());

    if (Serial1.available())
        Serial.write(Serial1.read());
}
```

Primjer koda 1: Serial Passthrough

## 4.4 AT komande

Kada pri paljenju modula, držimo dugme na njemu pritisnutim, na pin PIO11 spajamo struju. Ovo će uređaj pokrenuti u komandnom načinu rada. Kroz RX se sada neće prihvatati podaci koji će se slati kroz antenu, već komande koje će konfigurirati uređaj. Te komande se nazivaju AT komande.

Kako bi mogli poslati ove komande uređaju, moramo se povezati na njega. To možemo učiniti koristeći Arduino "Serial Passthrough" skicu.

Nakon što na Arduino pošaljemo ovu skicu, kroz Serial Monitor možemo slati komande direktno na HC-05.

AT	Test komanda
AT+RESET	Reset uređaja
AT+VERSION?	Firmware verzija
AT+ORGL	Vraćanje na fabričke postavke
AT+ADDR?	MAC Adresa uređaja
AT+NAME<Param>	Postavljanje imena uređaja
AT+NAME?	Ime uređaja
AT+RNAME?<Param>	Ime bluetooth uređaja na osnovu adrese
AT+ROLE=<Param>	0-Slave, 1-Master, 2-Slave-Loop
AT+PSWD=<Param>	Postavljanje lozinke
AT+PSWD?	Trenutna lozinka
AT+UART=<Param>,<Param2>,<Param3>	Postavlja baud rate, Stop bit i Parivost
AT+UART?	Baud rate, Stop bit i Parivost
AT+CMODE=<Param>	0-konekcija na fiksnu adresu 1-sve adrese
AT+CMODE?	Trenutni način rada
AT+BIND=<Param>	Postavlja fiksiranu adresu za konekciju
AT+BIND?	Trenutna fiksirana adresa za konekciju
AT+PMSAD=<Param>	Brisanje autentificiranog uređaja
AT+ RMAAD	Brisanje svih autentificiranih uređaja
AT+FSAD=<Param>	Pretraga autentificiranog uređaja
AT+ADCN?	Broj autentificiranih uređaja
AT+MRAD?	Posljednji autentificirani uređaj
AT+LINK=<Param>	Povezivanje s uređajem
AT+DISC	Prekid veze

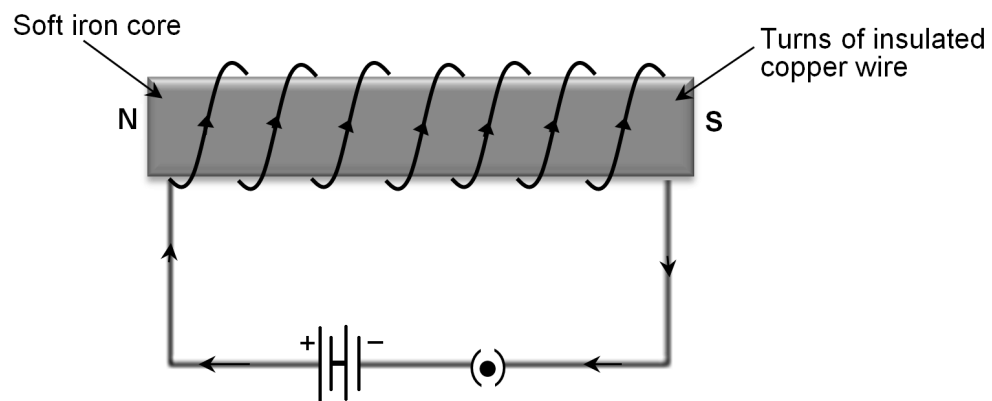
Tabela 5: Tabela AT komandi[5]

## 5 Koračni motori

Koračni motori su tip DC elektronskog motora bez četkica. Revoluciju dijele u jednake korake odakle i dolazi njihov naziv. Ovi motori zbog toga mogu biti precizno pomjereni i zadržani na željenoj poziciji bez enkodera pozicije.

### 5.1 Elektromagneti

Elektromagneti su tipovi magneta koji svoja magnetna svojstva pokazuju kada kroz njih teče električna struja. Jedno od svojstava protoka struje kroz provodnik je magnetno polje koje se stvara oko provodnika. Ovo svojstvo se može multiplicirati zavijanjem izoliranog provodnika u spiralu oko provodničkog jezgra. Za razliku od trajnih magneta, magnetna svojstva ovih uređaja mogu biti aktivirana po potrebi.



Slika 10: Elektromagnet

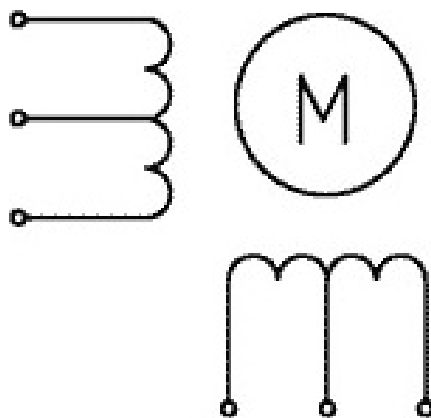
### 5.2 Proces rotacije osovine

Koračni motori su građeni iz okvira (koji čine elektromagneti) i jezgra - željeznog zupčanika koji je ujedno i trajni magnet. Ovi magneti su najčešće kontrolisani od strane mikrokontrolera ili upravljača koji nije dio samog motora. Do rotacije osovine motora dolazi puštanjem električne struje kroz jedan elektromagnet. Nakon što se povučen magnetnom silom zupčanik fiksira na poziciju, paljenjem drugog elektromagneta postiže se rotacija ose motora na željenu poziciju. Ova rotacija predstavlja koncept koraka gdje prirodni broj  $N$  koraka čini jednu revoluciju osovine motora.

### 5.3 Tipovi

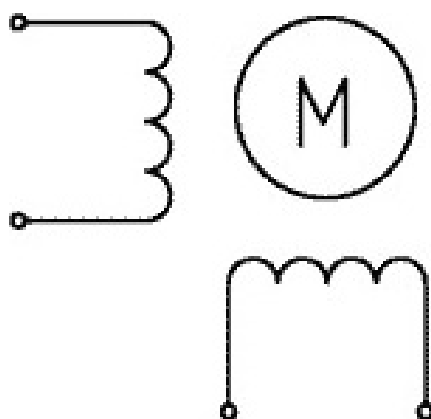
Postoje dva tipa koračnih motora:

**Uniopolarni** imaju elektromagnete sa središnjim izlazom (eng. center tap). To omogućava da promjenom kraja na kojem je uzemljenje elektromotora, samo polovina elektromagneta bude magnetizirana.



Slika 11: Šema unipolarnog motora

**Bipolarni** koračni motori imaju samo po jednu žicu na oba kraja elektrom od kojih je jedna spojena na uzemljenje, a druga na izvor struje. Ovo omogućava jače magnetno djelovanje, kao i kreiranje magnetnog polja u oba smijera na zajedničkom prostoru.



Slika 12: Šema bipolarnog motora

Prednost bipolarnih motora je veća vučna sila i jače magnetno polje, a kod unipolarnih su to manji troškovi zbog jednostavnije kontrole, kao i manji otpor[11].

## 5.4 Načini upravljanja

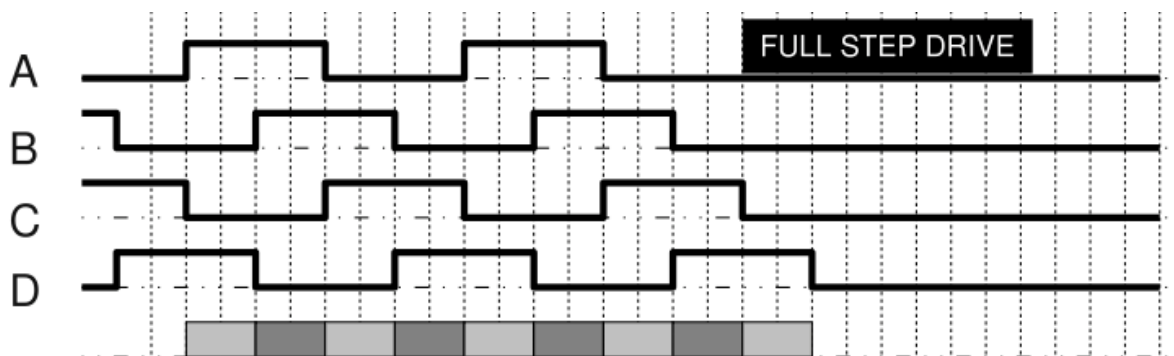
U praksi postoje 4 načina upravljanja koračnim motorima

**Valno upravljanje** je metoda gdje se u jednom trenutku šalje samo jedna faza. Ovo upravljanje se rijetko koristi jer ima jednak broj koraka kao upravljanje punim korakom, ali samo 50% njegove vučne sile. Ukoliko zupčanik ra rotoru ima 25 zuba, onda će se svaki taj zub pomjeriti pomoću 4 faze. To znači da će se sa 100 koraka napraviti jedna revolucija.



Slika 13: Valno upravljanje

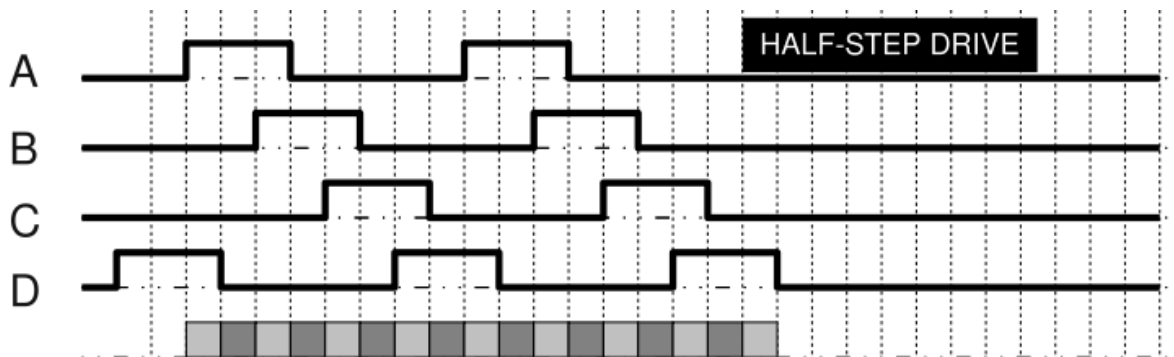
**Metoda punog koraka** je najčešće korištena metoda upravljanja. U svakom trenutku ima tačno dvije faze. Ovom metodom se izvlači maksimalna vučna sila motora, dok također ima 100 koraka po revoluciji.



Slika 14: Metoda punog koraka

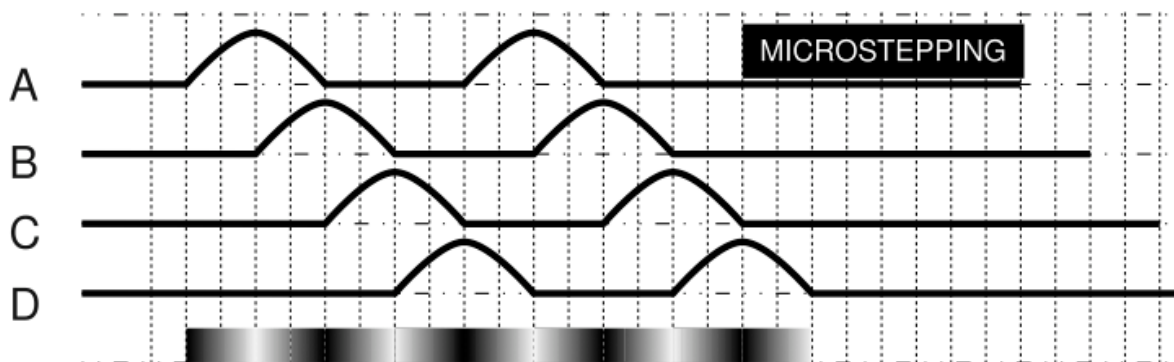


**Polukoračno** upravljanje se svodi na promjenu dvije faze za vrijeme jedne. Ovo motoru smanjuje vučnu silu, ali udvostručava rezoluciju. Kako je sada potrebno 8 faza kako bi se zupčanik pomjerio za jedan zub, jedna revolucija zahtjeva 200 koraka.



Slika 15: Polukoračno upravljanje

**Mikrokoračanje** je metoda u kojoj se sinusnom i kosinusnom funkcijom kreiraju faze. Ovo znatno smanjuje broj koraka u jednoj revoluciji, čime se povećava rezolucija samog motora. U ovim situacijama, ograničenje broja koraka u revoluciji postoji zbog statičkog trenja i zazora.



Slika 16: Mikrokoračanje

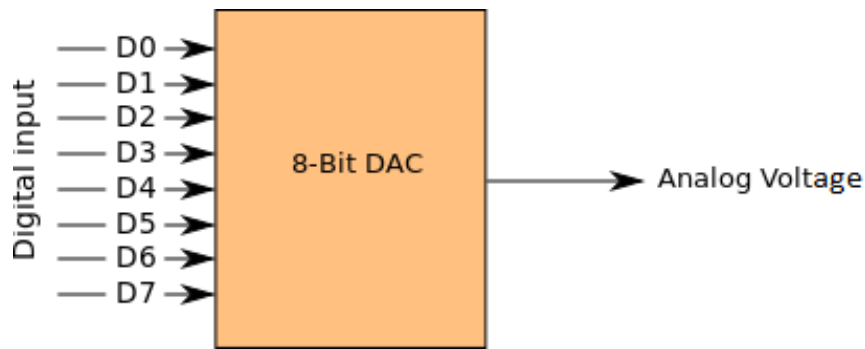
Kako bi se postigle veće brzine kretanja motora, potrebna je akceleracija koja će motor dovesti do pune brzine. U primjeni sam također zapazio da se deakceleracijom pri promjeni smjera postiže bolji rezultat kod promjene smjera kretanja.

## 6 A4988

Upravljač motora A4988 je namijenjen za upravljanje bipolarnim koračnim motorima[1]. Pomoću ovog uređaja, motoru možemo dostaviti i do 2A po namotaju. Međutim, za jačinu struje se ne moramo previše brinuti jer A4988 ima ugrađenu zaštitu od prekomjerne jačine struje (eng. overcurrent protection).

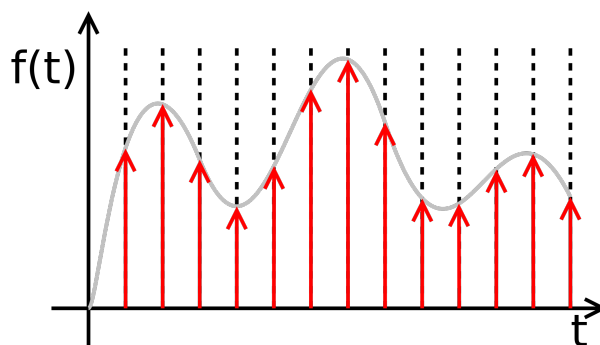
### 6.1 Digitalno-analogni konverter

U elektronici se dizajneri često susreću sa situacijom da je iz digitalnog potrebno dobiti analogni signal. Ovaj problem se rješava koristeći digitalno-analogne konvertere (eng. Digital-to-analog converter, DAC)[7].



Slika 17: 8-bitni DAC

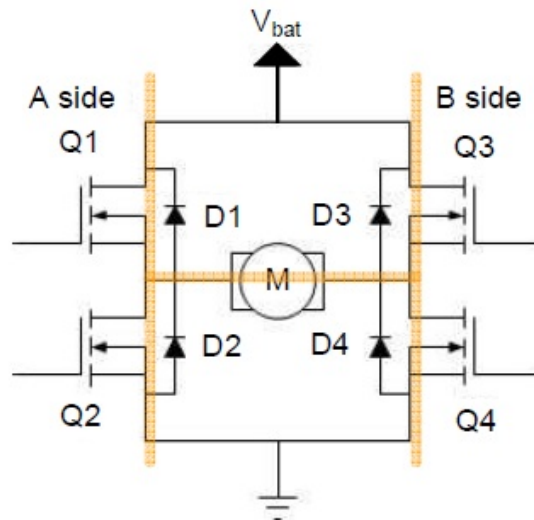
DAC funkcionise tako što konvertuje abstraktni broj konačne preciznosti u analogni signal čija je voltaža proporcionalna ulaznoj vrijednosti. Idealan DAC konvertuje abstraktni broj u niz impulsa, nakon čega se, koristi linearnu interpolaciju, popunjava signal između impulsa.



Slika 18: Primjer idealne konverzije iz digitalnog u analogni signal

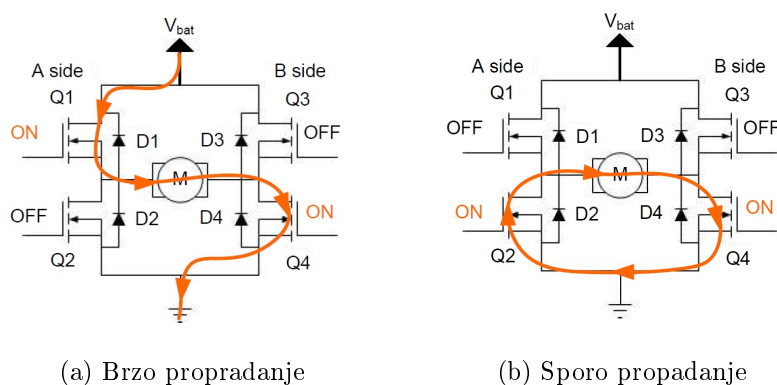
## 6.2 H-most

H-most je električno kolo čiji je zadatak kontrola toka struje. Najčešće se pojavljuju kao već integrisane komponente. H-most je građen iz četiri prekidača čijim se kombiniranjem u motoru mijenja tok struje.



Slika 19: H-most

H-most ima dva moda u kojima prekidači mogu biti postavljeni, a to su brzo i sporo propadanje (eng. decay). U ovom kontekstu, propadanje prestavlja brzinu kojom se jačina struje u navoju može spustiti na 0.



Slika 20: Modovi rada H-mosta

### 6.3 Miješano propadanje

U svakom koraku motora, protok struje se kontrolira koristeći vrijednost eksternih rezistora čija je uloga opažati ulazni protok struje, referentnu voltažu i izlaznu voltažu digitalno-analognog konvertera koja se kontroliše od strane translatora. Ukoliko je trenutni izlaz DAC-a u niži u odnosu na prošli, onda se mod aktivnog mosta postavlja na mod miješanog propadanja (jedno od svojstava A4988 čipa). Ukoliko je trenutni izlaz DAC-a viši, postavlja se na sporo propadanje. Ovo dinamično mijenjanje modova poboljšava performanse motora u vidu smanjenja distorzije talasa koji prenosi signal[1].

### 6.4 Pinovi

A4988 upravljač, na sebi ima 16 pinova:

**ENABLE** se koristi za privremeno isključenje uređaja. Kada se na njemu nalazi visoki nivo voltaže, uređaj neće primati naredbe.

**MS1, MS2, MS3** su pinovi koji određuju rezoluciju mikrokoračanja motora. Šablonskim potavljenjem visokog voltažnog nivoa, upravljač će način rada prebaciti na drugi mikrokoračni mod.

MS1	MS2	MS3	Rezolucija u veličini koraka
N	N	N	$\frac{1}{1}$
V	N	N	$\frac{1}{2}$
N	V	N	$\frac{1}{4}$
V	V	N	$\frac{1}{8}$
V	V	V	$\frac{1}{16}$

Tabela 6: Šabloni MS pinova[1]

**RESET** vraća translator na početno stanje. Dok je na njemu visoki nivo voltaže, svi ulazi se ignorišu.

**SLEEP** se koristi za uštedu energije i postavljaajući na njega visoki nivo voltaže, uređaj se stavlja u “sleep mode”.

**STEP** pin - slanjem impulsa voltaže visokog nivoa na ovaj pin ,a zatim vraćanjem istog na niski nivo voltaže, upravljač pravi jedan korak na motoru u smjeru zavisnom od stanja DIR pina i veličine zavisne od trenutne rezolucije.

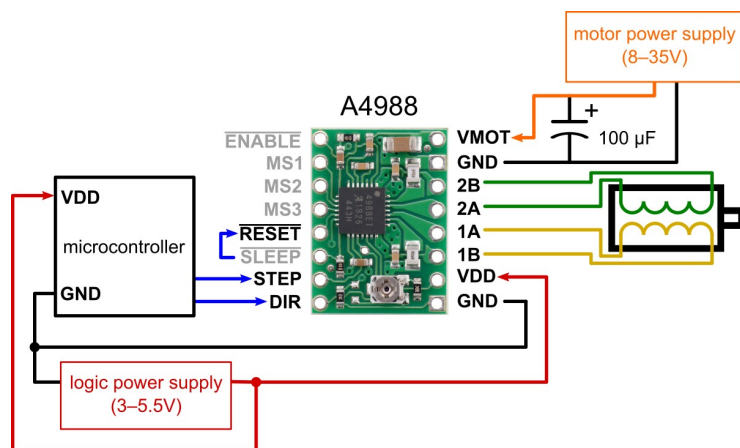
**DIR** služi za određivanje smjera u kojem će se osa motora okretati. Ovaj pin mora konstantno imati na sebe pušten nivo voltaže gdje visoki i niski određuju smjer.

**VMOT** je ulaz za struju kojom će se napajati motor. Voltaža ove struje treba biti između 8V i 35V.

**VDD** predstavlja zvor struje za upravljač.

**GND** - na upravljaču se nalaze 2 pina za uzemljenje, jedan za struju koja napaja sam uređaj, drugi za struju koja napaja motore.

**1A,1B,2A,2B** su pinovi koji se povezuju direktno na motor. Parovi za navoje su 2A i 2B, kao i 1A i 1B.



Slika 21: Najjednostavnija šema spajanja A9488

## 6.5 Specifikacije

Potrebna struja	3V-5V
Maksimalna jačina struje	2A
Termalno gašenje	-20°C, + 80°C
Dužina	do 20.3mm
Širina	do 15.2mm

Tabela 7: A4988 specifikacije

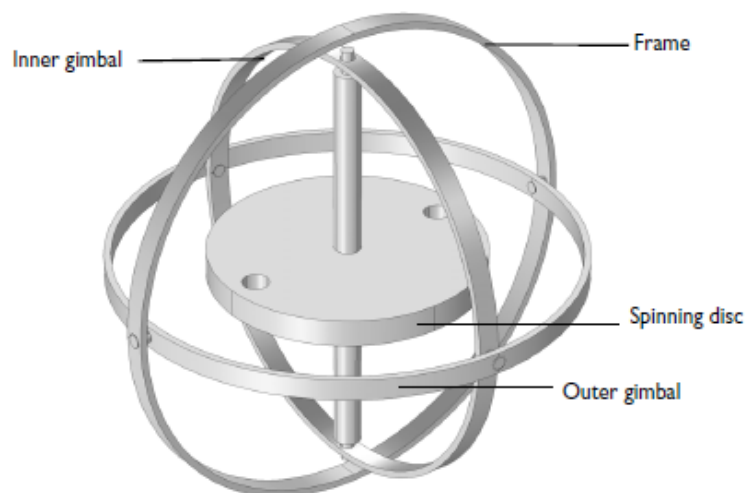
A4988 na sebi ima potencijometar kojim se može kontrolisati jačina struje koja prolazi kroz upravljač.

## 7 MPU6050

MPU6050 je uređaj koji služi za praćenje kretanja i orijentacije tijela na kojem se nalazi. Kombinacija žiroskopa i akcelerometra (koji imaju po 3 ose) sa Digital Motion Processor-om[8] daje vrlo precizne podatke o trenutnom položaju uređaja.

### 7.1 Žiroskop

Žiroskop je uređaj koji, koristeći zemljinu gravitaciju, određuje sopstvenu orijentaciju. Sastavljen je od diska koji se vrti (rotora) i osnove na kojoj se disk nalazi, na kojoj se također nalaze tri stacionarna prstena. Kada se orijentacija promijeni, zahvaljujući svojoj rotacionoj sili, rotor ostaje u istom orijentacionom odnosu sa zemljom, što omogućava očitavanje pomjeranja u odnosu na stacionarni dio uređaja oko žiroskopa.



Slika 22: Žiroskop

### 7.2 Akcelerometar

Akcelerometar je mjerni instrument pomoću kojeg se mjeri promjena u brzini kretanja tijela. Mjerenjem inercijske sile koja djeluje na referentnu masu u akcelerometru, prema drugom Newtonovom zakonu se može izračunati ubrzanje.

$$a = \frac{F}{m}$$

Zbog ovoga će akcelerometar koji je u mirnom stanju očitavati ubrzanje od  $9.81\text{m/s}^2$ , a akcelerometar koji pada  $0\text{m/s}^2$ .

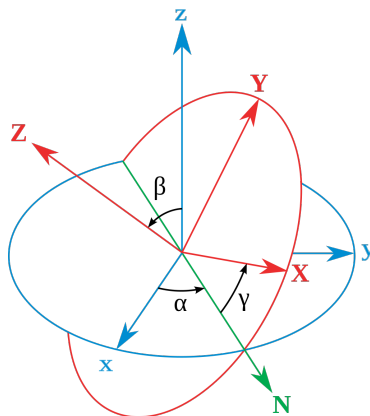
## 7.3 Digital Motion Processing

Digital Motion Processor (DMP) je interni procesor koji se nalazi na MPU6050. Nažalost, ovaj procesor je zatvorenog koda i nije dokumentovan. Zbog toga se u Arduino projektima koristi biblioteka “I2Cdevlib”<sup>5</sup> koja je nastala kao proces reverznog inženjeringa, biblioteke koja preuzima podatke iz DMP-a

### 7.3.1 Eulerovi uglovi

Eulerovi uglovi se koriste kako bi se predstavila orijentacija tijela u odnosu na fiksirani koordinatni sistem. Ovom metodom se utvrđuje rotacija tijela sa osama  $x, y, z$  u tijelo  $X, Y, Z$ . Prvo je potrebno odrediti N-osu koja se dobija vektorskim proizvodom  $N = Z \times Z$ . Zatim se definišu uglovi:

- $\alpha$  kao ugao između x-ose i N-ose
- $\beta$  kao ugao između z-ose i Z-ose
- $\gamma$  kao ugao između X-ose i N-ose



Slika 23: Primjer Eulerovih uglova na rotaciji  $x, y, z \rightarrow X, Y, Z$

**Problemi** koji se pojavljuju kod ovog pristupa rotaciji tijela su:

- Svaku orijentaciju nije moguće predstaviti koristeći samo jednu jednačinu.
- Tzv. “Gimbal lock” je problem koji nastaje kada ugao između bilo koje dvije ose postane  $0^\circ$  čime se gubi jedan stepen slobode koji rotacija ima.

<sup>5</sup><https://www.i2cdevlib.com/>

### 7.3.2 Kvaternioni

Kvaternioni su numerički sistem koji proširuje kompleksne brojeve. Sastavljeni su od imaginarnog i realnog dijela.

$$a + b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k}$$

U jednačini iznad,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  predstavljaju realne brojeve, dok su  $i$ ,  $j$  i  $k$  imaginarni.

Pravila koja vrijede za množenje imaginarnih dijelova su:

$$ij = k$$

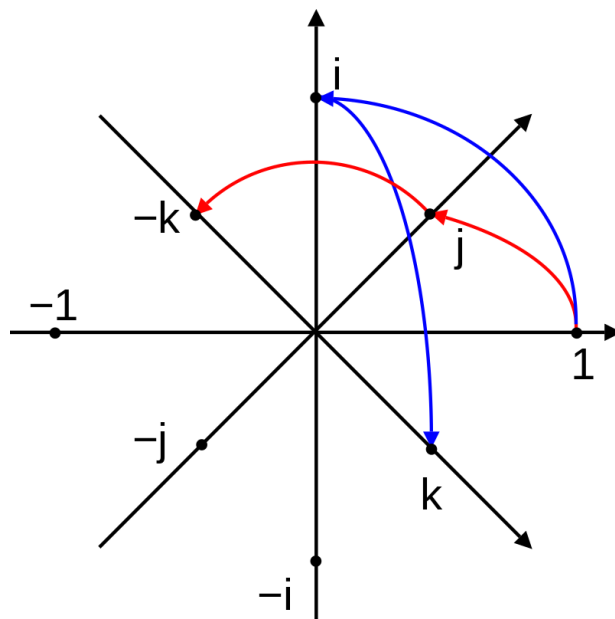
$$ji = -k$$

$$jk = i$$

$$kj = -i$$

$$ki = j$$

$$ji = -k$$



Slika 24: Grafički prikaz proizvoda imaginarnih dijelova  $i$  i  $j$

**Konjugacija** kvaterniona se vrši promjenom predznaka imaginarnom dijelu.



$$q = a + bi + cj + dk$$

$$q^* = a - bi - cj - dk$$

**Tenzor** kvaterniona se dobija formulom:

$$||q|| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

**Inverzija** kvaterniona se dobija formulom:

$$q^{-1} = \frac{q^*}{|q|^2}$$

**Rotacija** (njeno opisivanje) jeste najčešći vid upotrebe kvaterniona. Rotacija tačke p kvaternionom koji opisuje rotaciju q ,može se riješiti formulom:

$$p' = qpq^{-1}$$

Prednost ove rotacije u odnosu na Eulerovu ili matičnu je ta što imaginarni dio onemogućava gubljenje stepena slobode, kao i to što svaka rotacija može biti opisana jednim kvaternionom rotacije.

## 7.4 I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C je serijski komunikacijski protokol zasnovan na master/slave modelu. U ovom modelu, jedan ili više master uređaja mogu kontrolisati jedan ili više slave uređaja. Podaci se prenose kroz dvije putanje:

- SDA (Serial Data) - kroz ovu putanju se šalju komunikacijski paketi
- SCL (Serial Clock) - putanja koja prenosi signal sata

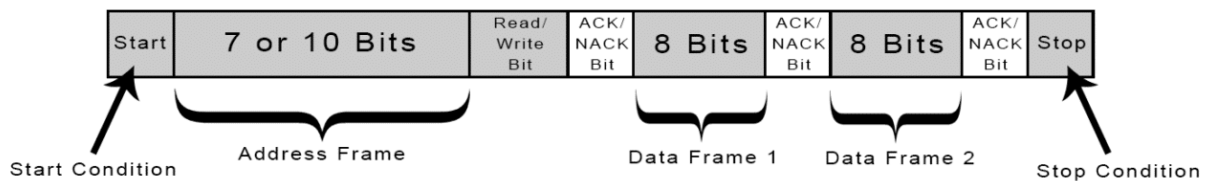
Podaci se kroz SDA prenose bit po bit te su sinkronizirani sa SCL signalima, kontrolisanim od strane master uređaja. Maksimalan broj slave uređaja za jedan master uređaj je 1008, dok je u obrnutoj direkciji maksimalan broj teoretski beskonačan.

### 7.4.1 Paketi

Komunikacija ovog protokola se zasniva na slanju paketa. Veličina mu nije fiksna, već se dinamički, pomoću početnog i stop signala, određuju početak i kraj mrežnog paketa. Konstrukciju jednog paketa čini 9 okvirova(6 tipova okvira):

- Početni signal - na SDA putanji se prebacuje sa visoke voltažne vrijednosti na nisku, prije nego što se na SCL učini isto.
- Adresni okvir - identificira slave uređaj sa kojim master želi komunicirati (7-10 bita)
- Bit primanja ili slanja - visoka voltažna vrijednost označava da master uređaj od ovog trenutka šalje podatke odabranom slave uređaju, dok niska označava da će početi proces primanja podataka.(1 bit)
- ACK/NACK - nakon svakog okvira se šalje ACK poruka sa informacijom pošiljaocu o tome da li je njegova poruka uspješno primljena(1 bit)
- Okvir sa podacima (8 bit)
- Stop signal - proces obrnut početnom uslovu gdje se prebacuje na visoku voltažnu vrijednost

**Okvir sa podacima** se šalje nakon što master uređaj dobije pozitivan ACK frame od slave uređaja. Nakon svakog poslanog podatkovnog okvira, trenutačno se prema master uređaju šalje ACK/NACK okvir od strane slave uređaja čija se adresa nalazi u adresnom okviru.



Slika 25: Primjer I<sup>2</sup>C paketa

Brzina ove komunikacije može biti između 100kbps i 5Mbps[6].

Najveća mana ovog protokola je ograničenje okvirnog podatka na 8 bita.

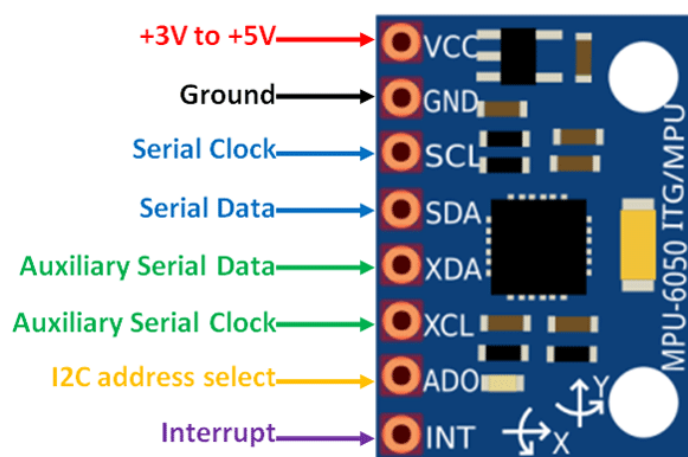
Potrebna struja	3V-5V
Komunikacijski protokol	I <sup>2</sup> C
Dužina	21.2mm
Širina	do 16.4mm

Tabela 8: MPU6050 specifikacije

## 7.5 Specifikacije

### 7.5.1 Pinovi

- VCC - ulaz za struju
- GND - uzemljenje
- SCL - serijski sat
- SDA - serijska putanja podataka
- XCL - pomoćni sat, koristi se za konekciju na serijski sat drugih I<sup>2</sup>C uređaja
- XDA - pomoćna putanja podataka, koristi se za konekciju na serijsku putanju podataka drugih I<sup>2</sup>C uređaja
