

Upravljanje bespilotnom letjelicom pokretima ruke

Ivanić, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:789778>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-05**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

UPRAVLJANJE BESPILOTNOM LETJELICOM POKRETIMA
RUKE

CONTROL OF THE DRONE BY HAND MOVEMENTS

Mentor: doc. dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

Student: Filip Ivanić

JMBAG: 0135253185

Zagreb, ožujak 2023.

Zagreb, 6. lipnja 2022.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Upravljanje i vođenje zrakoplova**

DIPLOMSKI ZADATAK br.
6971

Pristupnik: Filip Ivanić (0135253185)

Studij: Aeronautika

Zadatak: **Upravljanje bespilotnom letjelicom pokretima ruke**

Opis zadatka:

Upravljanje gestama i pokretima ruke ili tijela sve se više koristi i za upravljanje letom bespilotnim letjelicama. Svrha ovog rada je izraditi sustav koji će prepoznavati pokrete ruke te signalizirati bespilotnoj letjelici željeno kretanje. U radu je potrebno objasniti koncept i izradu sustava za upravljanje dronom pokretima ruke. Definirati test za usporedbu klasičnog načina upravljanja i upravljanja gestama ruke. Usporediti oba načina upravljanja. Komentirati razlike i dati zaključke.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

doc. dr. sc. Karolina Krajček Nikoli

SAŽETAK

Upravljanje dronovima pokretima ruke postaje sve popularniji način kontrole ovih bespilotnih letjelica. U ovom diplomskom radu istražuje se razvoj intuitivnog upravljanja dronom pokretima ruke uz pomoć Arduino Uno platforme i senzora pokreta ADXL345. To podrazumijeva prilagodbu postojećeg drona i daljinskog upravljača na način da se upravlja nagibom ruke putem senzora pokreta umjesto klasične kontrole s dvije palice. U radu će biti predstavljeni ključni aspekti projektiranja, izrade i testiranja ovog intuitivnog upravljačkog sustava za dron, kao i eksperimentalni rezultati dobiveni korištenjem ovog sustava upravljanja. Pokazat će se da je upravljanje dronom pokretima ruke jednako funkcionalno kao i klasično upravljanje s dvije palice.

KLJUČNE RIJEČI:

Akcelerometar; bespilotne letjelice; Arduino Uno; ADXL345; RC filteri

SUMMARY:

Controlling drones with hand gestures is becoming an increasingly popular method of controlling these unmanned aerial vehicles. This thesis explores the development of an intuitive drone control system using hand gestures with the help of an Arduino Uno platform and ADXL345 motion sensors. Specifically, the existing drone and remote control are adapted to control the drone by tilting the hand using the motion sensor, instead of using the traditional two joysticks. The thesis presents key aspects of designing, building, and testing an intuitive drone control system using hand gestures, as well as experimental results obtained using this control system. It will be shown that controlling drones with hand gestures is just as functional as traditional two-joystick control.

KEYWORDS:

accelerometer; unmanned aerial vehicles; Arduino Uno; ADXL345; RC filters

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPIS KOMPONENATA KORIŠTENIH U RADU.....	3
2.1. Bespilotna letjelica korištena u radu	3
2.2. Arduino Uno R3	5
2.3. Akcelerometar ADXL345	8
2.3.1. I2C protokol	11
2.3.2. Prednosti i ograničenja.....	12
2.4. RC filter	13
2.4.1. Pretvaranje PWM signala u analogni signal	14
2.5. Napajanje upravljača	19
2.6. Arduino IDE.....	19
3. IZRADA DALJINSKOG UPRAVLJAČA ZA BESPILOTNU LETJELICU	22
3.1. Zadaća Arduino Uno pločice.....	22
3.2. Programiranje pločice	23
3.3. Napajanje sustava	25
3.4. Uloga i princip rada akcelerometra	25
3.4.1. Djelovanje sila u akcelerometru	25
3.4.2. Mikro elektro-mehanički sustav	27
3.4.3. Spajanje akcelerometra u sustav.....	28
3.5. RC filteri	29
3.6. Uloga potenciometra na transmiteru.....	30
3.7. 3D printanje i završni izgled.....	32
4. ANALIZA PODATAKA DOBIVENIH SA SENZORA	34
5. EKSPERIMENT UTVRĐIVANJA FUNKCIONALNOSTI SUČELJA ZA UPRAVLJANJE DRONOM POKRETIMA RUKU.....	39
5.1. Opis izvođenja eksperimenta	39
5.2. Mjerenje odstupanja za let u kojem je dronom upravljano preko klasičnog načina upravljanja	42
5.3. Mjerenje odstupanja za let u kojem je dronom upravljano pokretima ruku	44
5.4. Mjerenje odstupanja između dvije putanje leta	46
5.5. Analiza i usporedba rezultata mjerenja.....	47
6. ZAKLJUČAK.....	50
POPIS LITERATURE.....	51

POPIS KRATICA 52
POPIS SLIKA 53
POPIS TABLICA..... 54
POPIS DIJAGRAMA..... 54

1. UVOD

Dronovi su postali sve popularniji u mnogim područjima, uključujući nadzor, dostavu, istraživanje i zabavu. Međutim, tradicionalni načini upravljanja dronovima, poput daljinskog upravljača s polugama, mogu biti ograničeni. Upravljanje dronom pokretima ruke pruža korisnicima jednostavniji i intuitivniji način upravljanja dronom. Ova tehnologija omogućava korisniku da koristi svoje ruke i geste kako bi kontrolirao dron, što olakšava i ubrzava postupak učenja kontroliranja letjelice.

Cilj ovog rada je napraviti sučelje koje će omogućiti upravljanje dronom pokretima tj. nagibima ruke. To podrazumijeva prilagodbu postojećeg drona i daljinskog upravljača na način da se upravlja nagibom ruke putem senzora pokreta umjesto klasične kontrole s dvije palice. Korištenjem već izrađenog drona i daljinskog upravljača, riješen je problem povezivanja prijarnika na dronu i odašiljača na kontroleru, budući da njihova međusobna komunikacija kod ovakvog tipa drona dolazi kriptirana od strane proizvođača te nije podložna promjenama. Klasične polugice na daljinskom upravljaču su zapravo potenciometri koji mijenjaju napon ovisno o svom položaju, a letjelica je programirana tako da određena vrijednost napona predstavlja određenu naredbu. Cilj ovog rada je upravo ostvariti tu funkcionalnost, tako da kut nagiba ruke, na kojoj se nalazi akcelerometar ADXL345, postane proporcionalan jačini napona na ulazu u kontroler. Rad je podijeljen u šest cjelina:

1. Uvod
2. Opis komponenata korištenih u izradi
3. Izrada daljinskog upravljača za bespilotnu letjelicu
4. Analiza podataka dobivenih sa senzora
5. Eksperiment utvrđivanja funkcionalnosti sučelja za upravljanje dronom pokretima ruku
6. Zaključak

U drugom poglavlju opisani su glavni dijelovi koji su potrebni za izradu sučelja za upravljanje bespilotnom letjelicom pokretima ruke. Navedene su njihove glavne karakteristike i načini rada, numeričke vrijednosti pojedinih veličina kao i načini dobivanja tih veličina.

Proces izrade i spajanja samog sučelja opisan je u trećem poglavlju. Objašnjena je uloga svakog pojedinog dijela u cjelokupnoj funkcionalnosti sučelja i prikazan je cijeli ciklus kretanja i obrade signala od akcelerometra u kojem nastaje signal do drona koji se kreće u zadanom smjeru.

Četvrto poglavlje analizira i interpretira vrijednosti dobivene sa akcelerometra odnosno senzora pokreta. Prikazuje promjene nagiba senzora grafički, objašnjava kako one utječu na promjene napona na izlazu i prikazuje kako te promjene napona utječu na kretanje bespilotne letjelice.

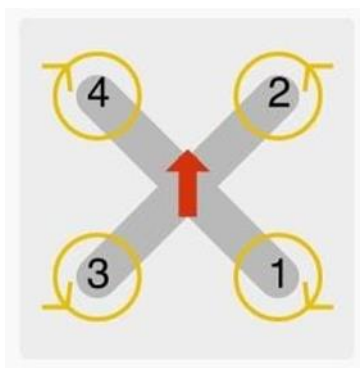
U petom poglavlju opisan je eksperimentalni dio diplomskog rada koji uključuje način izvođenja eksperimenta, mjerenja, analizu dobivenih rezultata te usporedbu između klasičnog načina upravljanja pomoću dvije palice i upravljanja pokretima ruke.

2. OPIS KOMPONENATA KORIŠTENIH U RADU

U ovom poglavlju bit će objašnjene neke od ključnih komponenti koje se koriste u ovom radu čiji je cilj osmisliti i izraditi sučelje za intuitivno upravljanje dronom pokretima ruke. Najvažnije komponente su dron, akcelerometar ADXL345 koji se koristi kao senzor pokreta, pasivni nisko propusni filteri sastavljeni od jednog otpornika i jednog kondenzatora odnosno RC filteri (*resistor-capacitor*) i Arduino Uno. Također bit će objašnjen serijski komunikacijski protokol (*Inter-Integrated Circuit – I2C*) kojim ADXL345 komunicira, ali i sile koje djeluju unutar senzora te zbog kojih senzor i stvara osjet pomaka.

2.1. Беспilotna letjelica korištena u radu

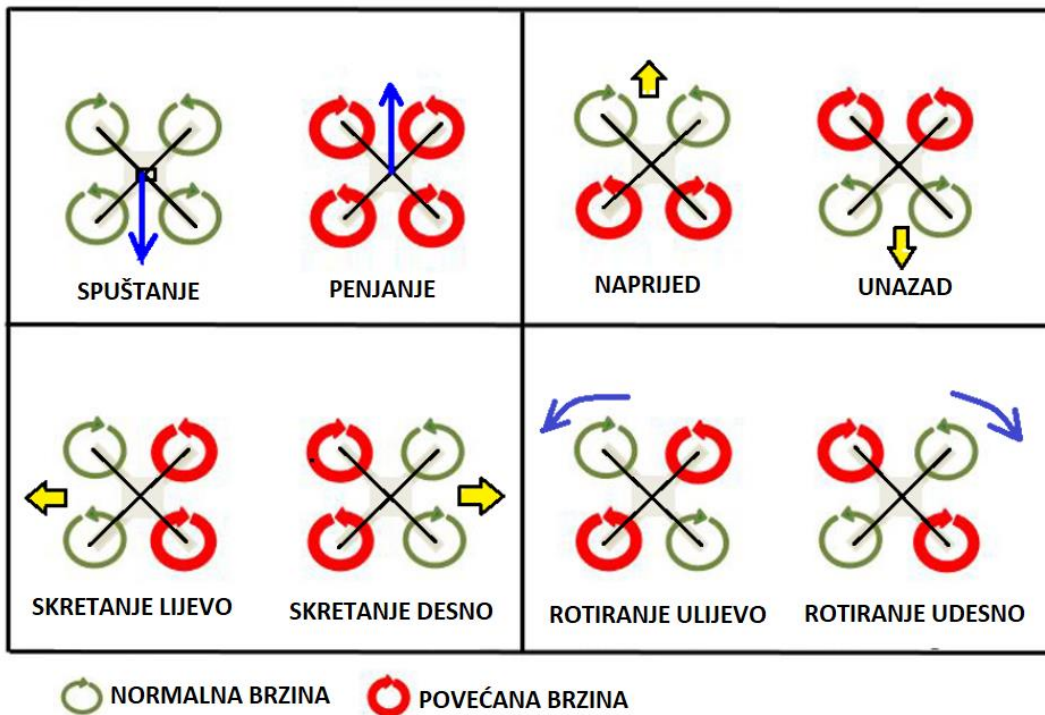
Kvadrokopter koji će se spominjati u izradi, najjednostavniji je tip multikoptera. Sastoji se od četiri motora od kojih se dva s dijametralno suprotnih strana okreću u istom smjeru, a preostala dva u suprotnom smjeru kako bi se poništili zakretni momenti nastali rotacijom propelera te omogućili stabilan let. Smjerovi vrtnje shematski su prikazani na slici 1.



Slika 1 Shematski prikaz smjera vrtnje pojedinih motora, [1]

Kvadrokopter može kontrolirati svoju rotaciju nagnjanja i propinjanja/poniranja ubrzavajući dva motora s jedne strane i usporavajući druga dva. Tako, na primjer, ako se kvadrokopter želi nagnuti ulijevo, ubrzao bi motore na desnoj strani okvira i usporio dva s lijeve strane. Slično, ako se želi rotirati naprijed, ubrzava zadnja dva motora i usporava prednja dva, analogno tome skreće udesno i prema nazad. Na slici 2 shematski su prikazane brzine vrtnji pojedinih motora u određenim manevrima. Crveno su označeni motori koji se vrte brže od ostalih, a zeleno oni koji se vrte brzinom dovoljnom za lebdenje osim u slučaju spuštanja drona kad se svi

motori jednako usporavaju. Što je brzina vrtnje pojedinog motora veća, veća je i uzgonska sila koja se stvara pomoću tog motora [1].



Slika 2 Shematski prikaz promjene brzina pojedinih motora u manevrima

Horizontalno kretanje se postiže privremenim ubrzavanjem/usporavanjem nekih motora tako da se letjelica nagnje u smjeru željenog kretanja i povećava ukupni potisak svih. Općenito, što se letjelica više nagnje, to brže leti odnosno ima veću progresivnu brzinu u željenom smjeru. Visina se kontrolira ubrzavanjem ili usporavanjem svih motora u isto vrijeme [1].

U ovom radu naglasak nije bio na izradi drona nego na izradi alternativnog načina upravljanja odnosno sučelja za upravljanje pokretima ruku. Iz tog razloga korišten je *nebrendirani* već napravljen dron koji je bio jeftiniji, a samim tim i malo slabijih performansa no to ne utječe na ishod rada. Dron i njegov originalni kontroler prikazani su na slici 3.



Slika 3 Dron i njegov kontroler korišteni u radu

2.2. Arduino Uno R3

Arduino Uno R3 je popularna mikrokontrolerska ploča koju je 2012. godine predstavio Arduino. Namijenjena je za jednostavnu upotrebu i pogodna je za širok raspon projekata, uključujući robotiku, kućnu automatizaciju i IoT. Upravo zbog tih svojih karakteristika odabrana je baš ova pločica. Arduino Uno programabilna pločica prikazana je na slici 4 [2].

Arduino Uno R3 je svestrana i korisnički prijateljska mikrokontrolerska ploča koja je pogodna za širok raspon projekata. Njegova jednostavnost upotrebe, kompatibilnost s raznim drugim pločicama i mogućnost reprogramiranja komponenti čine ga popularnim izborom za hobiste, studente i profesionalce. Njegove brojne značajke i specifikacije čine ga moćnim alatom za one koji žele stvoriti vlastite elektroničke projekte [2].