- AD0 - slave adresa uređaja, ovaj pin određuje multi bit 7 bit-ne adrese i, kada je na njemu visoki stepen voltaže, mijenja adresu uređaja postavivši multi bit na 1
- INT - digitalni pin koji se koristi za prekide.



Slika 26: Raspored pinova na MPU6050

## 7.6 I2Cdevlib

I2Cdevlib je biblioteka napisana u C++ programskom jeziku koja olakšava korištenje MPU6050 u Arduino projektima. Neke od funkcija koje ova biblioteka nudi su:

**Initialize()** postavlja čip u stanje koje je spremno za očitavanje. Ova funkcija postavlja brzinu sata na SCL-u.

**dmpInitialize()** vrši manipulaciju registara kojom se dmp čip stavlja u funkciju kao i inicijalizacija FIFO buffera, koji čuva podatke prije nego što budu poslani kroz SDA.

**Set[X | Y | Z][Gyro | Accel]Offset()** postavlja pomak orijentacije uređaja nastalih zbog grešaka u proizvodnji i nesavršene pozicije uređaja na tijelu.

**Calibrate[Gyro | Accel]Offset(n)** vrši kalibraciju žiroskopa i akcelerometra tako da trenutna pozicija bude nulta za oboje. Broj n predstavlja koliko puta će se ponoviti kalibracija prije uzimanja srednje vrijednosti.

**getIntStatus()** vraća informaciju o tome da li trenutno postoji signal za prekid koji je došao od MPU6050 uređaja.

**dmpGetFIFOPacketSize()** vraća veličinu paketa koja se nalazi u FIFO bufferu.

**getFIFOCount()** vraća broj bita koji se nalazi u FIFO bufferu.

**getFIFOBytes(packet, size)** upisuje size veličinu paketa iz FIFO buffera u packet varijablu.

**dmpGetQuaternion(&q, packet)** pretvara podatke iz paketa packet u kvaternion rotacije i pohranjuje ih u objekt tipa quaternion q.

**mpu.dmpGetEuler(euler, &q)** vrši konverziju kvaterniona rotacije q u Eulerove uglove koje pohranjuje u niz od 3 float varijable  $euler(\alpha, \beta, \gamma)$ .

## 8 PID kontroler

PID kontroler je kontrolna petlja čiji zadatak je da primijeni preciznu i vremenski prihvatljivu korekciju kontrolnoj funkciji. To postiže računajući vrijednost greške kao razliku ulazne i ciljane vrijednosti, uzevši u obzir proporcionalni, integralni i derivativni dio.

Ukoliko iz jednačine izostavimo neki od dijelova PID-a, onda tu jednačinu oslovljavamo nazivom koji u sebi također ne sadrži taj dio.

Ako su  $e$ ,  $r$  i  $y$ , greška, ciljane vrijednost i ulazna vrijednost, respektivno, onda vrijedi da je:

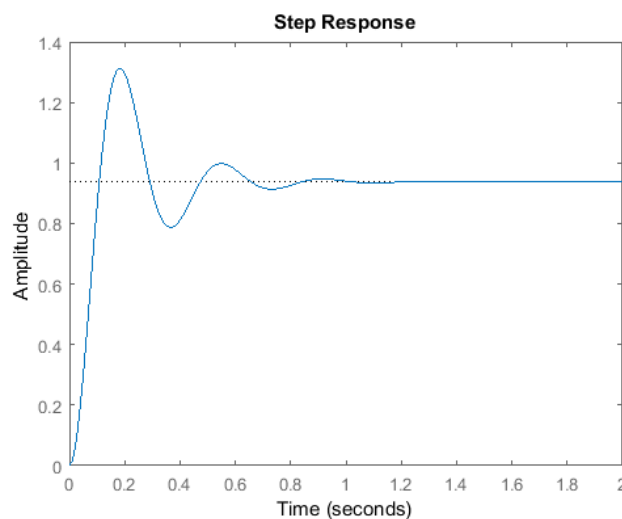
$$e(t) = r(t) - y(t)$$

### 8.1 Proporcionalni dio

Proporcionalni dio PID kontrolera ima sopstvenu izlaznu vrijednost u uzajamnom odnosu sa greškom. To znači da će se u P kontroleru, primjenjujući izlaznu vrijednost na pokretač, greška proporcionalno smanjivati. Kada se greška smanji na 0, tada će i izlaz biti 0.

$$P = K_p * e(t)$$

Ovaj dio, u teoriji zvuči korisnije nego što jeste, zbog toga što, u stvarnom svijetu, nije optimalno prestati sa primijenjivanjem ispravljačke sile u trenutku kada je ona 0 (npr. tijelo koje ima inerciju, grijač koji nastavlja grijati i kad se ugasi).



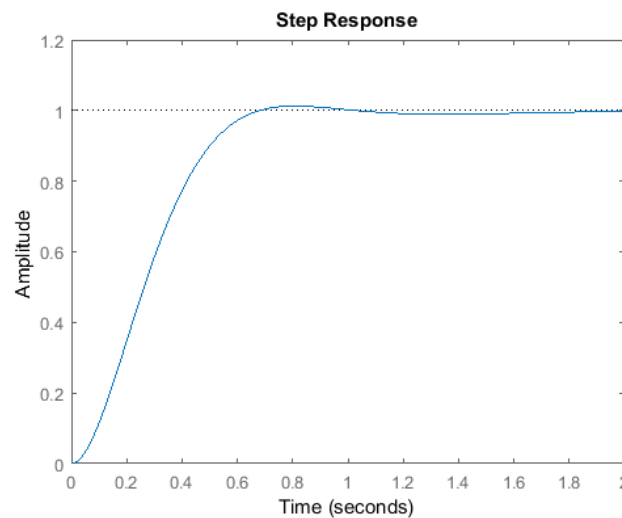
Slika 27: Graf P kontrolera

## 8.2 Integralni dio

Integralni dio akumulira grešku kroz vrijeme i ima sporiju reakciju od proporcionalnog dijela. Zadatak ovog dijela kontrolera je da eliminiše preostalu grešku i smanji prelijetanje (eng. overshooting).

$$I = K_i * \int_0^t e(t') dt'$$

Kada se greška smanjuje, usporava se rast integranlog dijela. Ovo rezultuje približavanjem proporcionalnog dijela nuli što se kompenzuje greškom akumuliranom u integralnom dijelu.



Slika 28: Graf PI kontrolera

## 8.3 Derivativni dio

Derivativni dio za zadatak ima da predvidi trend smanjenja greške u idućem koraku koristeći razliku između trenutne i dosadašnje greške. Mjereći koliko brzo se greška u procesu mijenja, nastoji istu eliminisati.

$$D = K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

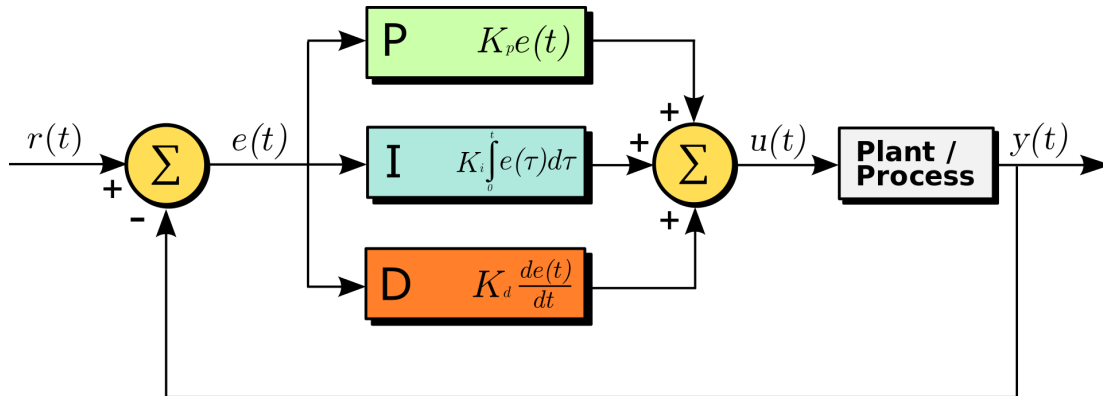
Uređaji koji generišu ulaz za PID često imaju šum. Derivativni dio također kao svoj zadatak ima da eliminiše grešku koja nastaje ovim šumom. Pomoću derivativnog dijela, nastaje tzv. prigušenje koje onemogućuje prelijetanje.

## 8.4 PID

Kombinujući sva tri dijela koja su dosad opisana, dobija se PID jednačina:

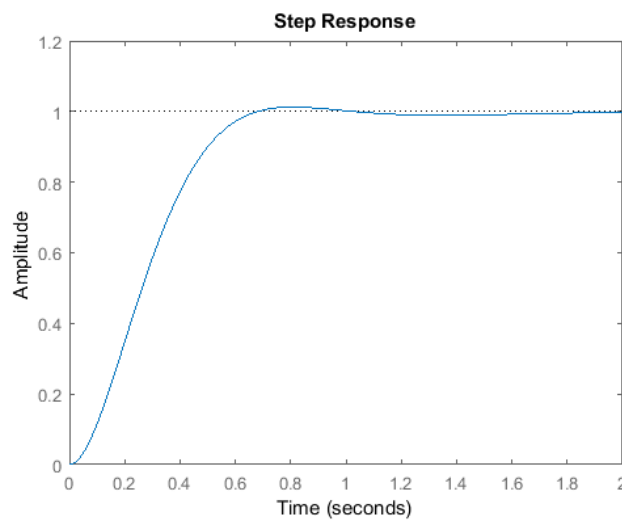
$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t') dt' + K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

$K_p, K_i$  i  $K_d$  se koriste kako bi se pojačao ili smanjio efekt koji proporcionalni, integralni i derivativni dio imaju na izlaz jednačine.



Slika 29: Petlja sa PID kontrolerom

Greška u stanju mirovanja je greška koja nastaje proporcionalnim dijelom jednačine. Ona predstavlja osciliranje oko ciljane vrijednosti koje nastaje kao posljedica konstantnog proporcionalnog dijela koji će premašivati potrebnu vrijednost izlaza. Ovaj problem rješava integralni dio koji preuzima kontrolisanje izlaza sa smanjenjem greške.

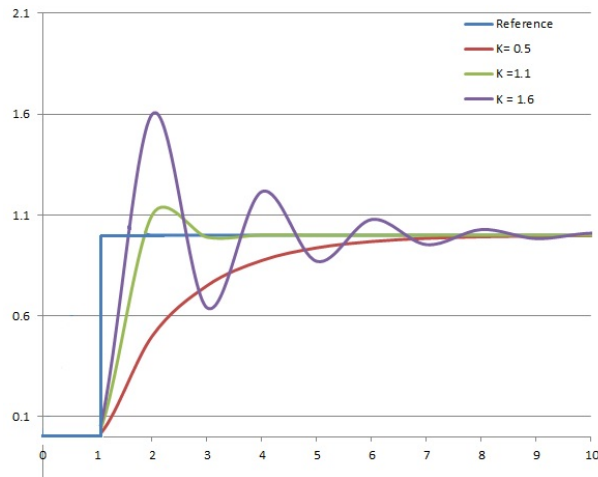


Slika 30: Graf PID kontrolera

## 8.5 Podešavanje parametara

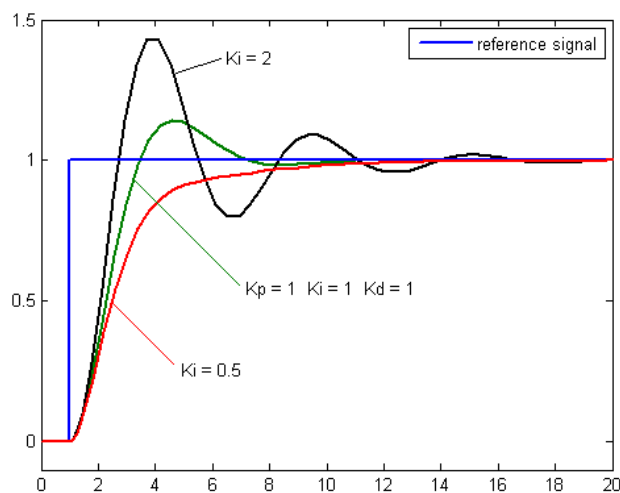
Jedan od najvećih problema sa kojim se dizajneri PID kontrolera susreću jeste podešavanje parametara.

Ručno podešavanje parametara je metoda koja se započinje tako što se  $K_i$  i  $K_d$  inicijalno postave na 0. Nakon toga,  $K_p$  je potrebno povećavati sve dok petlja ne počne oscilirati. Vrijednost  $K_p$  bi trebala biti podešena na jednu polovinu vrijednosti[10].



Slika 31: efekt  $K_p$  parametra na izlaz

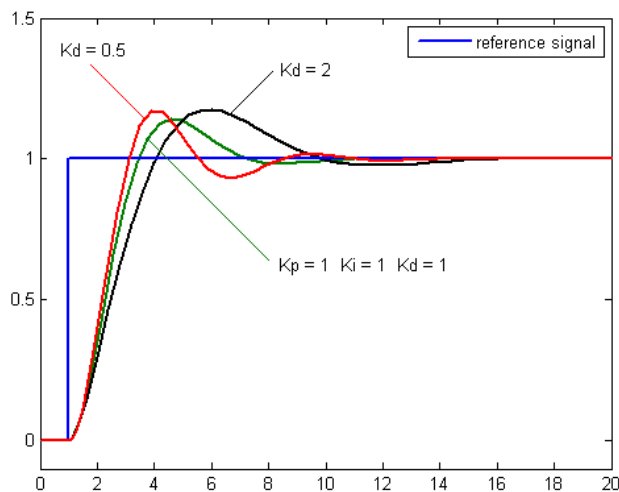
Kada je vrijednost  $K_p$  postavljena, prelazi se na podešavanje  $K_i$  parametra. Potrebno je parametar povećavati sve dok se svaki pomak ne može korektovati u najmanjem vremenu neophodno kako bi sistem nastavio raditi. Previše  $K_i$  vrijednosti dovodi sistem u nestabilno stanje[10].



Slika 32: efekt  $K_i$  parametra na izlaz



Ukoliko je potrebno,  $K_d$  treba povećavati dok se vrijeme osciliranja ne smanji na minimum. Brzi sistemi obično imaju podešen ovaj parametar tako da dolazi do malog prelijetanja kako bi se sistem prije doveo u stanje balansa. Neki sistemi nemaju toleranciju na prelijetanje pa se ova metoda ne može primijeniti[10].



Slika 33: efekt  $K_d$  parametra na izlaz

## 8.6 Modifikacije

### 8.6.1 Integralni zamah

Integralni zamah (eng. Integral windup) je problem koji nastaje kada pokretač nije u stanju pružiti silu koja mu je zadana izlaznom vrijednošću. Kod ovih slučajeva, integralni dio akumulira grešku što dovodi do prelijetanja. Postoji nekoliko načina da se riješi ovaj problem:

- Isključivanje integralnog dijela sve dok ulazna vrijednost nije u parametrima koji se mogu kontrolisati
- Limitiranje maksimalne vrijednosti integralnog dijela
- Preračunavanje integralnog dijela kako bi ostao u prethodno određenim granicama

### 8.6.2 Deadband

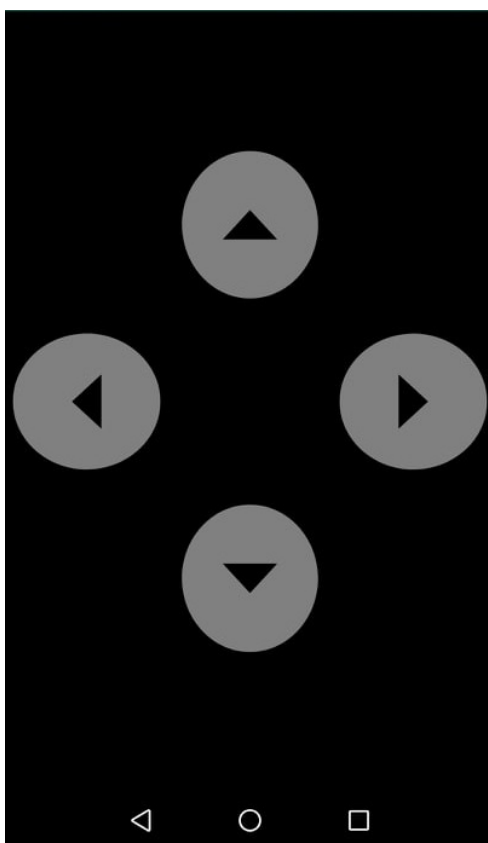
Modifikacija PID kontrolera koja se naziva deadband znači određivanje zone PID izlaza za koji se isti pretvara u nulu. Ovo se koristi kod sistema koji ne trebaju da reaguju na jako male promjene, tj. kada u sistemu dolazi do kvarova nastalih trenjem.

## 9 Android aplikacija

U ovom dijelu će biti opisana Android aplikacija, koja je dio samog projekta samobalansirajućeg robota.

### 9.1 Dizajn

Pošto će se robot moći kretati u 2 smjera i rotirati također u 2 smjera, mobilnu aplikaciju će činiti 4 dugmeta smještena na sredini ekrana.



Slika 34: Dizajn mobilne aplikacije u Adobe XD

Dugmići inicijalno imaju postavljenu providnost na 50%, a vidljivi su 100% samo dok su pritisnuti.

#### 9.1.1 GridLayout

Kako bi dizajn bio responsivan i proporcije ostale jednake na većim i manjim ekranima korišten je GridLayout. Kada se širina layout-a postavi na `match_parent`, mreža će zauzeti širinu uređaja. U ovom slučaju nam je potrebno 3 kolone i 3 reda

Kolona 0, Red 0	Kolona 1, Red 0	Kolona 2, Red 0
Kolona 0, Red 1	Kolona 1, Red 1	Kolona 2, Red 1
Kolona 0, Red 2	Kolona 1, Red 2	Kolona 2, Red 2

Tabela 9: Izgled 3x3 GridLayout-a

```
<GridLayout
    android:layout_width="match_parent"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:columnCount="3"
    android:rowCount="3">
    <!-- Sadržaj GridLayout-a -->
</GridLayout>
```

Primjer koda 2: GridLayout

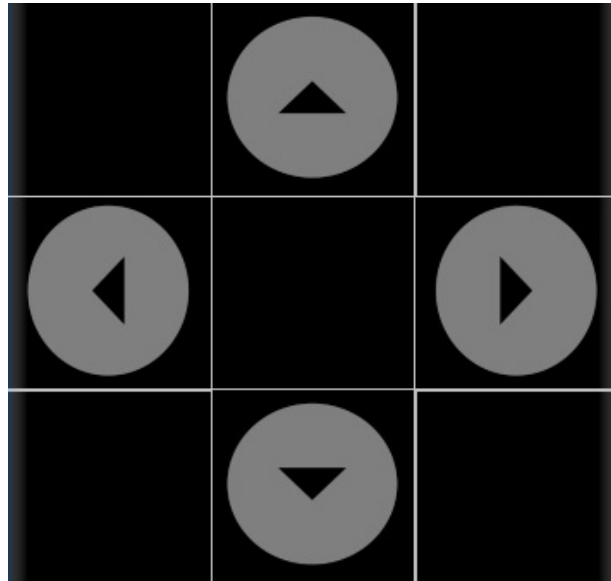
### 9.1.2 ImageButton

ImageButton je zapravo obično dugme kojeg umjesto okvira i teksta u njemu vizuelno predstavlja slika. Kako bih napravio dizajnirani izgled, u odgovarajuće kolone i redove sam postavio ImageButton-e koji će služiti kao dugmad za upravljanje robotom.

Stil za ImageButton je definisan u `style.xml` datoteci. Rotacija slike se može postići postavljanjem atributa `rotation` iz imenskog prostora "android". Transparentnost se postavlja atributom `alpha`, također iz imenskog prostora "android". "Res/drawable" je putanja direktorija u kojem se nalaze datoteke slika koje se zatim mogu referencirati iz xml datoteke i postaviti kao zadana pozadina ImageButtona koreisteći se `background` atributom. Atribut `gravity` postavlja dugme u središte ćelije GridLayout-a.