Slika 4 Arduino Uno R3, [2]

Osnovne specifikacije Arduino Uno R3 [2]:

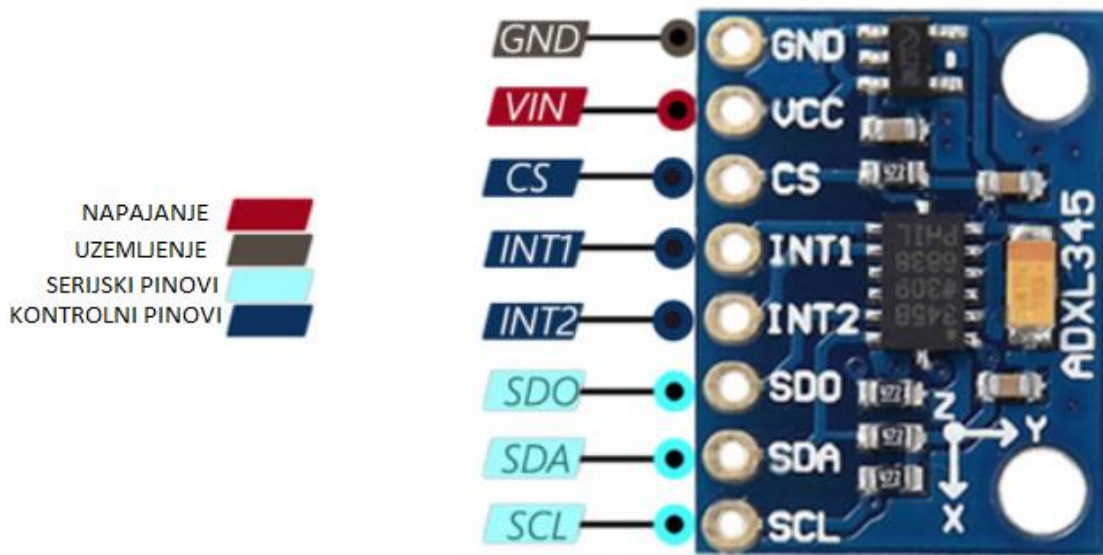
- Duljina - 68.6mm
- Širina – 53.4mm
- Težina – 25g
- Mikrokontroler: ATmega328P
- Radni napon: 5V
- Preporučeni ulazni napon: 7-12V
- Granice ulaznog napona: 6-20V
- Digitalni I/O pinovi: 14 (od kojih 6 omogućuju PWM izlaz)
- PWM digitalni I/O pinovi: 6
- Analogni ulazni pinovi: 6
- Maksimalna izlazna struja: 40mA
- *Flash* memorija: 32 KB (ATmega328P) od kojih 0,5 KB koristi *bootloader*
- Brzina takta: 16 MHz

Osnovne značajke Arduino Uno R3 [2]:

- USB sučelje: Arduino Uno R3 dolazi s USB sučeljem koje omogućuje povezivanje s računalom. To sučelje se koristi za učitavanje koda na ploču i za komunikaciju s pločom.
- Mikrokontroler: Ploču pokreće mikrokontroler ATmega328P, koji je niskonaponski CMOS 8-bitni mikrokontroler temeljen na AVR arhitekturi.
- Ulazni/izlazni pinovi: Ploča ima 14 digitalnih ulaznih/izlaznih pinova, od kojih se 6 može koristiti kao pulsno-širinsko modulirani (*Pulse Width Modulation* - PWM) izlazni pinovi. Tu su također 6 analognih ulaznih pinova koji se mogu koristiti za čitanje analognih vrijednosti.
- Napajanje: Arduino Uno R3 može se napajati pomoću USB kabela preko računala ili vanjskog napajanja preko baterije koja se spaja na pinove ili preko USB kabla što će biti korišteno u ovom radu. Ploča ima regulator napona koji može regulirati napon na 5V, što je potrebno da bi mikrokontroler radio.
- Integrirano razvojno okruženje (IDE): Arduino Uno R3 dolazi s jednostavnim za upotrebu IDE-om koji se može koristiti za pisanje, kompiliranje (*compiling*) i učitavanje koda na ploču.
- *Shieldovi*: Arduino Uno R3 se može jednostavno proširiti korištenjem *shieldova*. *Shieldovi* su pločice s pinovima koje se mogu koristiti za dodavanje dodatnih značajki na ploču, poput WiFi-ja, Ethernet-a i upravljanja motorima.
- Otvoren izvor (*Open Source*): Arduino Uno R3 je platforma otvorenog izvora, što znači da je softver kojim se upravlja hardverom besplatno dostupan i bilo tko ga može modificirati.

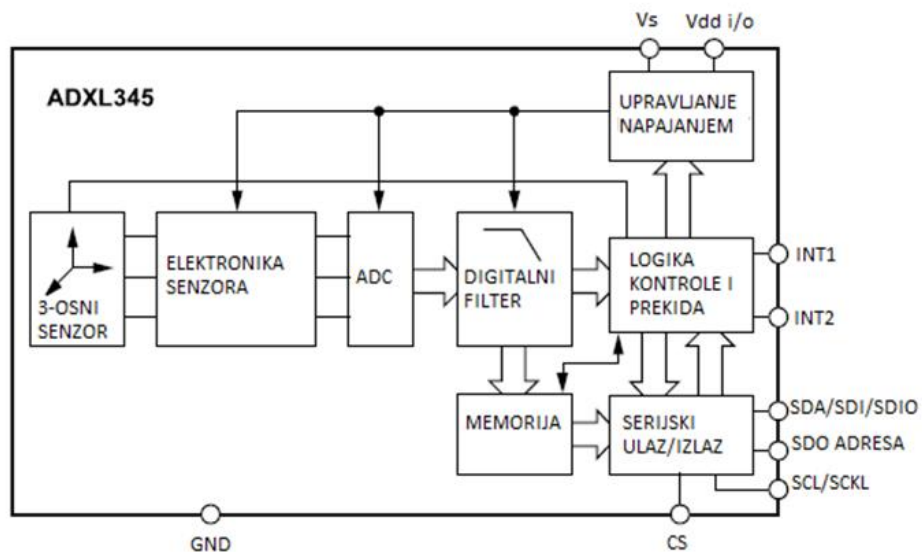
2.3. Akcelerometar ADXL345

ADXL345, koji se nalazi na pločici koju vidimo na slici 5 , je troosni akcelerometar koji je malen, tanak, ultra male potrošnje s vrlo visokom rezolucijom (13-bitni) i s mogućnošću mjerenja do +/- 16g. Digitalni izlazni podaci formatirani su kao 16-bitni komplement 0 i 1 i dostupni su putem SPI (3- ili 4-žičnog) ili I2C digitalnog sučelja [3].



Slika 5 Akcelerometar ADXL345, [3]

Akcelerometar ADXL345 je sam po sebi samo senzor i kao takav ne može samostalno stajati kao davač informacija o položaju ili kretanju nego mora biti spojen u krugu s ostalim elektroničkim komponentama. Ostale komponente služe za napajanje, stabilan rad, obradu podataka i kao sučelje za spajanje dalje u mrežu. Blok shema cijele pločice s pripadajućim pinovima koji su vidljivi i na gornjoj slici vidljiva je na slici 6 [3].



Slika 6 Blok shema akcelerometra, [3]

U tablici 1 prikazane su oznake pojedinih pinova te njihovo značenje.

Tablica 1 Nazivi i značenje pinova

OZNAKA	ZNAČENJE
GND	Pin koji se spaja na uzemljenje
VCC	Napajanje
CS	Odabiranje čipa
INT1	Izlaz prekida 1 - <i>interrupt1</i>
INT2	Izlaz prekida 2 - <i>interrupt2</i>
SDO	<i>Serial Data Output</i> , linija kojom se prenose izlazni podaci
SDA/SDI/SDIO	<i>Serial Data</i> , linija kojom se prenose podaci
SCL/SCLK	<i>Serial Clock</i> , linija kojom se prenosi takt

Izvor: [4]

ADXL345 je vrlo prikladan za aplikacije na mobilnim uređajima. Mjeri se statičko ubrzanje sile gravitacije u aplikacijama gdje se koriste podaci o nagibu senzora, kao i

dinamičko ubrzanje koje je rezultat gibanja ili udara. Njegova visoka rezolucija od 0.0039g omogućuje mjerenje nagiba s promjenom manjom od 1,0° [5].

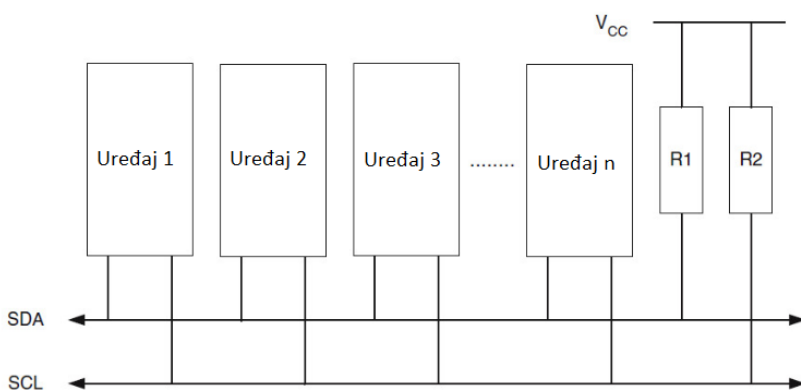
Postoji nekoliko posebnih funkcija senzora. Osjet aktivnosti ili neaktivnosti detektiranjem prisutnosti ili nedostatka kretanja u usporedbi s ubrzanjem po bilo kojoj osi s unaprijed postavljenim pragovima detekcije. Osjet dodira otkriva jednostruke i dvostruke dodire u bilo kojem smjeru. Osjet slobodnog pada detektira ako uređaj pada. Ove se funkcije mogu mapirati pojedinačno na bilo koji od dva *interrupt*-INT izlazna pina. Integrirani sustav upravljanja memorijom s 32 razine čiji se rad temelji na vremenu ulaska i izlaska informacije po principu koji bit prvo uđe taj prvi i izađe (*first in, first out* - FIFO) može se koristiti za pohranjivanje podataka kako bi se smanjila aktivnost glavnog procesora i ukupna potrošnja energije sustava. Načini niske potrošnje energije omogućuju inteligentno upravljanje energijom temeljeno na pokretima s detekcijom praga i aktivnim mjerenjem ubrzanja pri izrazito niskoj disipaciji snage [5].

Karakteristike:

- Napon napajanja: 2,0 - 3,6 VDC
- Ultra niska potrošnja: samo 23 μ A u načinu mjerenja, 0,1 μ A u stanju pripravnosti pri 2,5V
- SPI ili I2C komunikacija
- Osjet aktivnosti/neaktivnosti
- Detekcija slobodnog pada
- Širok temperaturni raspon (-40°C do +85°C)
- Fleksibilni modovi prekida koji se mogu povezati na bilo koji prekidni pin (*interrupt pin*)
- Rasponi mjerenja koji se mogu mijenjati putem serijske naredbe (± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g)
- Širina pojasa se može odabrati putem serijske naredbe
- Malen i tanak: 3 mm \times 5 mm \times 1 mm

2.3.1. I2C protokol

U ovom radu korištena je I2C komunikacija. *Inter-Integrated Circuit* razvijen od strane Philips-a u 1980-ima, postao je jedan od najčešćih serijskih komunikacijskih protokola u elektronici. I2C omogućuje komunikaciju između elektroničkih komponenti, bez obzira na to jesu li komponente na istoj matičnoj ploči (*printed circuit board* – PCB) ili spojene preko kabla. Ključna značajka I2C je sposobnost da ima veliki broj komponenata na jednom komunikacijskom sabirnici sa samo dvije žice, što čini I2C savršenim za aplikacije koje zahtijevaju jednostavnost i nisku cijenu. Primjer spajanja može se vidjeti na slici 7 [6].



Slika 7 Primjer spajanja uređaja na I2C sabirnicu, [4]

Komunikacija putem I2C sabirnica obavlja se preko dvije linije:

- SDA (Serial Data), kojom se prenose podaci
- SCL (Serial Clock), kojom se prenosi takt.

Najčešća brzina prijenosa podataka na sabirnici je 100 kbit/s u standardnom načinu rada (engl. *standard mode*) ili 10 kbit/s u sporom načinu rada (engl. *low speed mode*), ali i brzine niže od navedenih su dozvoljene. Novije verzije podržavaju i brže taktove i to 400 kbit/s u brzom načinu rada (engl. *fast mode*) ili 3,4 Mbit/s u vrlo brzom načinu rada (engl. *high-speed mode*) [6].

Svaka komponenta koja je spojena na sabirnicu ima svoju adresu, koja na toj sabirnici mora biti jedinstvena. Standard definira 7-bitne adrese, što omogućava spajanje najviše 112 komponenta na jednu sabirnicu. Preostalih 16 adresa je rezervirano za posebne potrebe. Novije verzije standarda omogućavaju i 10-bitne adrese. Ukupni kapacitet na liniji ne smije biti veći od 400 pF. Kako dodavanje svake komponente unosi dodatnu kapacitivnost na liniji, ovaj uvjet ograničava najveći broj komponenti na jednoj sabirnici [6].

Svaka komponenta može implementirati I2C standard na dva načina:

- kao upravljač (engl. *master*)
- kao izvršitelj (engl. *slave*).