```
<ImageButton
    android:id="@+id/Right"
    android:layout_row="1"
    android:layout_column="2"
    android:rotation="-90"
    style="@style/DirectionButton"/>
```

Primjer koda 3: ImageButton za dugme "Desno"



Slika 35: ImageButton-i unutar GridLayout-a

```
<style name="DirectionButton"
    ↪ parent="Widget.AppCompat.ImageButton">
    <item name="android:textColor">#00FF00</item>
    <item name="android:background">
        ↪ @drawable/ic_arrow_drop_down_circle_black_24dp</item>
    <item name="android:alpha">0.5</item>
    <item name="android:layout_width">0dp</item>
    <item name="android:layout_columnWeight">1</item>
    <item name="android:gravity">center</item>
</style>
```

Primjer koda 4: Still ImageButton-a

## 9.2 Kod

Pri programiranju Android aplikacija programski kod se može pisati u Java ili Kotlin programskom jeziku. Ja sam za izradu ove aplikacije odlučio koristiti Java jezik.

### 9.2.1 Bluetooth servis

S obzirom na to da će aplikacija sa robotom komunicirati putem bluetooth veze, potrebno je prvo uspostaviti konekciju, a zatim slati podatke putem iste. Kako bi se koristio bluetooth adapter uređaja, potrebno je u AndroidManifest.xml datoteci dodati opciju za zahtjevanje permisija pri prvom pokretanju aplikacije.

```
<uses-feature android:name="android.hardware.bluetooth" />
<uses-permission android:name="android.permission.BLUETOOTH" />
<uses-permission
    → android:name="android.permission.BLUETOOTH_ADMIN" />
<uses-permission
    → android:name="android.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION" />
<uses-permission
    → android:name="android.permission.ACCESS_FINE_LOCATION"/>
```

Primjer koda 5: Zahtjevanje permisija za korištenje bluetooth-a

**BluetoothAdapter** je objekat koji se nalazi u statičkoj memoriji. U kodu ga je moguće dobiti koristeći `BluetoothAdapter.getDefaultAdapter()`. Adapter posjeduje funkciju `enable` koja će na uređaju upaliti bluetooth ukoliko već nije upaljen.

**BluetoothDevice** je tip objekta koji sadrži informacije o uređaju sa kojim želimo komunicirati. Objekat uređaja možemo dobiti iz `BluetoothAdapter`-a na osnovu njegove MAC adrese koristeći `getRemote` funkciju.

**BluetoothSocket** je objekat koji predstavlja konekciju sa drugim uređajem. Pozivajući funkciju `createInsecureRfcommSocketToServiceRecord` nad objektom uređaja kao rezultat ćemo dobiti `BluetoothSocket` objekat, nakon čega je potrebno pozvati `connect` funkciju na socket objektom kako bi se veza između uređaja mogla uspostaviti. Svaki socket ima dva stream-a podataka: input i output stream. Iz input streama je moguće čitati podatke koji dolaze na adapter, dok se u output stream upisuju podaci koje želimo poslati povezanom uređaju.

**ConnectionThread** je klasa koju sam napravio kako bih razdvojio bluetooth funkcionalnosti od UI thread-a. Kako bih ovo uradio, bilo je potrebno da `ConnectionThread` klasa naslijedi `Thread` roditeljsku klasu. Ova klasa kao parametar u konstruktoru prima `BluetoothSocket` čiji `outputstream` onda smješta u svoju privatnu varijablu. Funkcija kojom se šalju podaci (`write`) na osnovu `String` inputa generiše niz byte-ova i koristeći `write` nad socket objektom poruku šalje povezanom uređaju.

### 9.2.2 MainActivity

Aktivnost koja se pokreće pri praljenju aplikacije se naziva "MainActivity". Obzirom da je Java objekto orijentiran programski jezik, aktivnost je javna klasa koja nasljeđuje

```

private char _currentSignal;
private BluetoothService _bluetoothService;

public void SendSignal (char Direction){
    if(_currentSignal==Direction)
        return;

    _bluetoothService.Send(Character.toString((Direction)));
    _currentSignal = Direction;
}

```

Primjer koda 6: SendSignal funkcija u MainActivity klasi

"AppCompatActivity" klasu.

**onCreate** je funkcija za koju se očekuje da će biti override-ana od strane programera. Ona se poziva svaki put kada se aktivnost kreira. Prvo što se treba uraditi unutar onCreate funkcije jeste odabir layout-a koji koristi ova aktivnost pomoću setContentView funkcije.

**findViewById(id)** je funkcija koja vraća view objekat na osnovu njegovog id-a koji je postavljen unutar xml datoteke.

**Eventi** su objekti koji nastaju kada se desi promjena na korisničkom sučelju. Eventima se mogu dodijeliti funkcije koje će se izvršiti u trenutku kada se event dogodi. Ovi tipovi objekata se najčešće koriste zajedno sa eventListener objektima kojima se odabranim elementima korisničkog sučelja, pridodaju pojedini eventi. Kada se aktivira listener, unutar funkcije se može pristupiti dva objekta, view sa kojim je izvršena interakcija, i tip eventa koji se dogodio. **setOnTouchListener** kao tip eventa može imati **MotionEvent.ACTION\_UP**, što označava da dugme više nije u pritisnutom stanju.

```

List<ImageButton> Buttons = new ArrayList<>();
Buttons.add((ImageButton) findViewById(R.id.Left));
Buttons.add((ImageButton) findViewById(R.id.Up));
Buttons.add((ImageButton) findViewById(R.id.Down));
Buttons.add((ImageButton) findViewById(R.id.Right));

for (ImageButton button : Buttons)
button.setOnTouchListener(new View.OnTouchListener() {
    @Override
    public boolean onTouch(View v, MotionEvent event) {

        //Dobavljanje objekta koji je pozvao akciju
        ImageButton imgBtn = (ImageButton) v;
        //Stavljanje vidljivosti buttona na 100%
        imgBtn.setAlpha((float) 1.0);

        //Dobavljanje id stringa buttona
        String id =
            ↪ getResources().getResourceName(v.getId());
        int idLocation = id.indexOf('/');
        id = id.substring(idLocation + 1, idLocation + 2);

        //Slanje signala pomoću bluetootha
        SendSignal(id.charAt(0));

        //Da li je dugme prestalo biti pritisnut?
        if(event.getAction() == MotionEvent.ACTION_UP) {
            //Varćanje vidljivosti na 50%
            imgBtn.setAlpha((float) 0.5);
            //Slanje signala za zaustavljanje
            SendSignal('S');