2.3.2. Prednosti i ograničenja

Kao komunikacijski protokol, I2C ima neke prednosti u odnosu na ostale komunikacijske protokole [7] :

- I2C zahtijeva samo dvije signalne linije
- fleksibilne brzine prijenosa podataka
- svaki uređaj na sabirnici je neovisno adresiran
- uređaji imaju jednostavnu vezu Upravljač / Izvršitelj
- I2C je sposoban upravljati višestrukim komunikacijama upotrebom arbitraže i otkrivanja poremećaja komunikacije

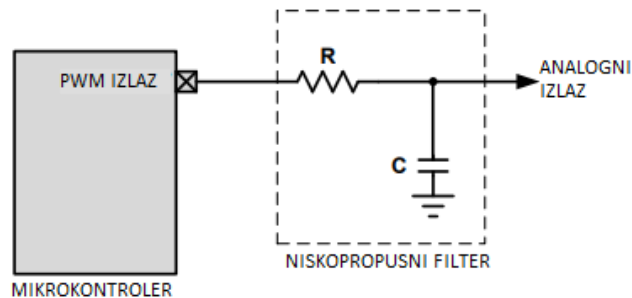
Uz navedene prednosti, I2C ima i nekoliko ograničenja na koja treba obratiti pozornost. Najvažnija ograničenja za I2C uključuju [7]:

- budući da su dostupni samo 7-bitni (ili 10-bitni) uređaji za adresiranje, uređaji na istoj bazi mogu dijeliti istu adresu. Neki uređaji mogu konfigurirati zadnjih nekoliko bitova adrese, ali to je još uvijek ograničenje za uređaje na istoj sabirnici.
- dostupno je samo nekoliko brzina komunikacije, a mnogi uređaji ne podržavaju prijenos pri većim brzinama. Potrebna je djelomična podrška za svaku brzinu na sabirnici kako bi spriječili sporije pokretanje priključenih dijelova koji bi mogli dovesti do operativnih kvarova

- zajedničke karakteristike cijele I2C sabirnice može rezultirati otkazom cijele sabirnice kad jedan uređaj na sabirnici prekine s radom. Upravljački program sabirnice može se koristiti za ponovno pokretanje sabirnice i omogućavanje ispravnog rada.
- budući da uređaji sami mogu postaviti brzinu komunikacije, sporiji uređaji mogu kočiti rad bržih uređaja
- I2C sabirnice obično ograničavaju broj uređaja na sabirnici na desetak uređaja

2.4. RC filter

RC filter, ili *resistor-capacitor* filter, je elektronički sklop koji se koristi za filtriranje signala i suzbijanje neželjenih frekvencija. RC filter se sastoji od jednog otpornika (R) i jednog kondenzatora (C) spojenih u seriju kao što se vidi na slici 8 koja prikazuje blok shemu RC filtera. [8]



Slika 8 Blok shema RC filtera, [8]

Kad se signal primijeni na RC filter, frekvencije koje su manje od određene granice (granične frekvencije) se smanjuju, dok frekvencije iznad granice prolaze kroz sklop gotovo nepromijenjene. Stoga, RC filter može smanjiti buku u signalu i ukloniti visokofrekventne smetnje koje mogu utjecati na performanse sustava [4].

RC filter se može spojiti na bilo koji signalni put, kao što su ulazni signal mikrokontrolera, izlazni signal senzora ili izlazni signal motora. RC filter se obično spaja između signala i uzemljenja kako bi se filtrirao signal [4].

Važno je napomenuti da će vrijednosti otpornika i kondenzatora također utjecati na vrijeme konstante (τ) sklopa, koje predstavlja vrijeme koje je potrebno kondenzatoru da se napuni ili isprazni. Vrijeme konstante se izračunava kao $\tau = RC$. Vrijednost vremena konstante može utjecati na reakciju sustava na promjene signala, pa se vrijednosti komponenti moraju pažljivo odabrati u skladu s potrebama aplikacije. Najvažnije je da vrijeme punjenja kondenzatora bude kraće od vremena pražnjenja kondenzatora [4].

2.4.1. Pretvaranje PWM signala u analogni signal

Veliki broj primjena mikrokontrolera zahtijeva korištenje analognih izlaznih signala. Mnogi jeftini mikrokontroleri imaju periferne uređaje za obradu analognih ulaznih signala, poput pretvornika analognog signala u digitalni (*Analog to digital converter - ADC*), ali često ne uključuju pretvarač digitalnog u analogni signal (*Digital to analog converter - DAC*). Naravno, postoje opcije za vanjske DAC-ove; međutim, oni mogu zahtijevati dodatne ulazno-izlazne priključke ili prostor na PCB-u, što povećava troškove aplikacije [4].

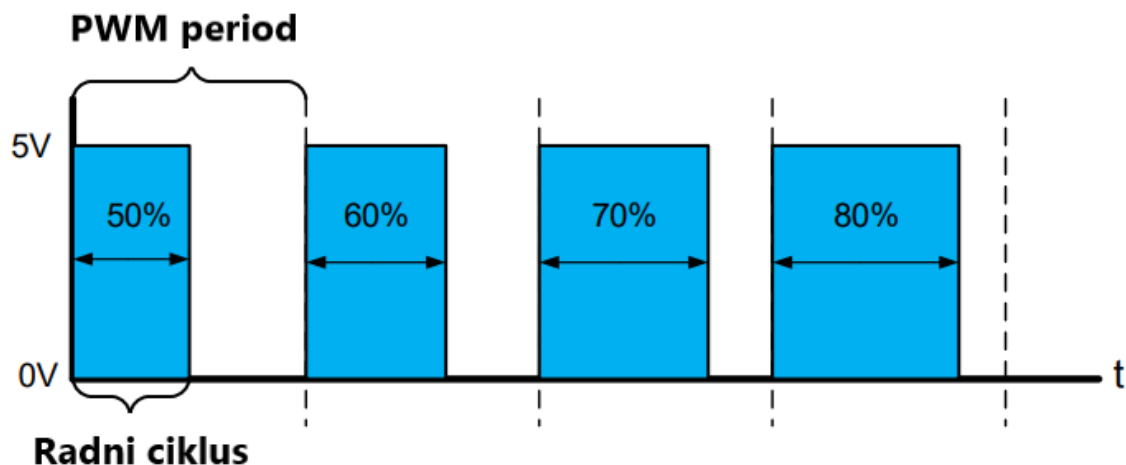
Pulsno-širinska modulacija (*Pulse Width Modulation - PWM*) je tehnika koja se koristi za regulaciju izlaznog signala u digitalnim sustavima. PWM signal se sastoji od pulsirajućeg signala koji ima fiksnu frekvenciju, a širina impulsa se može mijenjati. Korištenjem PWM-a, moguće je izlazni signal digitalnog sustava pretvoriti u analogno-ekvivalentni signal [4].

Širina impulsa, koja se također naziva radni ciklus (*duty cycle*), je izravno proporcionalan amplitudi izvornog nemoduliranog signala kao što je prikazano u jednadžbi (1)

$$V_{izlaz} = A \times \text{RADNI CIKLUS} \quad (1)$$

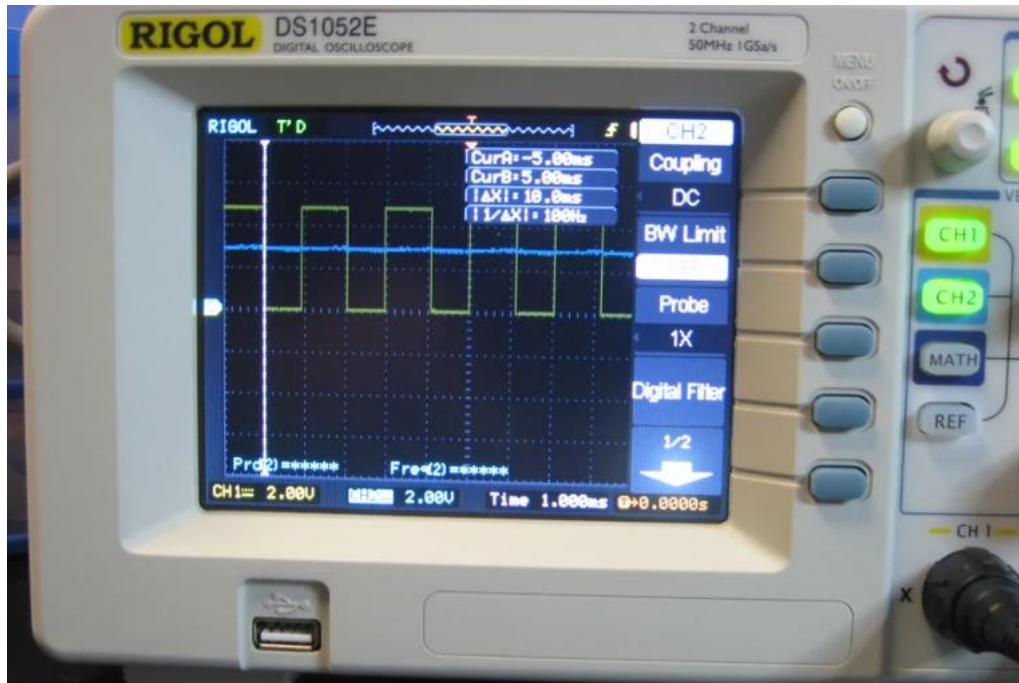
Gdje je A logička jedinica (1) (*high* stanje) amplitude napona.

Na primjer, ako je 2.5 V traženi izlazni signal, a PWM signal ima logički visoki napon od 5 V i logički nizak od 0 V, PWM signal s radnim ciklusom od 50 % će biti dovoljan. Radni ciklus od 50 % znači da polovicu razdoblja PWM daje 5 V, a polovicu razdoblja daje 0 V te je prosječni izlaz po razdoblju 2,5 V što se može vidjeti na slici 9.



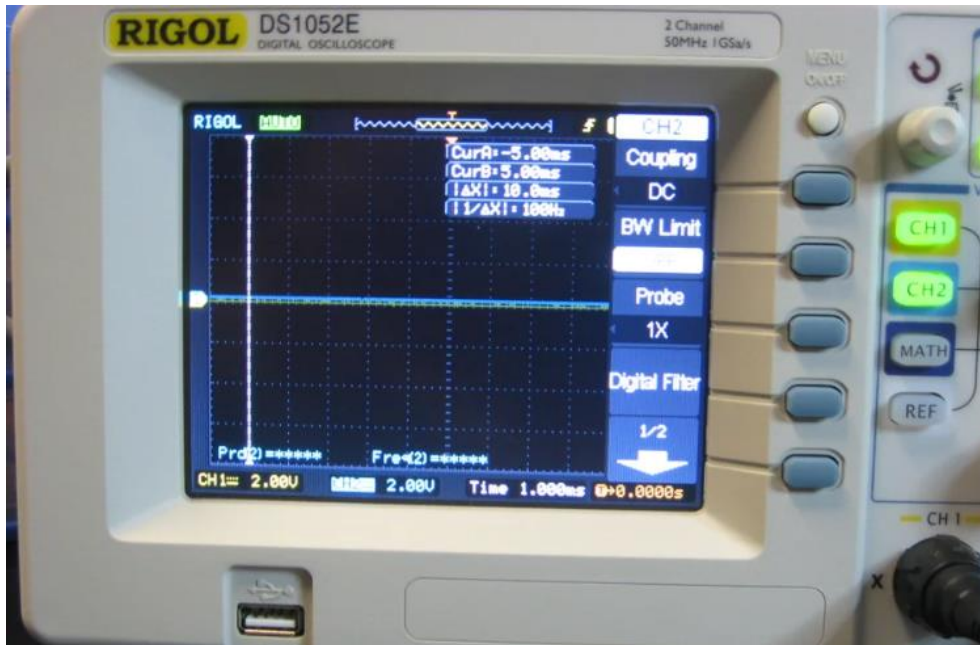
Slika 9 Radni ciklus od 50 %, [8]

A kako to izgleda kad se signal prikaže na osciloskopu vidljivo je na slici 10. RC izlaz je plava ravna linija. Raster prikaza je postavljen na 2 V. Svaka vodoravna linija predstavlja povećanje od 2 V. PWM varira od 0 V do 5 V, dok je RC izlaz stabilan blizu 2.5 volta [4].



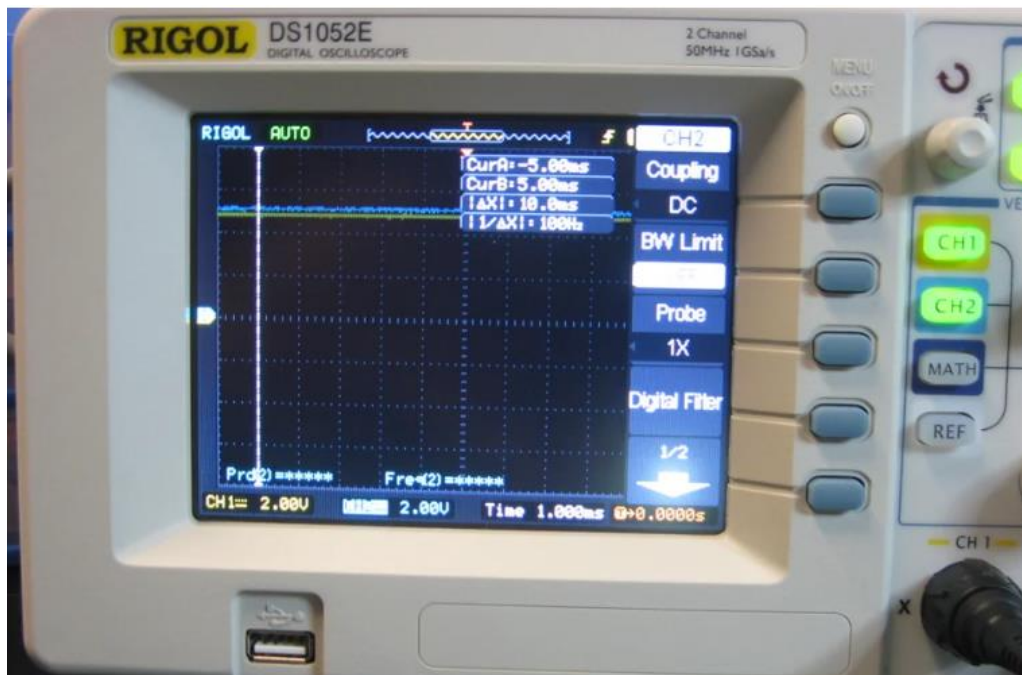
Slika 10 Analogni napon od 2.5 V na osciloskopu, [4]

Signal prije ulaska u filter i nakon izlaska iz filtera može se vidjeti postavljanjem pinova osciloskopa koji radi s dva kanala. Prvi kanal koji pokazuje vrijednosti PWM signala zelenom bojom na osciloskopu spaja se tako da se jedan kraj mjernog instrumenta spoji na masu, a drugi između izlaza iz Arduina i prije ulaska signala u otpornik. Drugi kanal koji pokazuje vrijednosti filtriranog signala plavom bojom spaja se jednom krajem na masu, a drugim na izlaz iz filtera. Na slici 11 osciloskop prikazuje dvije krivulje: PWM ulaz i izlaz RC filtra. U ovom slučaju obje su na nuli, na osnovnoj razini od 0 V [4].



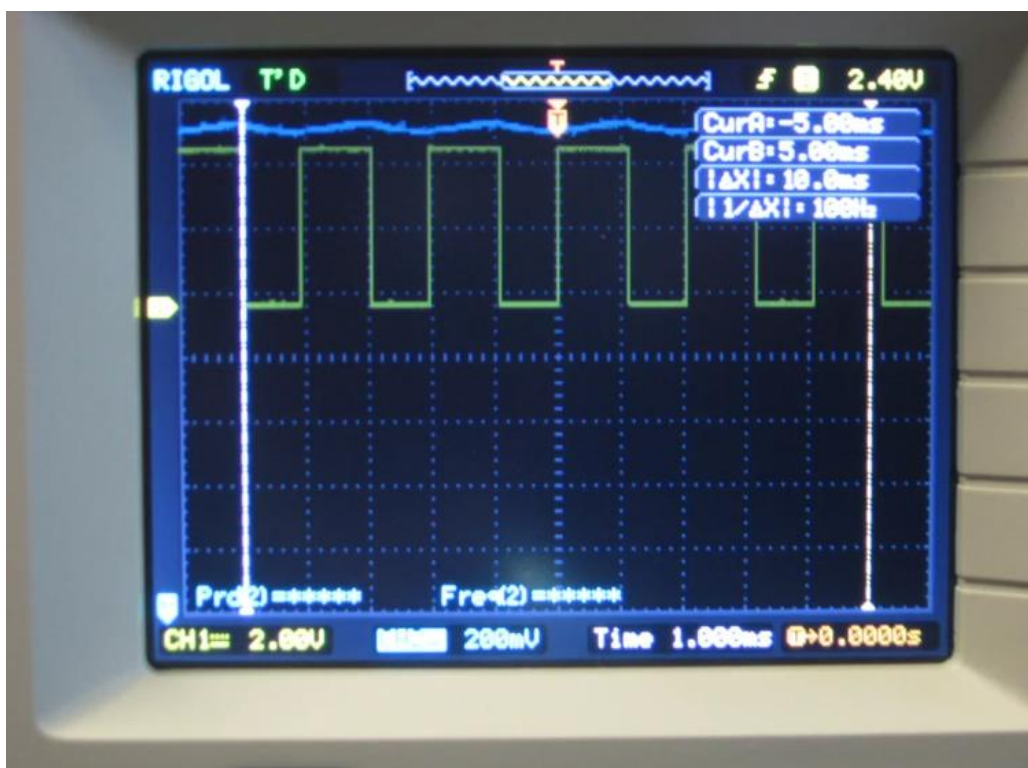
Slika 11 Analogni napon od 0 V na osciloskopu, [8]

Pri punoj snazi od 5 volti, i ulaz i RC izlaz su stalno u „high“ stanju koje je u ovom slučaju 5 V i vidljivo je na slici 12.



Slika 12 Analogni napon od 5 V na osciloskopu, [8]

Na slici 13 vidi se da je raster promijenjen s 2 V na 0.2 V kako bi se detaljnije prikazao RC izlaz. U ovakvom prikazu vidljiva je valovitost plave linije iznad kvadratnog vala to je vjerodostojniji RC izlaz. Vrijednosti R i C mogu se povećati kako bi se linija dodatno izravnala, ali tada se povećava vrijeme odziva. Ako je RC vrijednost previsoka, doći će do primjetnog kašnjenja u promjeni napona. Vrijednosti koje proizvode najbolji kompromis između vremena odziva i manje valovitosti ovise o ciljevima dizajna [4].



Slika 13 Valovitost analognog izlaza, [8]

Arduino Uno R3 je mikrokontroler koji ima mogućnost generiranja PWM signala na svojim digitalnim pinovima koji se može kombinirati s niskopropusnim filtrom kako bi se stvorio analogni izlaz. Ovaj tehnički sažetak ističe upotrebu niskopropusnog filtra za pretvaranje PWM signala u analogni signal. Arduino Uno R3 ima 6 PWM pinova (3, 5, 6, 9, 10 i 11), koji se mogu programirati da generiraju PWM signal. Ovi pinovi se nalaze na vrhu pločice, označeni su znakom “~” [4].

2.5. Napajanje upravljača

Napajanje ADXL345 senzora, RC filtera, kao i originalnog upravljača vrši se preko Arduino Uno mikrokontrolerske pločice koja je spojena preko svog originalnog USB kabla na prijenosnu bateriju koja je prikazana na slici 14 [7].



Slika 14 Prijenosna baterija, [5]

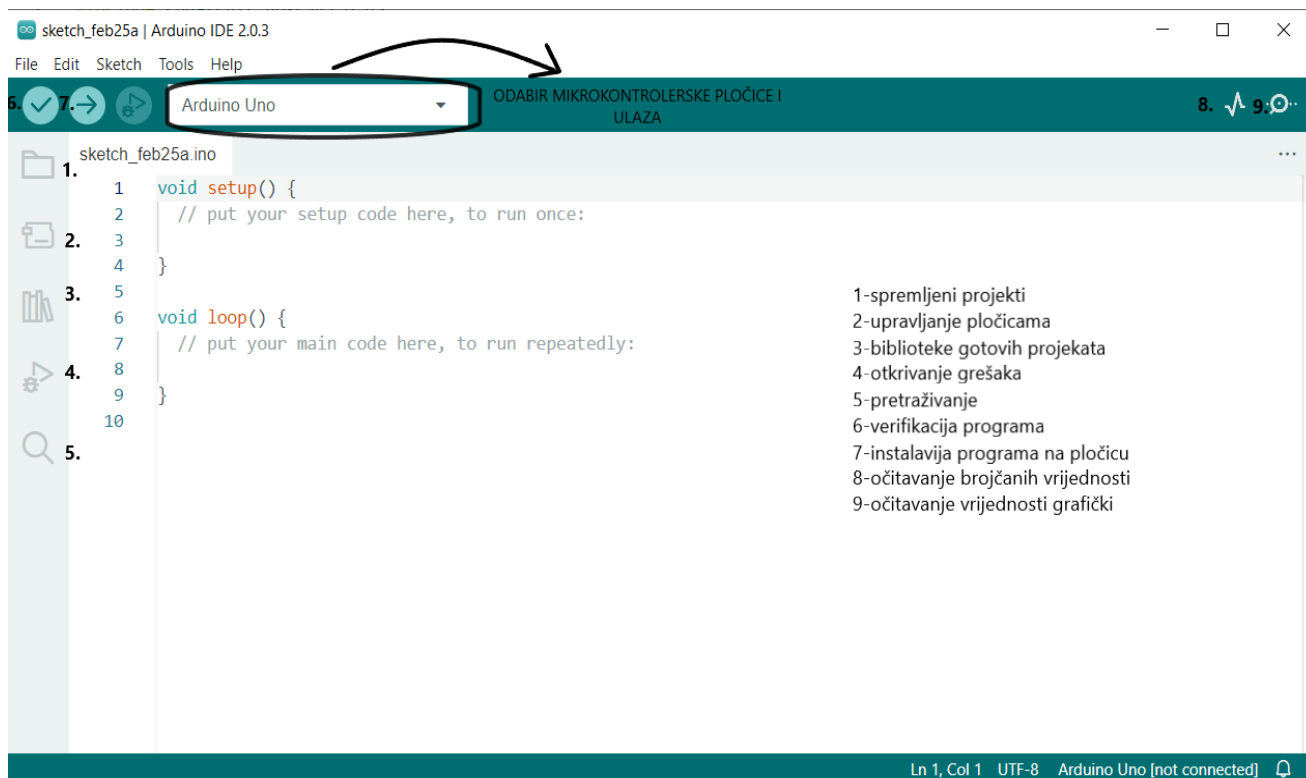
Karakteristike baterije:

- Kapacitet – 10000 mAh / 37 Wh
- Ulazne vrijednosti – 5 V / 3 A, 9 V / 2 A, 12 V / 1.5 A
- Izlazne vrijednosti tip C i PD (*Power Delivery*) – 5 V / 3 A, 9 V / 2 A, 12 V / 1.5 A
- Maksimalna izlazna struja – 3 A

2.6. Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) je besplatni softverski alat razvijen za programiranje Arduino mikrokontrolera. Ovaj alat omogućuje korisnicima da stvore, testiraju i programiraju različite projekte za Arduino platformu. Izgled početnog sučelja softvera vidljiv je na slici 15 [2].

Arduino IDE radi na C++ programskom jeziku, a osim toga podržava i *Wiring* programski jezik, koji je sličan C++-u, ali pojednostavljuje sintaksu i omogućuje korisnicima da brže i lakše pišu kôd za Arduino [2].



Slika 15 Arduino IDE, [6]

Glavne značajke Arduino IDE-a uključuju [2]:

- Jednostavno programiranje - Korisnici mogu lako pisati, prevesti i instalirati kôd na Arduino mikrokontroler s jednostavnim klikom na ikonu
- Veliki broj biblioteka (*libraries*) - IDE uključuje veliki broj ugrađenih biblioteka koje olakšavaju programiranje i omogućuju korisnicima da brzo dodaju funkcionalnosti svojim projektima
- Integrirano sučelje - Korisničko sučelje IDE-a prilagođeno je korisnicima, što olakšava navigaciju i upotrebu

- Serijska komunikacija - Arduino IDE omogućuje korisnicima da komuniciraju s mikrokontrolerom putem serijske veze i provjeravaju vrijednosti senzora u brojčanom, ali i grafičkom obliku, kao i slanje i primanje podataka s drugih uređaja
- Jednostavna instalacija - Arduino IDE je besplatan za preuzimanje i jednostavan za instalaciju na različitim platformama (Windows, Mac i Linux)
- Otvoren izvor(*open source*) - Arduino IDE je otvorenog kôda, što omogućuje zajednici korisnika da oblikuje i poboljšava softver

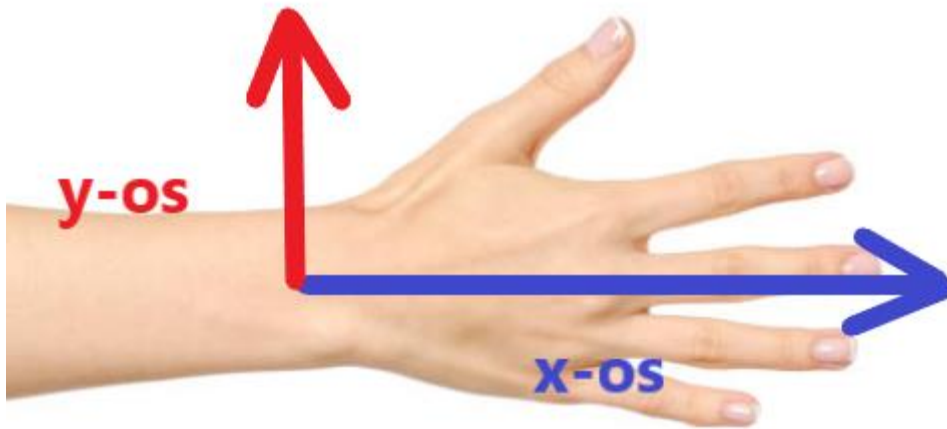
3. IZRADA DALJINSKOG UPRAVLJAČA ZA BESPILOTNU LETJELICU

U ovom poglavlju bit će objašnjena uloga i značenje svake pojedine komponente na rad cijelog sustava za intuitivno upravljanje bespilotne letjelice, a koje su opisane u prethodnom poglavlju.

3.1. Zadaća Arduino Uno pločice

Programabilna pločica Arduino Uno R3 izdvojena je kao glavna komponenta jer se na nju spajaju svi ostali dijelovi. Ona služi kao procesorska jedinica za obradu podataka dobivenih iz senzora pomaka ADXL345. Interpretira vrijednosti pomaka kao veličinu napona koja je potrebna na ulazu u kontroler kako bi on kreirao naredbu za pomicanje drona u željenom smjeru.

Preko iste pločice riješeno je i napajanje svih dijelova. Arduino Uno priključen je na prijenosnu bateriju na napon od 5 V preko svog originalnog USB kabla s kojim se inače spaja na računalo. Zahvaljujući regulatoru napona koji je integriran u Arduino pločicu pojedini dijelovi mogu primiti različite vrijednosti napona jer ne rade svi na istom naponu. Tako je senzor ADXL345 spojen na vrijednost napajanja 3.3 V, matična ploča originalnog kontrolera na 5 V, a izlazi obrađenog signala iz senzora preko pinova D5 i D6 na promjenjive vrijednosti od 0 V do 3.3 V. Izlazi iz pinova 5 i 6 variraju od 0 V do 3.3 V ovisno o položaju senzora po pojedinoj osi. Smjerovi pojedine osi prikazani su na slici 16 na kojoj se vidi da pozitivni smjer x-osi ide u smjeru kažiprsta, a pozitivni smjer y-osi ide u smjeru palca, taj smjer se podudara sa x i y osima koje pokazuje akcelerometar.



Slika 16 smjer djelovanja x i y osi, [9]

3.2. Programiranje pločice

Na Arduino pločicu instaliran je kod kojim se prikupljaju i obrađuju podaci sa senzora, te se isti preko PWM izlaza 5 i 6 šalju prema RC filteru. Izabrani su izlazi 5 i 6 jer je njihova frekvencija 980 Hz što odgovara vrijednostima potrebnim za daljnju obradu u RC filterima. Navedeni kod s objašnjenjima pripadajućih funkcija nalazi se u tablici 2.