        } return true;}});

```

Primjer koda 7: Dodjeljivanje event objekata ImageButtonima

## 10 Robot

Upoznavši se sa tehnologijama, komponentama, detaljnim opisom uređaja i PID kontrolerom u dosadašnjem dijelu rada, imamo sve informacije o potrebama za pravljenje samobalansirajućeg robota.

### 10.1 Konstrukcija

Konstrukciju robota čine 3 pločice pleksiglasa koje su namontirane na 4 navojne šike. Ispod same konstrukcije se nalaze 2 koračna motora sa točkovima. Pločice su raspoređene u spratove. Na prvome se nalazi matador ploča sa komponentama, na drugom Arduino Mega kontroler i na trećem spratu se ne nalazi ništa, već je njegova svrha dodati visinu samom robotu.

#### 10.1.1 Navojne šipke

Navojne šipke su podrška čitavog robota. Četiri šipke dužine po 21cm daju robotu visinu koja ga dovodi u stanje disbalansa. Debljina svake šipke iznosi 4mm. U dužini šipke može postojati greška jer su rezane ručno.



Slika 36: Navojna šipka

#### 10.1.2 Pleksiglas

Pločice pleksiglasa na gornja dva sprata robota su debljine 3mm, dok je na prvom spratu debljina pločice 5mm kako bi mogla podnijeti težinu motora i točkova. Sve tri pločice imaju četiri rupe širine 4mm na svojim krajevima sa namjenom da se kroz njih provuku navojne šipke. Ono što ploče drži u mjestu i onemogućava im klizanje niz navojne šipke,



(osim samog trenja) su matice postavljene ispod i iznad svake rupe u pločici (ukupno 24 matice). Pored toga, na pločici koja se nalazi na prvom spratu su također zabušene rupe veličine 4mm kroz koje su na pločicu pričvršćeni L-profil koji sa svoje druge strane imaju pričvršćene koračne motore. Srednji sprat na sebi ima zabušene četiri rupe veličine 3mm kroz koje su provučeni šrafovi čiji je zadatak da drže Arduino MEGA pločicu pričvršćenom na mjestu.



Slika 37: Nacrt pleksiglas pločica sa rupama za navojne šipke

### 10.1.3 Točkovi

Točkovi koji se nalaze na koračnim motorima su plastični. Težina jednog točka je oko 103g, a prečnik iznosi 144mm. Širina točka iznosi 45mm. Točkovi nisu savršeno proporcionalni, jer im svrha nije kontrolisati delikatnog robota, već se radi o pomoćnim točkovima za dječiji bicikl. Na motore su fiksirani koristeći dvokomponentno ljepilo. Svojim prečnikom, robotu daju dodatnih 75mm visine, što ga dovodi na ukupnih 28.5cm. Početno sam pokušao koristiti druge točkove, prečnika 7cm i težine 150g, ali zbog njihove težine motor nije mogao da se okreće na većim brzinama.

## 10.2 Komponente

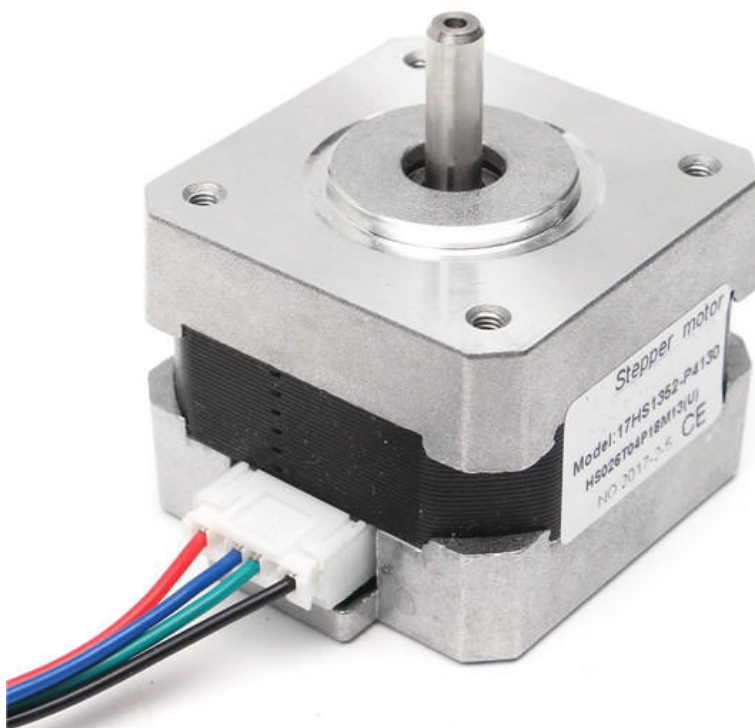
### 10.2.1 HC-05

Za ostvarivanje veze sa android aplikacijom korišten je HC-05 bluetooth modul (sekcija 4). Pomoću AT komandi (sekcija 4.4), ime modula je postavljeno na "RobotBT" a lozinka na 1511. Također sam koristeći AT komande saznao MAC adresu modula te je unio kao predefinisane vrijednosti u procesu dobavljanja BluetoothDevice objekta u Android

aplikaciji (sekcija 9.2.1). Pošto je na modulu uključena opcija automatskog konektovanja na posljednji uređaj, dok lozinka osigurava da je uređaj koji je zadnji povezan Android sa aplikacijom za upravljanje, pri paljenju robota se Android aplikacija i HC-05 povezuju automatski. Brzina prenosa podataka je 9600 bitova po sekundi. HC-05 je spojen na RX1 i TX1 pinove (sekcija 3.7).

### 10.2.2 Koračni motori

Koračni motori koje sam izabrao za ovaj projekt su Nema 17 motori. Dimenzije ovih motora su 43.18mm x 43.18mm (to je 1.7 inch, odakle i potiče broj 17 u njiovom nazivu). Težina jednog motora je oko 250g. Na poledini imaju 4 šarafa od kojih su 2 iskorištena kako bi se pričvrstili L-profil.



Slika 38: Nema 17 koračni motor

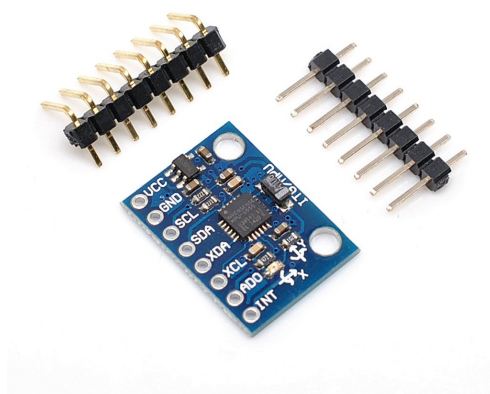
### 10.2.3 A4988

Za projekt su korištena dva A4988 upravljača(sekcija 6). U ovom slučaju nije bilo moguće koristiti samo jedan pošto postoje situacije kada oba točka ne rade istom brzinom ili u istom smjeru. Upravljač je postavljen da radi u  $\frac{1}{16}$  koračnom modu(sekcija 6.4) tako

što je na MS1, MS2 i MS3 puštena voltaža visokog nivoa. Pinovi na Arduino na koje su spojeni DIR i STEP (sekcija 6.4) pinovi su 51, 52, 53 i 54 digitalni pinovi (sekcija 3.7).

### 10.3 MPU6050

Kako bi robot znao svoju trenutnu orijentaciju u odnosu na zemlju ugrađen mu je MPU6050 (sekcija 7). Kako bi se MPU6050 mogao povezati na matador ploču potrebno mu je prethodno zalemiti pinove, jer u paketu dođe sa 2 vrste pinova.



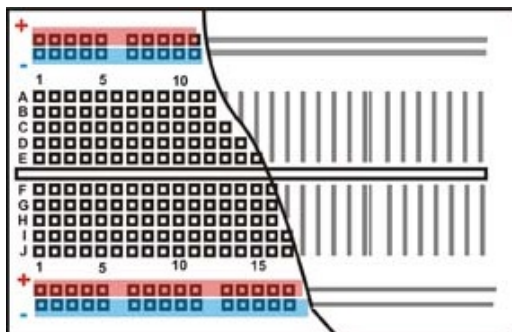
Slika 39: Vrste pinova koje dođu uz MPU6050

Pinovi SDA i SCL (sekcija 7.5.1) su spojeni na Arduino SDA i SCL (sekcija 3.7) pinove koji podržavaju  $I^2C$  protokol (sekcija 7.3.2). INT pin je spojen na Arduino pin 2 koji također podržava signale prekida.

### 10.4 Matador ploča

Matador ploča se koristi kao baza za prototip u elektronici. Razlog zbog kojeg se matador ploče koriste jeste taj da se pomoću nje elektroničke komponente mogu povezati bez ikakvog lemljenja. Ploča se sastoji iz terminala koji se nalaze u sredini i sabirnica koje se nalaze na vanjskim dijelovima ploče. Terminali se koriste za ožičenje komponenti, dok se sabirnice koriste za dovodenje struje u iste. Kada na jedan terminal postavimo žicu, svaka druga žica koju postavimo u isti terminal će se ponašati kao da je zaljemljena za prvu žicu ili pin. Sabirnicu možemo prepoznati po tome što se pruža dužinom ploče, dok se terminali pružaju širinom ploče. Uz matador ploču se najčešće koriste jumper kablovi, koji svojim pinovima ostvaruju kvalitetan kontakt sa unutrašnjim dijelom ploče. Zbog lakšeg kabliranja, koristio sam bužire na kablovima. Bužiri su izolacija za kablove koja se zagrijavanjem kontraktuje.

U ovom slučaju su korisni kada postoji 2 ili više kablova koji imaju zajedničku lokaciju izvora i destinacije.

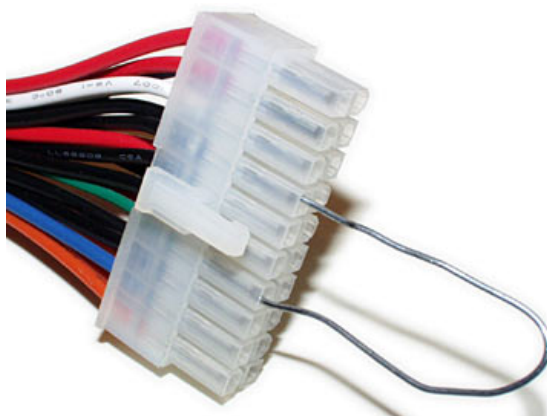


Slika 40: Matador terminali i sabirnica

U ovom projektu je korištena matador ploča sa 60 terminala (sa po 5 ulaza) i sa 4 sabirnice. Dimenzije ploče su 85mm x 55mm.

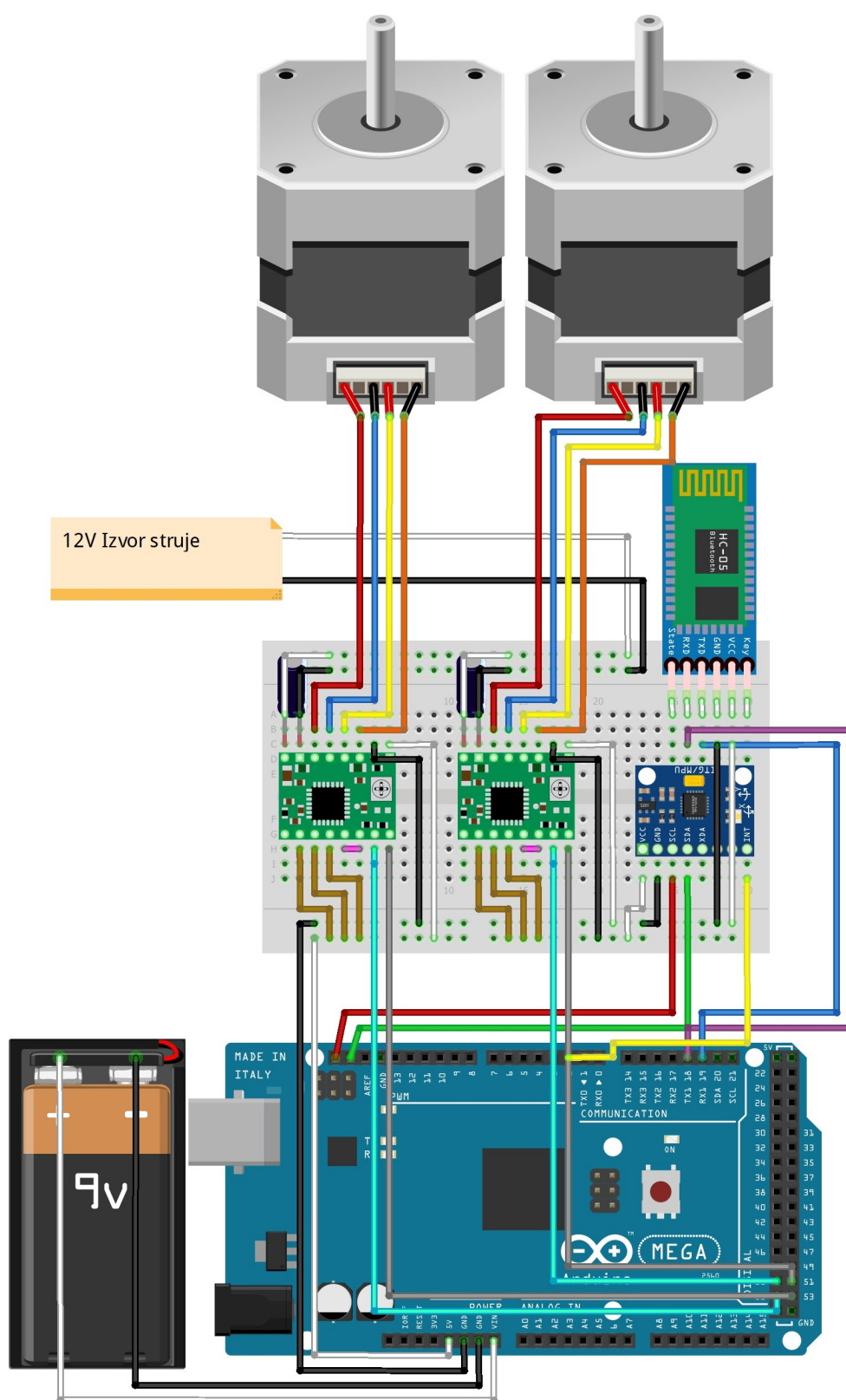
#### 10.4.1 Napajanje

Pošto Arduino ima maksimalan izlaz struje od 5V, za napajanje A4988 upravljača kojem je potrebno između 8V i 35V (Sekcija 6.4) kako bi pokrenuo motore, potrebno je dovesti vanjski izvor struje koji može dostaviti potrebnu voltažu. Pošto nisam bio u mogućnosti na vrijeme nabaviti bateriju koja bi mogla ispuniti zahtjeve za strujom, iskoristio sam staru napojnu jedinicu iz računara. Način na koji matična ploča pali napojnu jedinicu jeste taj da jedinoj zelenoj žici otvori put do uzemljenja čime napojna jedinica dobija signal da je upaljena. Nakon toga, kroz svaku narandžastu žicu prolazi 3V, kroz svaku crvenu 5V i kroz svaku žutu 12V, dok je svaka crna žica uzemljenje. Ovo sam iskoristio tako što sam na žutu i crnu žicu zalemio bakreni izolirani kabal dužine 3m, te na njegove krajeve zalemio muške jumper kablove koji dovode struju u matador ploču.



Slika 41: Spojena crna i zelena žica kako bi se napojna jedinica upalila

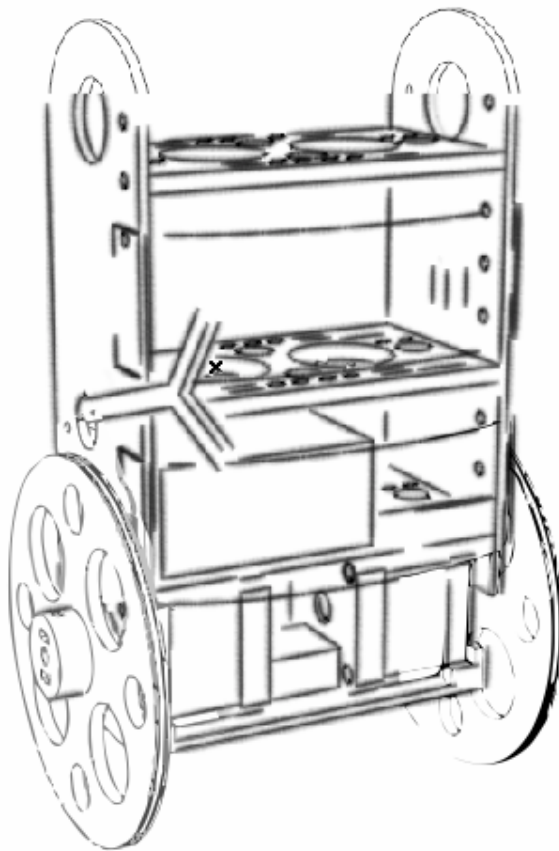
## 10.5 Kabliranje



Slika 42: Šema kabliranja robota

## 10.6 Proces balansiranja

U procesu balansiranja robota ključna komponenta je MPU6050. Očitavanjem njegovih ulaznih podataka o trenutnom položaju robota u prostoru i prosljeđivanjem tih podataka PID kontroleru (sekcija 8), generiše se izlaz koji je proporcionalan brzini motora. Tačnije, kada konstrukcija robota počne padati prema naprijed, PID kontroler će na osnovu podataka iz DMP-a (sekcija 7.3) poslati signali A4988 upravljaču da kretnjom motora pomjeri robot prema naprijed što će težište motora prilagoditi poziciji njegovog gornjeg dijela te robota zadržati u balansiranom stanju.



Slika 43: Skica sličnog robota

Pravilo podešene  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  (sekcija 8.5), omogućit će da se robot i nakon blagog guranja vrati u balansirano stanje. Promjenom ciljane vrijednosti robot će se kretati naprijed i nazad.

## 10.7 Arduino program

Ključni dio projekta je sami Arduino program koji će kontrolisati robota.

### 10.7.1 Biblioteke

Za izradu programa, korištene su funkcije 4 biblioteke.

#### **TimerOne** <sup>6</sup>

Pošto će u glavnom programu biti potrebno određene događaje izvršavati na osnovu vremenskog parametra, uključena je biblioteka koja omogućava podešavanje prekida nakon zadanog vremena.

- `Initialize(t)` - postavlja vrijeme koje će proći između izvršenja prekida
- `attachInterrupt(void)` - zadaje funkciju koja će se izvršiti svakim prekidom.

#### **I2Cdevlib**

Ponudene funkcije ove biblioteke su već opisane u sekciji 7.6.

#### **Metro**

Izmijenjena Metro<sup>7</sup> biblioteka omogućava postavljanje sata koji provjerava da li je zadani period prošao te održava neki proces u postavljenom ritmu.

- `setInterval(t)` - postavlja zadani interval između otkucaja
- `check()` - vraća boolean vrijednost u zavisnosti da li je vrijeme otkucaja prošlo, te počinje čekanje novog otkucaja.

### 10.7.2 Motors biblioteka

Prvobitno sam napisao kompletnu biblioteku za akceleraciju i deakceleraciju stepper motora kako bi se robot fluidnije kretao, ali sam kasnije došao do zaključka da će se akceleracija prirodno dogoditi, jer naginjanjem robota PID izlaz postepeno ubrzava motore ka većim brzinama. Ipak mi je jedan dio te biblioteke poslužio i u finalnom projektu.

- `connectToPins(S,D)` - u privatnu varijablu zabilježava pinove za STEP i DIR na upravljaču motora

---

<sup>6</sup><https://www.arduino-libraries.info/libraries/timer-one>

<sup>7</sup>[https://www.pjrc.com/teensy/td\\_libs\\_Metro.html](https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Metro.html)