Tablica 2 Kod pomoću kojega sustav prikuplja i obrađuje podatke

```
#include <SparkFun_ADXL345.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>
#include <Wire.h>
#include <ADXL345.h>
//Da bi cijeli sustav zajedno funkcionirao potrebno je uključiti 4 navedene
//biblioteke
//Jedna od njih omogućuje I2C komunikaciju, a preostale tri definiraju rad
//samog senzora

ADXL345 adxl;
const int x_pin = 5, y_pin = 6;
int x_in, x_int, y_in, y_int, z_in, x_out, y_out;
//Definiranje izlaznih pinova i deklariranje varijabli
void setup() {
  adxl.powerOn(); //Funkcija koja uključuje senzor
  Serial.begin(9600);
  pinMode(x_pin, OUTPUT);
  pinMode(y_pin, OUTPUT);
  //Funkcija koja daje tražene podatke o pomaku sa senzora na određene izlazne
  //pinove
```

```

}

void loop() {
  adxl.readAccel(&x_in, &y_in, &z_in);

  x_int = map(x_in, -255, 255, 0, 168);
  y_int = map (y_in, -255, 255, 0, 168);

  //Senzor daje 8-bitne vrijednosti što znači da ima 2^8 različitih vrijednosti
  podataka odnosno od 0 do 255, što je ukupno 256 vrijednosti po svakoj osi
  //u pozitivnu , ali i u negativnu stranu pa je ukupno kretanje izlaznih
  vrijednosti od -255 do 255.
  //Kada se to pretvori u volte dobije se da je izlazna vrijednost -255 = 0 V, a
  255 = 5V, jer izlaz iz mikrokontrolera može biti 0-5 V.
  //Originalni kontroler na svojim potencimetrima, kojima upravlja kretanje
  drona, koristi vrijednosti napona 0 - 3.3 V.
  //Zbog toga se maksimalne izlazne vrijednosti moraju ograničiti na 3.3 V
  umjesto navedenih 5V.
  //Prema omjeru 0:255 = 0 v :5 v, dobije se da je 0 v:3.3 v = 0:168 jer je 3.3
  v:5 v = 168:255
  //Zbog toga su funkcijom "map" konačne izlazne vrijednosti postavljene u
  granicama od 0 do 168.

  if (x_int > 64 and x_int < 104){
    x_out = 84;
  }
  else{
    x_out = x_int;
  }
  //Ekvivalentno gore navedenom kada kontroler dronu ne daje nikakve naredbe
  napon na potencimetru iznosi 1.65 V što prema gornjem omjeru iznosi 84.
  //Vrijednosti od 64 do 104 su tako zvani pojas tišine jer unutar tih vrijednosti
  izlaz je 84 odnosno ne šalje se nikakva naredba dronu.
  //To je postavljeno tako da se priguše bilo kakve naredbe koje bi mogle biti
  nenamjerno izazvane slučajnim malim pomakom ili trešnjom senzora.
  if (y_int > 64 and y_int < 104){
    y_out = 84;
  }
  else{
    y_out = y_int;
  }
  analogWrite(3, 255);
  analogWrite(x_pin, x_out);
  analogWrite(y_pin, y_out);
}

```

```
Serial.print(x_out); Serial.print(" ");  
Serial.print(y_out); Serial.println(" ");  
}  
//Zadnje dvije funkcije služe za brojčano i grafičko prikazivanje podataka sa  
senzora u interaktivnom Arduino IDE softverskom paketu.
```

3.3. Napajanje sustava

Ciklus stvaranja signala započinje od prijenosne baterije koja napaja cijeli sustav. Cijeli sustav ima vrlo nisku potrošnju energije u mirovanju što dovodi do isključivanja napajanje baterije nakon 30 sekundi jer je opterećenje na njoj toliko malo da ne prepoznaje da je uopće uključena u strujni krug. Zbog toga su u strujni krug uvedena dva paralelno spojena otpornika svaki vrijednosti $R = 432 \Omega$. Prema formuli 3 dobijemo da je njihova ukupna vrijednost 216Ω .

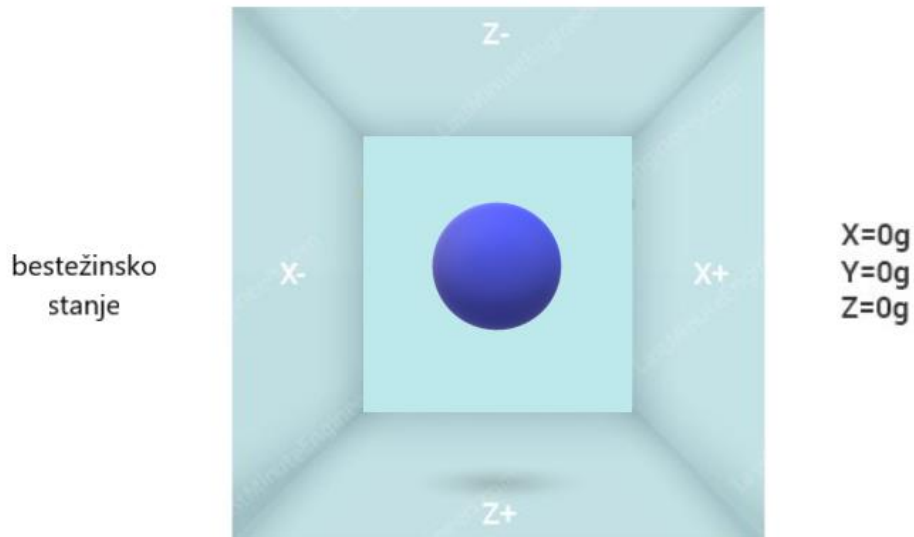
$$R_{UK} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \quad (3)$$

Eksperimentalno je utvrđeno da je to dovoljna vrijednost otpora kako bi baterija stalno prepoznavala opterećenje i tako ostala uključena za cijelo vrijeme rada. Napajanje prvo ide u Arduino Uno nakon čega se preko regulatora napona grana na sve ostale dijelove.

3.4. Uloga i princip rada akcelerometra

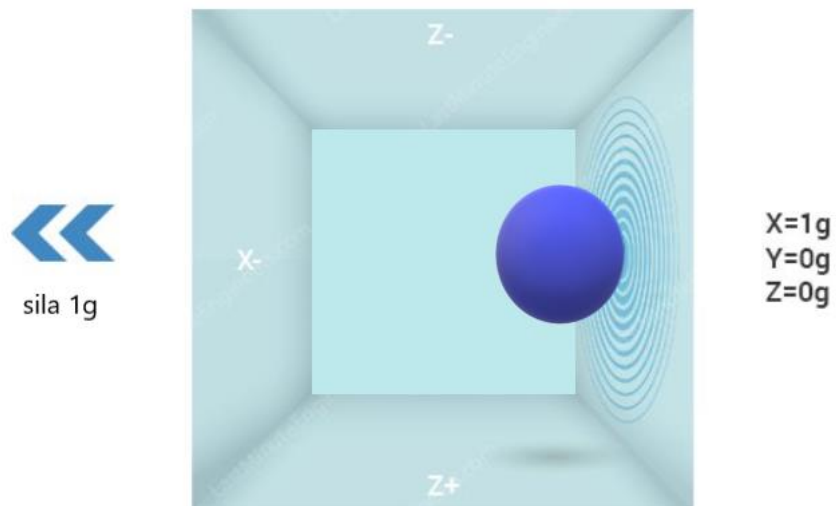
3.4.1. Djelovanje sila u akcelerometru

Kako bi se lakše prikazalo kako akcelerometri funkcioniraju može se zamisliti kugla unutar kocke. Pretpostavlja se da svaki zid predstavlja određenu os. Pod pretpostavkom da je kocka u svemiru, gdje je sve bestežinsko, kugla će jednostavno lebdjeti u središtu kocke kao što možemo vidjeti na slici 17.



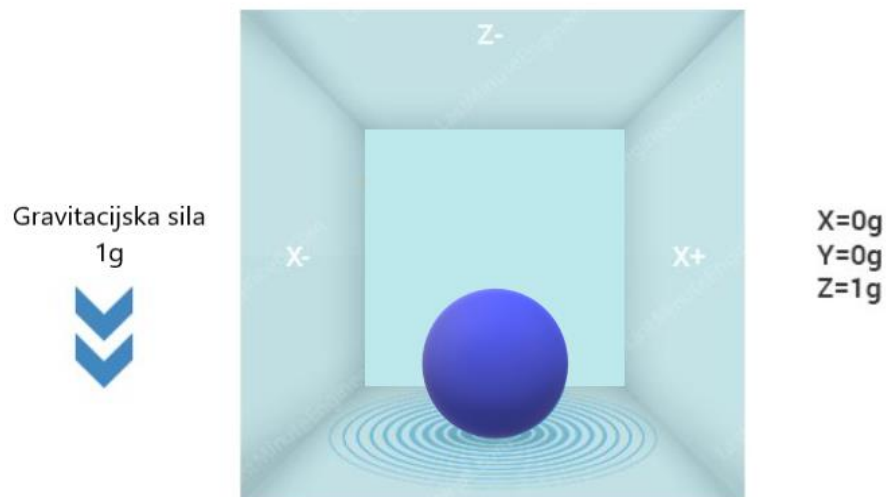
Slika 17 Djelovanje sile u bestežinskom stanju, [9]

Ako se kocka iznenada pomakne ulijevo s akceleracijom iznosa 1 g kao što je prikazano na slici 18, lopta će nedvojbeno udariti u zid X. Ako se izmjeri sila kojom lopta djeluje na zid X, može se dobiti izlazna vrijednost od 1 g duž X osi [10].



Slika 18 Djelovanje sile duž x osi, [9]

Kada se ta kocka postavi na Zemlju kugla će jednostavno pasti na zid Z, djelujući silom od 1 g kao što je prikazano na slici 19.



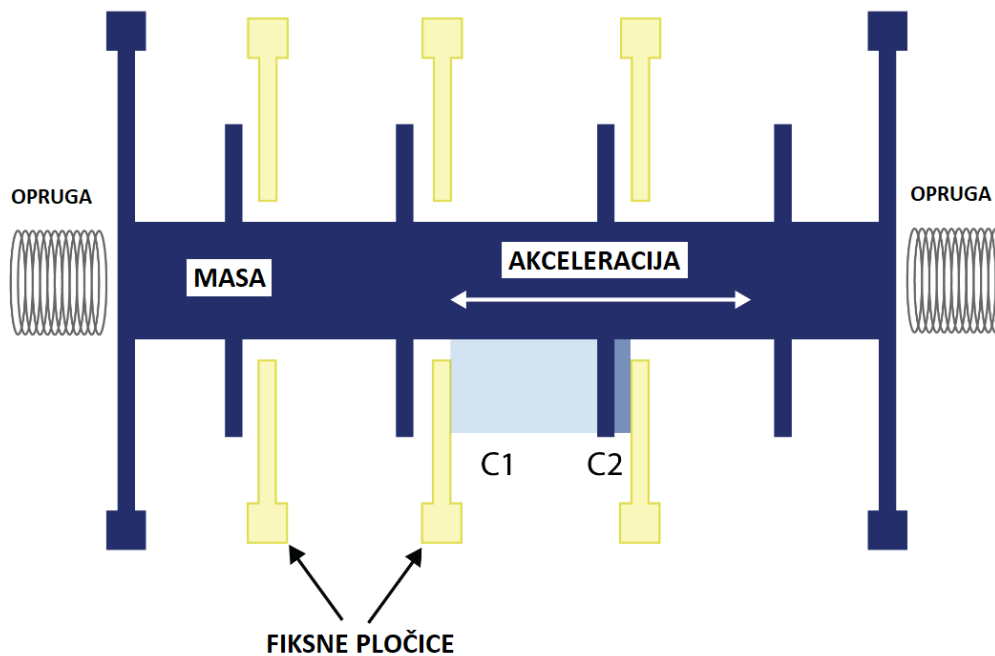
Slika 19 Djelovanje gravitacijske sile, [9]

U ovom slučaju, kocka se ne miče, ali još uvijek dobivamo očitavanje od 1 g na Z osi. To je zato što gravitacija (koja je zapravo oblik ubrzanja) vuče kuglu prema dolje silom od 1 g [10].

Iako ovaj model ne predstavlja točno kako je izgrađen senzor akcelerometra u stvarnoj primjeni, često je koristan za razumijevanje zašto je izlazni signal akcelerometra obično naveden u $\pm g$, ili zašto akcelerometar očitava 1 g na z-osi u mirovanju, ili koja se očitavanja akcelerometra mogu očekivati pri različitim orijentacijama.

3.4.2. Mikro elektro-mehanički sustav

Mikro elektro-mehanički sustav - MEMS mjeri ubrzanje mjerenjem promjene kapacitivnosti. Njegova mikro struktura izgleda otprilike kao na slici 20. Ima masu pričvršćenu na oprugu koja je ograničena na kretanje u jednom smjeru i fiksne vanjske ploče. Dakle, kada se primijeni ubrzanje u određenom smjeru, masa će se pomaknuti i kapacitet između ploča i mase će se promijeniti. Ova promjena u kapacitetu će se izmjeriti, obraditi i odgovarat će određenoj vrijednosti ubrzanja. Slika prikazuje sustav mjerenja po jednoj osi, dakle ako je potrebno mjerenje po sve tri osi trebamo tri takva sustava od kojih je svaki smješten u svojoj osi mjerenja [3].



Slika 20 Shematski prikaz mikro strukture akcelerometra, [3]

3.4.3. Spajanje akcelerometra u sustav

ADXL345 pinovima je spojen na Arduino Uno prema sljedećem rasporedu:

- VCC – 3.3 V (napajanje)
- GND – GND (uzemljenje)
- SDA – A4 (podatkovna sabirnica)
- SCL – A5 (prijenos takta)

Blok shema spajanja akcelerometra na Arduino pločicu vidljiva je ispod na blok shemi cijelog sučelja, a značenje svakog pina objašnjeno je u tablici 1.

Pomicanjem ruke, odnosno senzora koji je na ruci, senzor bilježi pomak i preko linije za prijenos podataka šalje informacije prema Arduino. Arduino kao procesorska jedinica pomoću koda koji je ranije napisan i učitao na pločicu obrađuje, analizira i interpretira dobivene podatke kako bi sljedeći sklop „razumio“ što mu senzor „govori“.

Podaci su sortirani po x i y osima i pretvoreni u vrijednosti napona. Vrijednosti po x-osi pojavljuju se na izlazu D5, a vrijednosti po y-osi na izlazu D6 i to kao PWM signal, što znači da još

uvijek nije spreman za ulaz u kontroler, odnosno kada bi ušao bez daljnje obrade cijeli sustav nebi radio ispravno.

3.5. RC filteri

Sljedeća komponenta kroz koju prolazi signal u sustavu je RC filter čija shema je prikazana na slici 11. RC filter svojim karakteristikama, koje su objašnjene u prijašnjem poglavlju, pretvara pulsno-širinsko modulirani signal u analogni signal koji je potreban da bi kontroler ispravno radio. RC filter je sa svoje ulazne strane spojen na izlaze D5 i D6 iz Arduina, a njegovi analogni izlazi su spojeni na srednji signal-pin na potenciometru koji se nalaze na kontrolnoj ploči. Krajevi filtera spojeni su na uzemljenje.

Vrijednosti otpornika (R) i kondenzatora (C) u RC filteru mogu se izračunati prema formuli (4) na temelju granične frekvencije (f_c) koja se želi filtrirati. Granična frekvencija je frekvencija na kojoj RC filter počinje smanjivati amplitudu signala [4].

$$f_c = \frac{1}{2\pi * RC} \quad (4)$$

Gdje je:

- f_c – *cutoff frequency*, granična frekvencija
- R – vrijednost otpora
- C – kapacitet kondenzatora

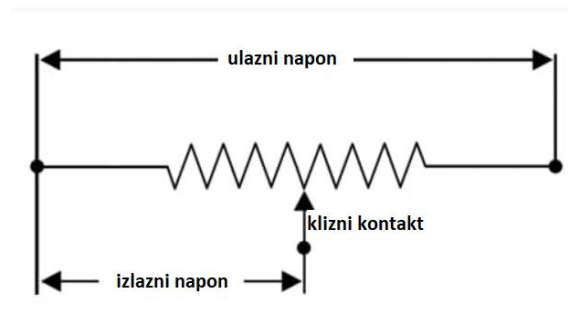
Uvrštavanjem poznatih vrijednosti komponenti korištenih u radu u gornju formulu gdje je:

- C = 10 μ F
- f_c = 980 Hz

Dobiveno je da je za idealnu pretvorbu potrebna vrijednost otpora u RC filteru 16.24 Ω . No kako je maksimalna izlazna struja iz Arduina 40 mA, a napon 5 V, prema formuli $R_{min} = \frac{U}{I_{max}}$ dobije se da je minimalna vrijednost otpora, koji se mora koristiti kako Arduino nebi izgorio, $R_{min}=125 \Omega$. Kako su RC filter i Arduino spojeni u sklopu s ostalim komponentama čije su vrijednosti nepoznate, eksperimentalno je utvrđeno da cijeli sklop najfluidnije i bez ikakvih smetnji radi pri vrijednostima otpora R=200 Ω i kapaciteta C=10 μ F.

3.6. Uloga potenciometra na transmieru

Potenciometar je vrsta otpornika s promjenjivim i podesivim otporom koji se kontrolira kliznim ili rotirajućim kontaktom. U ovom slučaju klizni kontakt se pomiče upravljačkim palicama na kontroleru. Da bi se regulirao otpor, potenciometar djeluje kao djeliteľ napona, smanjujući ili povećavajući izlazni napon upravljanjem vrijednosti otpora. Blok shema potenciometra vidi se na slici 21. Potenciometar ima dva ulaza: uzemljenje i napajanje i jedan izlaz koji je srednji pin na kojemu izlazi rezultatni napon koji ovisi o položaju kliznog kontakta.

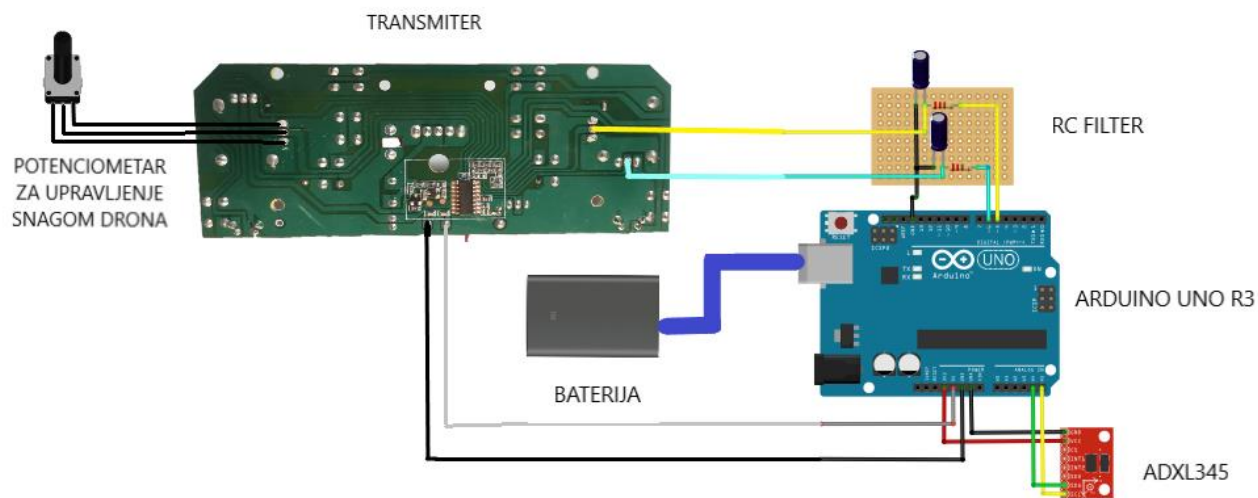


Slika 21 Blok shema potenciometra, [10]

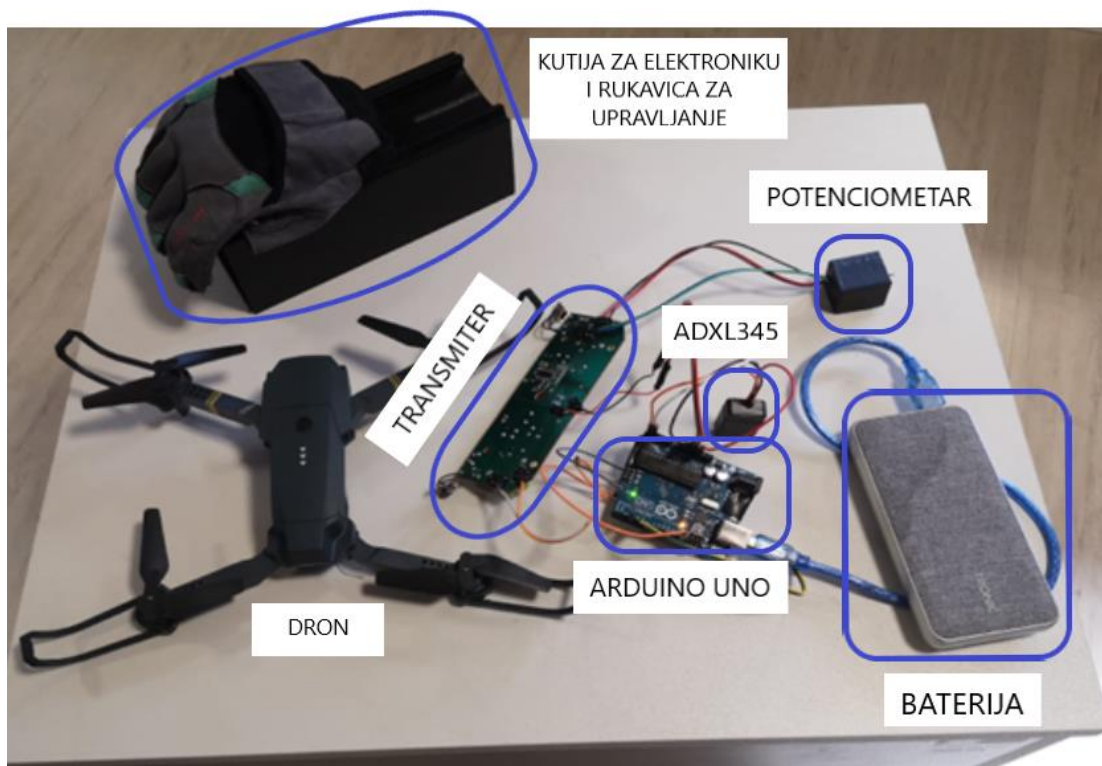
Dakle napon koji se inače mijenja pomicanjem kliznog kontakta, koji su upravljačke palice, sada ostaje nepromijenjen i iznosi 1.65 V, a rezultatni napon na srednji pin dolazi iz RC filtera i njegova vrijednost ovisi o položaju senzora.

Visinom drona, odnosno ukupnom snagom drona upravlja se odvojenim potenciometrom kojim se upravlja palcem ruke na kojoj je i senzor, a njegova pozicija je vidljiva na slici 22. Taj odvojeni potenciometar ima iste karakteristike i način rada kao i originalni potenciometar na kontroleru, ali je odvojen samo radi jednostavnijeg upravljanja.

Posljednja komponenta u strujnom krugu je transmier. Njegova uloga je prijem podataka sa senzora i slanje istih prema dronu. Komunikacija sa samim dronom vrši se preko unaprijed određenih protokola koje je definirao sam proizvođač i oni nisu podložni promjenama. Na slici 22. prikazana je blok shema cijelog sučelja za upravljanje dronom pokretima ruku, a na slici 23 vidi se kako to u stvarnosti izgleda sve spojeno. Na slici 23 samo nije vidljiv RC filter je on zaljepljen sa donje strane Arduino pločice.



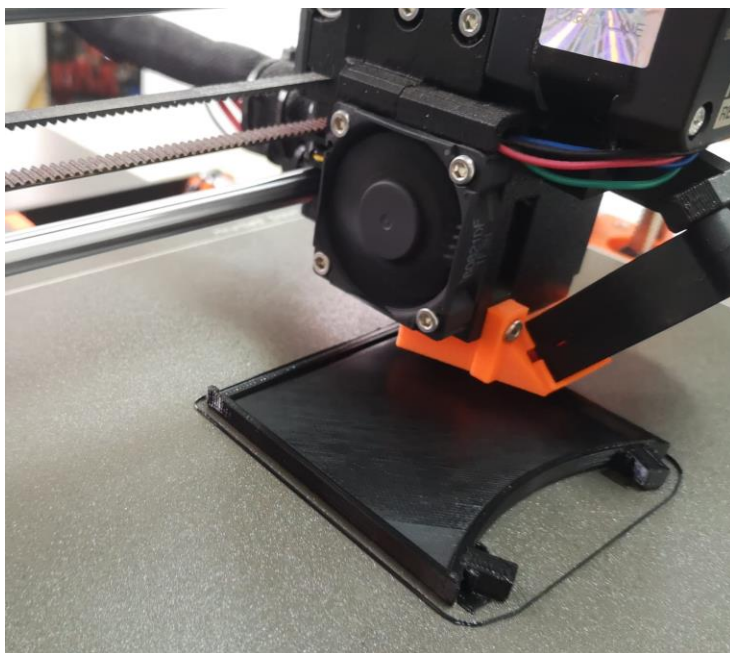
Slika 22 Blok shema cijelog sučelja



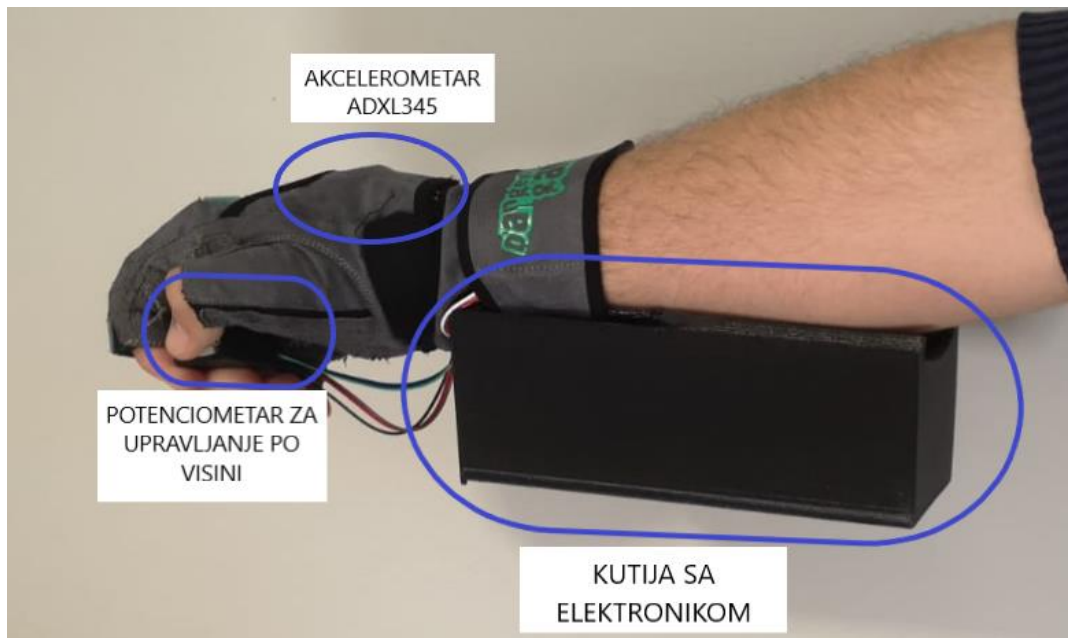
Slika 23 Izgled sastavljenog sučelja sa svim komponentama

3.7. 3D printanje i završni izgled

Poznato je kako su elektroničke komponente osjetljive na vanjske utjecaje. Iz tog razloga cijelo sučelje postavljeno je u plastične kutijice kako bi se sačuvalo od oštećenja, potencijalnog otpajanja žica tijekom eksploatacije, radi lakšeg rukovanja, a i kako bi cijelo sučelje bolje izgledalo. Za cijelo sučelje bile su potrebne tri kutijice. Jedna za sam akcelerometar, jedna za potenciometar kojim se upravlja snagom drona, a jedna za ostale komponente. Akcelerometar i potenciometar su izdvojeni radi lakšeg upravljanja. Kutijice su kreirane i nacrtane u programu *Revit 2023*, a izrađene printanjem pomoću 3D printera. Proces printanja kutije za elektroniku vidljiv je na slici 24, a završni izgled cijelog sučelja za upravljanje dronom pokretima ruku spremnog za korištenje prikazan je na slici 25. Na slici 25 prikazana je i rukavica koja dosad nije bila spominjana, a njezina uloga je da drži sve komponente zajedno i tako olakšava upravljanje bespilotnom letjelicom.



Slika 24 Proces printanja plastične kutije na 3D printeru

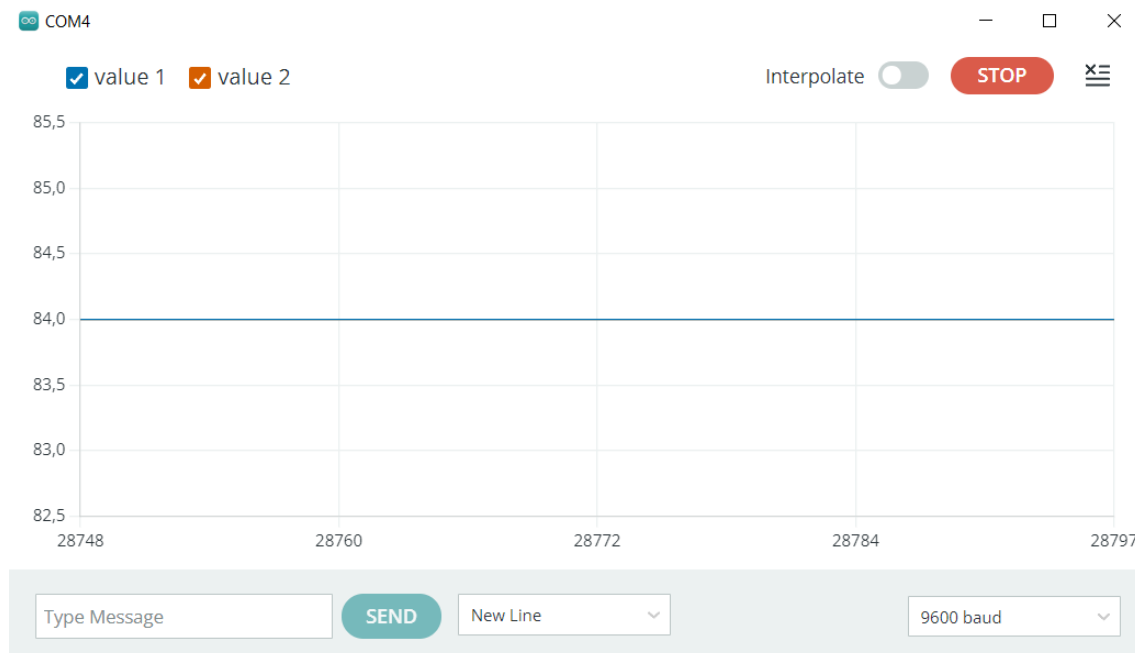


Slika 25 Završni izgled sučelja za upravljanje dronom pokretima ruke spremnog za korištenje

4. ANALIZA PODATAKA DOBIVENIH SA SENZORA

Ovo poglavlje analizira i interpretira vrijednosti dobivene sa senzora pokreta. Prikazuje promjene nagiba senzora grafički, objašnjava kako one utječu na promjene napona na izlazu i prikazuje kako te promjene napona utječu na kretanje bespilotne letjelice.