```

void Motor::makeStep()
{
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
}

void Motor::setDirection(Direction Direction)
{
    if (Direction == Clockwise)
        digitalWrite(directionPin, HIGH);

    if (Direction == CounterClockwise)
        digitalWrite(directionPin, LOW);
}

void Motor::connectToPins(byte stepPinNumber, byte
↪ directionPinNumber)
{
    stepPin = stepPinNumber;
    directionPin = directionPinNumber;

    pinMode(stepPin, OUTPUT);
    digitalWrite(stepPin, LOW);

    pinMode(directionPin, OUTPUT);
    digitalWrite(directionPin, LOW);
}

```

Primjer koda 8: Funkcije motor klase

- setDirection(D) - Postavlja smjer rotacije motora na osnovu enumeratora
- makeStep() - Radi 1 korak

### 10.7.3 Tok programa

Program se može rastaviti na 3 glavna dijela:

1. setup()
2. loop()
3. prekid



## **Setup()**

Unutar setup funkcije se inicijaliziraju uređaji.

1. Inicijalizacija motora
2. Otvaranje HC-05 serijske komunikacije
3. Postavljanje offseta za moju MPU6050 jedinicu
4. Kalibracija MPU6050
5. Preuzimanje veličine FIFO paketa od MPU6050
6. Inicijalizacija vremenskog prekida

## **Loop()**

Unutar loop funkcije se čeka prekid izazvan od strane MPU6050, te se preuzimaju njegovi paketi i vrši PID kalkulacija

1. Ukoliko je broj paketa u FIFO manji od veličine paketa vraća se na početak loop-a
2. Ukoliko je sa HC-05 došao signal, postavlja se u buffer varijablu
3. Varijabla koja označava MPU6050 prekid se postavlja na false
4. Učitavaju se podaci iz FIFO buffera
5. Podaci iz DMP-a se konvertuju u kvaternion, a zatim u eulerove uglove
6. Ugao X ose se postavlja kao ulazna vrijednost za PID kontroler
7. Radi se izračunavanje PID izlaza
8. Postavlja se smjer motora
9. Ukoliko je u bufferu neka od komandi za kretanje, aplicira se njen pomak u PID izlaz
10. Postavlja se vrijeme između koraka za oba motora (brzina motora)

## Prekid

Prekid koji se izvršava na osnovu unutrašnjeg tajmera za zadatak ima pokretanje motora.

1. Računanje trenutnog vremena
2. Računanje vremena od posljednjeg koraka
3. Poređenje vremena sa PID izlazom
4. Ukoliko je vrijeme za sljedeći korak
  - (a) Napravi korak
  - (b) Postavljanje vremena posljednjeg koraka za motor na trenutno vrijeme

## 11 Zaključak

Prilikom pisanja diplomskog rada, imao sam priliku da prođem kroz iznimno zanimljiv i poučan proces koji mi je omogućio da bolje razumijem određene aspekte elektronike, kao i njenu suštinu. Vremenski raspon koji mi je bio potreban za kompletiranje ovog rada je trajao 20 dana. Smatram da je jedna od najvećih prednosti ovog neobičnog projekta mogućnost nadogradnje u budućnosti i, samim tim proširivanje znanja iz navedene oblasti.

Obzirom na to da je robot funkcionalan, zaključio bih da je ovaj rad završen uspješno. Ukoliko ste zainteresovani da temeljitije upoznate korištene metode, čitav projekat, kao i konkretan kod koji je korišten u istom moguće je pronaći na mom GitHub akauntu <sup>8</sup>.

Kao što je već navedeno, u budućnosti planiram implementirati nadogradnje na robota, a neke od potencijalnih su:

- Prebacivanje komponenata sa matador-a na PCB
- Izrada kvalitetnije i šire konstrukcije robota
- Unaprijeđenje PID kontrolera
- Zamjena točkova
- Korištenje DC motora
- Instaliranje baterije koja će napajati Arduino i motore

---

<sup>8</sup><https://github.com/Adi-Sose/FALL-E>

## Primjeri koda

1	Serial Passtrough . . . . .	16
2	GridLayout . . . . .	39
3	ImageButton za dugme "Desno" . . . . .	39
4	Still ImageButton-a . . . . .	40
5	Zahtjevanje permisija za korištenje bluetooth-a . . . . .	41
6	SendSignal funkcija u MainActivity klasi . . . . .	42
7	Dodjeljivanje event objekata ImageButtonima . . . . .	43
8	Funkcije motor klase . . . . .	52

## Tabele

1	Arduino MEGA specifikacije . . . . .	11
2	Arduino MEGA dimenzije . . . . .	11
3	HC-05 specifikacije . . . . .	15
4	HC-05 dimenzije . . . . .	15
5	Tabela AT komandi[5] . . . . .	17
6	Šabloni MS pinova[1] . . . . .	24
7	A4988 specifikacije . . . . .	25
8	MPU6050 specifikacije . . . . .	31
9	Izgled 3x3 GridLayout-a . . . . .	39

## Slike

1	Boards manager prozor . . . . .	5
2	Library manager prozor . . . . .	5
3	Serial monitor prozor . . . . .	6
4	Primjer modulacije širine pulsa . . . . .	9
5	Šema pinova na ATMEGA2560 . . . . .	11
6	Piconet . . . . .	12
7	Piconet . . . . .	13
8	Binarni PSK . . . . .	14
9	HC-05 Šema . . . . .	16
10	Elektromagnet . . . . .	18
11	Šema unipolarnog motora . . . . .	19
12	Šema bipolarnog motora . . . . .	19

13	Valno upravljanje . . . . .	20
14	Metoda punog koraka . . . . .	20
15	Polukoračno upravljanje . . . . .	21
16	Mikrokoraćanje . . . . .	21
17	8-bitni DAC . . . . .	22
18	Primjer idealne konverzije iz digitalnog u analogni signal . . . . .	22
19	H-most . . . . .	23
20	Modovi rada H-mosta . . . . .	23
21	Najjednostavnija šema spajanja A9488 . . . . .	25
22	Žiroskop . . . . .	26
23	Primjer Eulerovih uglova na rotaciji $x,y,z \rightarrow X,Y,Z$ . . . . .	27
24	Grafički prikaz proizvoda imaginarnih dijelova $i$ i $j$ . . . . .	28
25	Primjer I <sup>2</sup> C paketa . . . . .	30
26	Raspored pinova na MPU6050 . . . . .	31
27	Graf P kontrolera . . . . .	33
28	Graf PI kontrolera . . . . .	34
29	Petlja sa PID kontrolerom . . . . .	35
30	Graf PID kontrolera . . . . .	35
31	efekt $K_p$ parametra na izlaz . . . . .	36
32	efekt $K_i$ parametra na izlaz . . . . .	36
33	efekt $K_d$ parametra na izlaz . . . . .	37
34	Dizajn mobilne aplikacije u Adobe XD . . . . .	38
35	ImageButton-i unutar GridLayout-a . . . . .	40
36	Navojna šipka . . . . .	44
37	Nacrt pleksiglas pločica sa rupama za navojne šipke . . . . .	45
38	Nema 17 koraćni motor . . . . .	46
39	Vrste pinova koje dođu uz MPU6050 . . . . .	47
40	Matador terminali i sabirnica . . . . .	48
41	Spojena crna i zelena žica kako bi se napojna jedinica upalila . . . . .	48
42	Šema kabliranja robota . . . . .	49
43	Skica sličnog robota . . . . .	50

## Literatura

- [1] *A4988 Datasheet*. [https://www.pololu.com/file/0J450/a4988\\_DMOS\\_microstepping\\_driver\\_with\\_translator.pdf](https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf). Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [2] *Arduino constants*. <https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/constants/constants/>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [3] *Arduino dokumentacija*. <https://www.arduino.cc/en/main/docs>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [4] *Arduino wiki*. <https://github.com/arduino/Arduino/wiki>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [5] *HC-05 Datasheet*. <http://www.electronicastudio.com/docs/istd016A.pdf>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [6] *I<sup>2</sup>C info*. <https://i2c.info>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [7] Satish K. Karna. *Digital Electronics—GATE, PSUs and ES Examination*. Vikas Publishing House Pvt Ltd, 2005.
- [8] *MPU6050 Datasheet*. [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf). Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [9] *PlatformIO web stranica*. <https://platformio.org>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [10] K.H. SAng and Chong. "PID control system analysis, design, and technology". In: (2005).
- [11] *The difference between unipolar and bipolar stepper motors*. [https://techexplorations.com/blog\\_the-difference-between-unipolar-and-bipolar-stepper-motors](https://techexplorations.com/blog_the-difference-between-unipolar-and-bipolar-stepper-motors). Vrijeme pristupa: 21.9.2019.
- [12] *What is phase shift keying?* <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/phase-shift-keying>. Vrijeme pristupa: 21.9.2019.