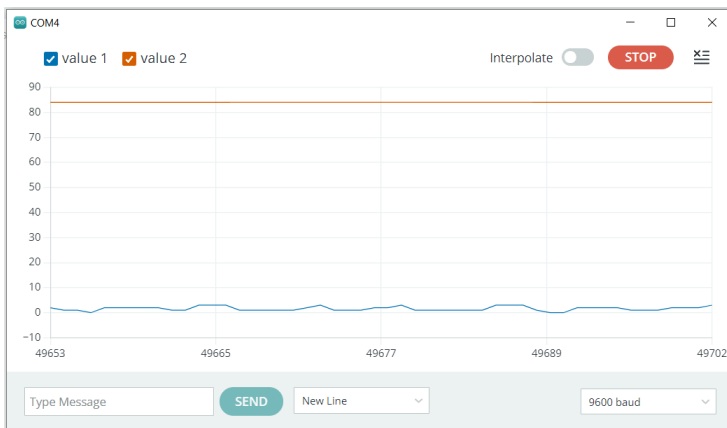
Dakle ako je pločica u horizontalnom položaju vrijednosti napona po obje osi bi trebale biti 1.65 V. Trebale bi biti 1.65 V, a ne 0 V kao što je očekivano jer se vrijednosti na kontroleru kreću od 0 - 3.3 V pa je 1.65 V sredina, odnosno neutralna vrijednost. Primjerice ako se gledaju vrijednosti po X-osi i ako je vrijednost napona 0 V – 1.65 V dron je programiran tako da se pri toj vrijednosti napona kreće unaprijed, a ako je vrijednost napona 1.65 V – 3.3 V dron će se kretati unazad. Što je veća udaljenost vrijednosti napona od središnje neutralne vrijednosti od 1.65 V to će se dron brže kretati u željenom smjeru. Analogno tome vrijedi i za y-os odnosno kretanje lijevo ili desno. Na slici 26 prikazane su vrijednosti izlaznog napona kada je senzor u horizontalnom položaju.



Slika 26 Izlazne vrijednosti senzora kad je senzor u horizontalnom položaju

Plavom bojom su prikazane vrijednosti po osi x, a crvenom bojom po osi y. U ovom slučaju crvena boja se ne vidi jer ju je plava prekrila, ali u ostalim slučajevima će biti vidljiva. Na slici 26 se vidi da obje vrijednosti čvrsto stoje na broju 84 odnosno 1.65 V, a povezanost broja 84 i 1.65 V opisana je gore u programskom dijelu kao komentari u kodu.

Na slici 27 vidi se da pomicanjem senzora prema naprijed vrijednost po x-osi padne približno na nulu i varira oko te vrijednosti zbog vibracija, a crvena linija ostaje nepomična na vrijednosti 84, dakle nema pomaka lijevo-desno.



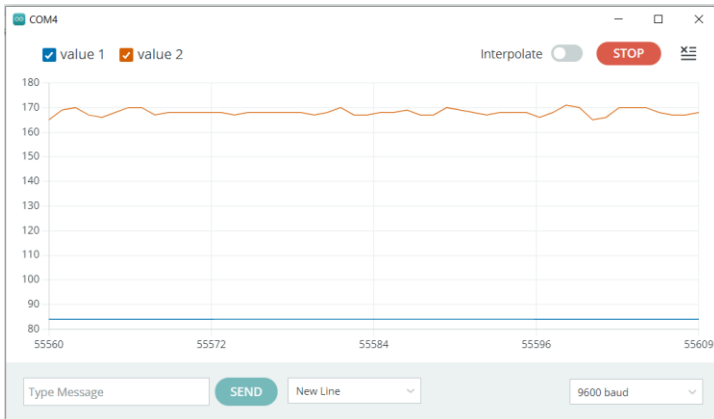
Slika 27 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut naprijed



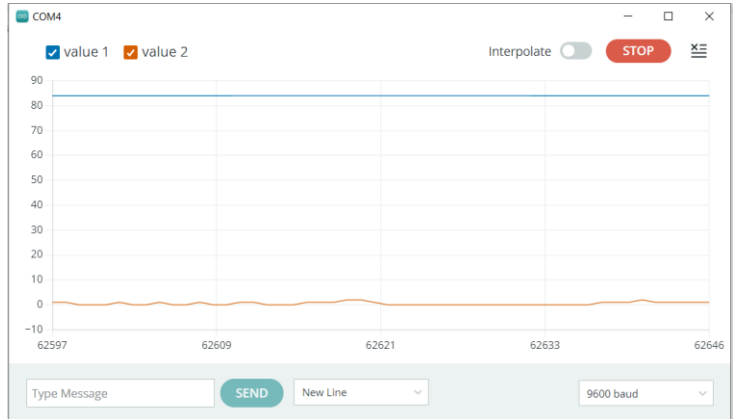
Slika 28 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut unazad

Na slici 28 se vidi da kad se senzor nagne prema nazad odnosno u negativnom smjeru x-osi da vrijednost po x-osi prikazana plavom bojom poraste na otprilike 168 što je ekvivalent 3.3 V i nastavi blago varirati oko te vrijednosti zbog povremenih vibracija i pomaka ruke. A vrijednost y-osi, prikazana crvenom, ostaje na 84 što znači da nije bilo pomaka po toj osi.

Kod promjene položaja senzora samo po y-osi situacija s izlaznim vrijednostima je obrnuta nego što je bio slučaj kod promjena po x-osi. Vrijednosti pomaka po y-osi nakon obrade šalju se na izlaz iz Arduina D6. Slika 29 prikazuje izlazne vrijednosti senzora kada se on nagne udesno. Vidljivo je da vrijednosti prikazane crvenom bojom, narastu do 168 što je ekvivalent 3.3 V i nastavljanju oscilirati oko te vrijednosti radi vanjskih vibracija. Plava linija ostaje fiksirana na vrijednosti 84 što znači da nije bilo pomaka po x-osi.



Slika 29 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut udesno

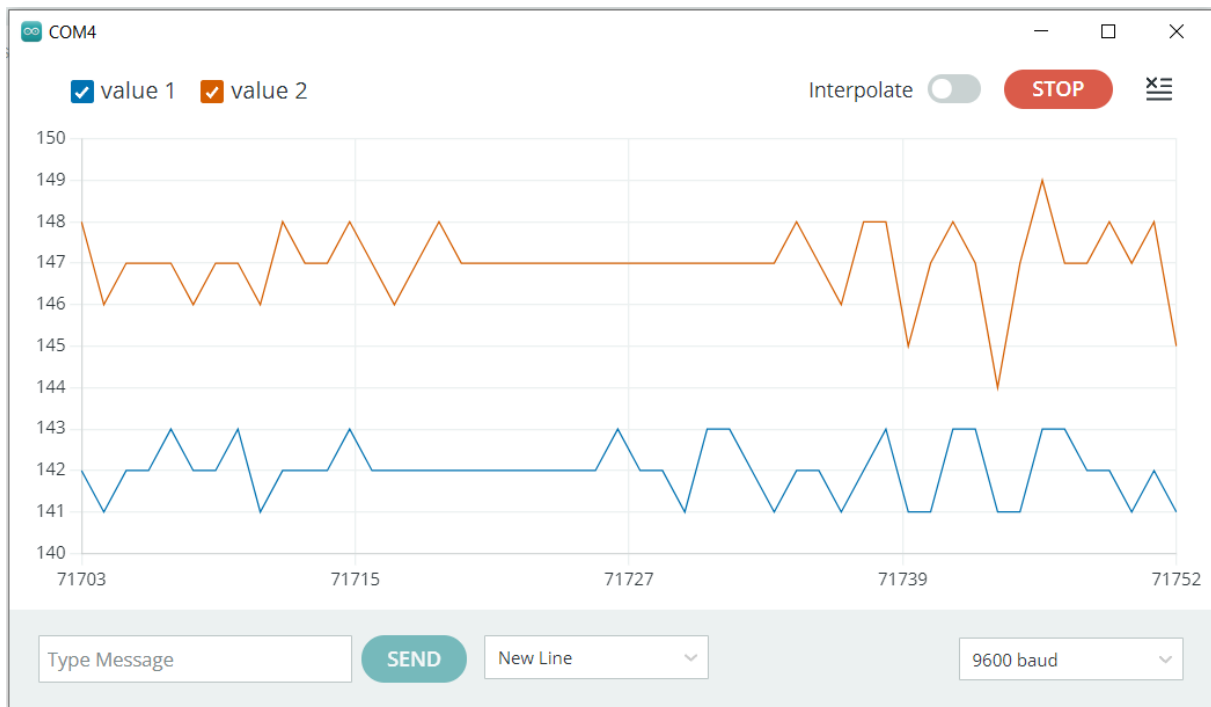


Slika 30 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut ulijevo

Slika 30 prikazuje utjecaj nagiba senzora na izlazne vrijednosti. Crvena linija predstavlja varijaciju vrijednosti oko nule, što uzrokuje pad vrijednosti na izlazu D6. To znači da kada je senzor nagnut ulijevo, napon na izlazu D6 je 0 V, što dovodi do skretanja drona u lijevo. Plava linija ostaje fiksna na vrijednosti 84, što znači da nema pomaka po x-osi.

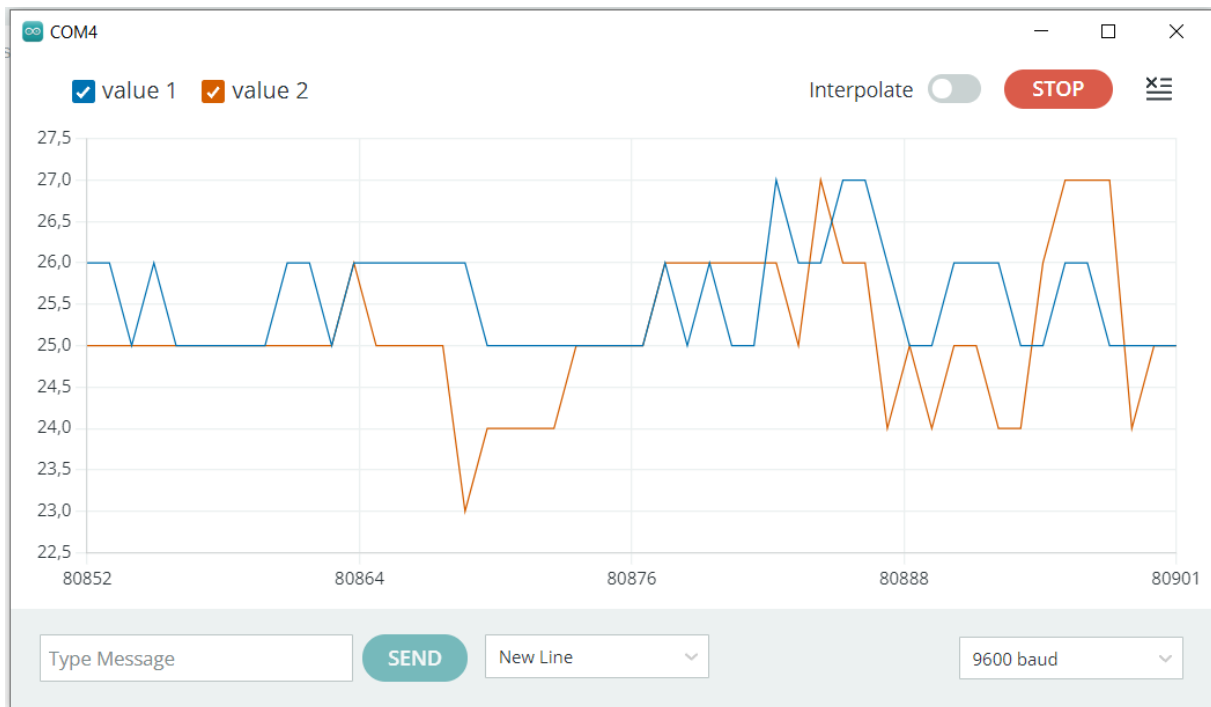
Na slici 31, prikazana je kombinacija pomaka senzora prema nazad i desno. U ovom slučaju, obje krivulje su iznad neutralne vrijednosti od 84, ali nijedna ne dostiže maksimalnu vrijednost od 168. To je zato što senzor u mirovanju osjeća akceleraciju od 1 g, koja se raspoređuje po svim osima. Kada se ta vrijednost pretvori u ekvivalentne naponske vrijednosti, 1 g bi predstavljalo 5 V ili 2^8 informacija u 8-bitnom formatu. Stoga, ukupna vrijednost može biti u rasponu od 0 do 255.

Budući da kontroler radi u rasponu od 0 V do 3.3 V, izlazna vrijednost je ograničena na 168. To znači da su vrijednosti po obje osi ograničene na intervalu od 1.65 V do 3.3 V. Raspodjela osjeta na dvije osi ima za posljedicu da dron i dalje kreće prema nazad-desno, ali s manjom brzinom nego što bi se kretao da se koristi originalni kontroler. To je zato što bi se originalnim kontrolerom postigle maksimalne vrijednosti po obje osi, što bi dovelo do većeg nagiba drona u željenom smjeru.



Slika 31 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut nazad-desno

Na slici 32 vidi se kombinacija pomaka senzora naprijed i lijevo. U ovom slučaju obje krivulje su ispod neutralne vrijednosti od 84, ali ni jedna nije na punom odklonu tj. ne doseže vrijednost 0. Vrijednosti nisu u očekivanoj nuli prema gornjem objašnjenju o raspodjeli osjeta po osima koje analogno vrijedi i za ovaj primjer samo u suprotnom smjeru. Iz navedenih razloga vrijednosti po obje osi se kreću u intervalu od 0 V do 1.65 V. Raspodjela ukupnog osjeta na dvije osi ima za posljedicu da se dron i dalje kreće naprijed-lijevo, ali manjom progresivnom brzinom nego što bi se kretao da se upravlja originalnim kontrolerom jer bi njime mogao postići maksimalne vrijednosti po obje osi i dron bi se mogao više nagnuti u željnom smjeru.

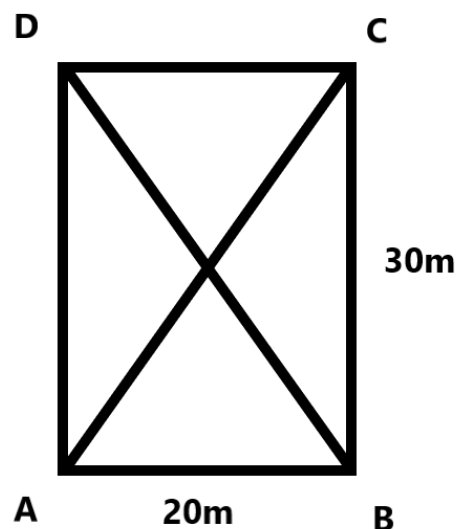


Slika 32 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut naprijed-lijevo

5. EKSPERIMENT UTVRĐIVANJA FUNKCIONALNOSTI SUČELJA ZA UPRAVLJANJE DRONOM POKRETIMA RUKU

5.1. Opis izvođenja eksperimenta

Eksperimentom je testirana upravljivost drona pokretima ruku pomoću prethodno napravljenog sučelja za intuitivno upravljanje dronom. Za testiranje upravljivosti napravljena su dva eksperimentalna leta. Prvi let odrađen je korištenjem klasične radio stanice s načinom upravljanja preko dvije palice, a drugi let je izveden korištenjem sučelja za upravljanje dronom pokretima ruku. U oba slučaja korišten je isti dron prikazan na slici 3 i opisan u poglavlju 2.1. Korišten je isti dron kako bi se eliminirala odstupanja od putanje uzrokovana različitim performansama samog drona. Također letovi su u oba slučaja izvedeni po istom poligonu kako bi se mogle usporediti njihove putanje. Na slici 33 je shematski prikazan tlocrt poligona kojim dron leti za vrijeme testiranja upravljivosti.



Slika 33 Tlocrt poligona za testiranje

Vrhovi poligona su označeni slovima A, B, C i D radi lakšeg snalaženja i shvaćanja cijelog procesa testiranja. Stranica AB je duljine 20 metara, a stranica BC 30 metara. Slika poligona nije u mjerilu. Odabran je baš ovakav oblik poligona jer se tako može testirati kretanje drona u svim

smjerovima po x i y osima, a time i njegova upravljivost po svim osima kao i kombinacijama osi. Redoslijed kretanja drona u letu i naredbe upravljanja koje se pritom testiraju su:

1. AC > naprijed-desno
2. CB > unazad
3. BD > naprijed-lijevo
4. DB > nazad-desno
5. BA > ulijevo
6. AD > naprijed
7. DC > udesno
8. CA > nazad-lijevo

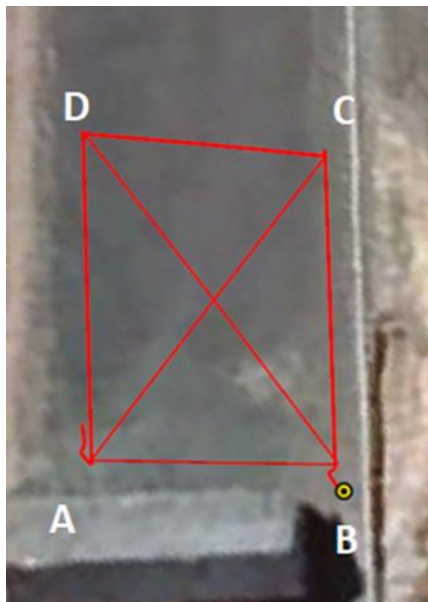
Odabran je taj redoslijed jer tako dron preleti u svakom smjeru, u kojem se testira, točno jednom.

Dakle testiranje se temelji na uspoređivanju upravljivosti između dva navedena načina upravljanja, a parametar koji se promatra kao mjera upravljivosti je odstupanje od namjeravane putanje. Kao referentna putanja postavljena je ona koja je napravljena po poligonu hodanjem i nošenjem GPS prijemnika, koji je kasnije korišten i na dronu. Kako dron nema svoj integrirani GPS prijemnik korišten je prijemnik s pametnog sata *Garmin Fenix 6 Solar*, dakle pametni sat je pričvršćen za dron za vrijeme testiranja i tako je praćena putanja drona. Slika 34 prikazuje kako izgleda dron i njegov GPS prijemnik odnosno pametni sat pričvršćen za dron.



Slika 34 GPS prijemnik pričvršćen za dron

Na slici 35 je prikazana referentna putanja kojom će dron letjeti, odnosno poligon za let. Prikazan je na stvarnom mjestu gdje će se i izvoditi pomoću aplikacije *Google Earth Pro* u koju su podaci uvezeni nakon sinkronizacije.



Slika 35 Referentna putanja

Poligon je napravljen tako da je pametni sat fizički stavljen na četiri vrha A, B, C i D kao s prethodne slike i uključena je funkcija sata „Prati me“ što daje signal prijemniku da uključi geopozicioniranje. Tako je dobiven pravokutni oblik, a dijagonale su nastale spajanjem dobivenih točaka. Na slici 35 je vidljivo kako je na referentnoj putanji vrh D prikazan izduženo, pretpostavka je da je takav prikaz nastao jer je zemljište na kojem je izvođen eksperiment na tom dijelu 0.6 m niže od ostatka pa je nastala deformacija prikaza.

Nakon završetka geolociranja treba pritisnuti tipku „Završi“ i „Spremi“. Pametni sat je potrebno sinkronizirati s pametnim telefonom s kojim je spojen preko aplikacije *Garmin Connect* i tek tada su prikupljeni podaci spremni za daljnju obradu i analizu. Slika 36 prikazuje korišteni pametni sat *Garmin Fenix 6 Solar* s uključenom funkcijom za geolociranje.



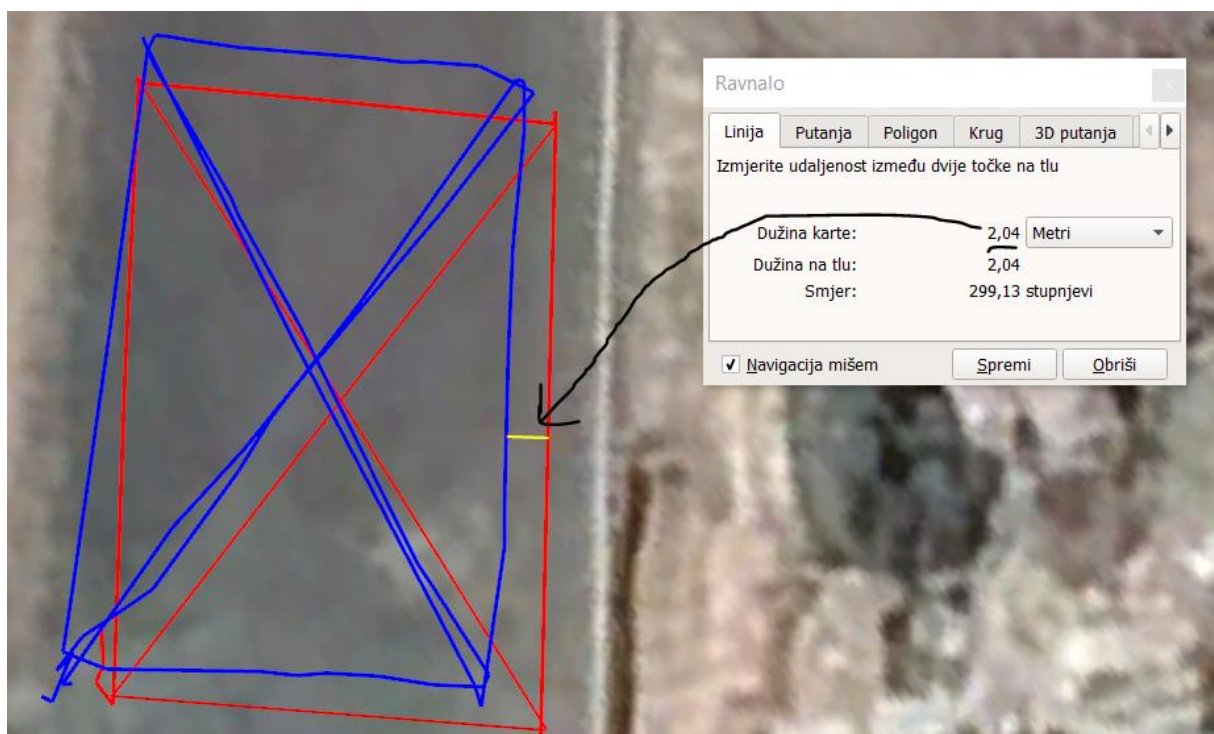
Slika 36 Garmin Fenix 6 Solar, [11]

Pretpostavka je da ovakvo testiranje upravljivosti nije apsolutno točno jer veliku ulogu u vrijednostima odstupanja ima ljudski faktor i ljudsko nesavršeno korištenje sučelja jer vjerojatno bi dvije različite osobe isti poligon odletjele s različitim odstupanjima od referentne putanje. Drugi razlog nesavršenosti ovakvog testiranja su moguće greške u pozicioniranju iako se radi o relativno preciznom prijemniku, veličina poligona je relativno mala tako da i najmanja greška ima znatan utjecaj.

5.2. Mjerenje odstupanja za let u kojem je dronom upravljano preko klasičnog načina upravljanja

Na svakoj etapi poligona izračunato je srednje odstupanje od referentne putanje koje je dobiveno kao srednja vrijednost izmjerenih udaljenosti na svakoj petini etape. Udaljenosti su izmjerene pomoću alata „Ravnalo“ unutar aplikacije *Google Earth Pro*, a primjer mjerenja prikazan je na slici 37 gdje se vidi da je udaljenosti između plave i crvene linije 2.04 m. Isti proces ponovljen je pet puta na svakoj etapi dakle 40 mjerenja za jedan poligon. Slika 37 ujedno prikazuje kako u prostoru izgledaju referentna putanja i ona nastala klasičnim upravljanjem. Vidljivo je kako

je cijeli poligon pomaknut ulijevo i gore. Pretpostavlja se da je utjecaj na takvo prikazivanje nastalo radi greške prijemnika, a uzrok tome može biti kretanje drona jer je proces nastanka crvene putanje bio statičan odnosno bez kretanja prijemnika jer je pozicija točaka A, B, C i D zabilježena postavljanjem prijemnika iznad točaka, za svaku točku posebno i u mirovanju, a plava putanja je nastala bilježenjem pozicije drona u letu. Drugi mogući uzrok može biti već ranije navedena razlika u visinama terena.



Slika 37 Primjer mjerenja odstupanja između putanje nastale klasičnim upravljanjem i referentne putanje

Mjerenje odstupanja je napravljeno redoslijedom kojim je dron letio. Pretpostavka je da navedeno određivanje srednjeg odstupanja od referentne putanje nije apsolutno točno, jer bi za potpunu preciznost trebalo beskonačno mnogo mjernih točaka što nije izvedivo, a smatra se da je ovaj način dovoljno precizan za potrebe testiranja.

U tablici 3 prikazani su rezultati mjerenja odstupanja putanje kojom je upravljano klasičnom radio stanicom od referentne putanje. Podaci su prikazani po etapama gdje je mjereno

odstupanje na svakoj petini etape kako bi se dobilo srednje odstupanje od referentne putanje po etapama, a također prikazano je i srednje odstupanje cijelog poligona od referentne putanje.

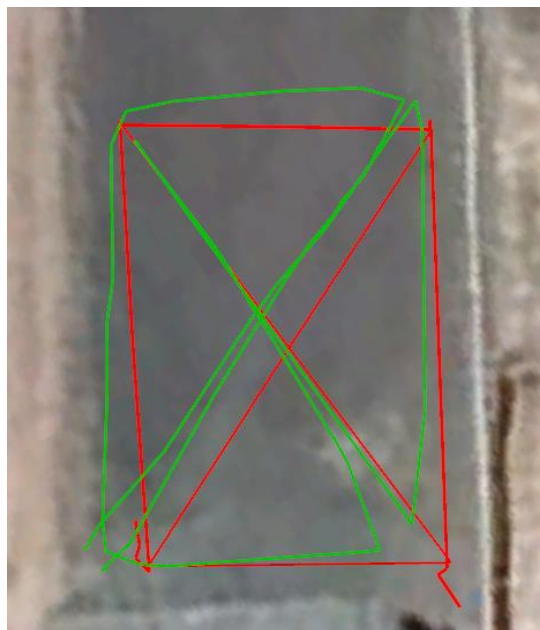
Tablica 3 Vrijednosti odstupanja od referentne putanje u slučaju klasičnog upravljanja dronom

ETAPA:	AC [m]	CB [m]	BD [m]	DB [m]	BA [m]	AD [m]	DC [m]	CA [m]
VRIJEDNOSTI ODSTUPANJA OD REFERENTNE PUTANJE [m]	2,88	2,63	2,9	1,43	3,25	2,53	2,56	1,95
	2,28	1,59	1,52	0,74	1,5	1,72	2,5	1,71
	2,03	1,77	0,68	0,12	1,45	1,06	2,37	1,89
	2,54	2,23	0,26	0,72	1,17	0,36	2,63	2,41
	2,62	2,73	1,43	0,92	3	1,78	1,95	2,05
SREDNJE ODSTUPANJE PO ETAPI [m]	2,47	2,19	1,358	0,786	2,074	1,49	2,402	2,002
SREDNJE ODSTUPANJE POLIGONA OD REFERENTNE PUTANJE [m]	1,8465							

5.3. Mjerenje odstupanja za let u kojem je dronom upravljano pokretima ruku

Princip mjerenja identičan je objašnjenom u prethodnom potpoglavlju. Slika 38 prikazuje kako u prostoru izgledaju referentna putanja i ona nastala upravljanjem pokretima ruku. Vidljivo je kako je cijeli poligon pomaknut ulijevo i gore, a mogući razlozi također su objašnjeni u prethodnom potpoglavlju.

U tablici 4 prikazani su rezultati mjerenja odstupanja putanje kojom je upravljano pokretima ruku od referentne putanje. Podaci su prikazani po etapama gdje je mjereno odstupanje na svakoj petini etape kako bi se dobilo srednje odstupanje od referentne putanje po etapama, a također prikazano je i srednje odstupanje cijelog poligona od referentne putanje.



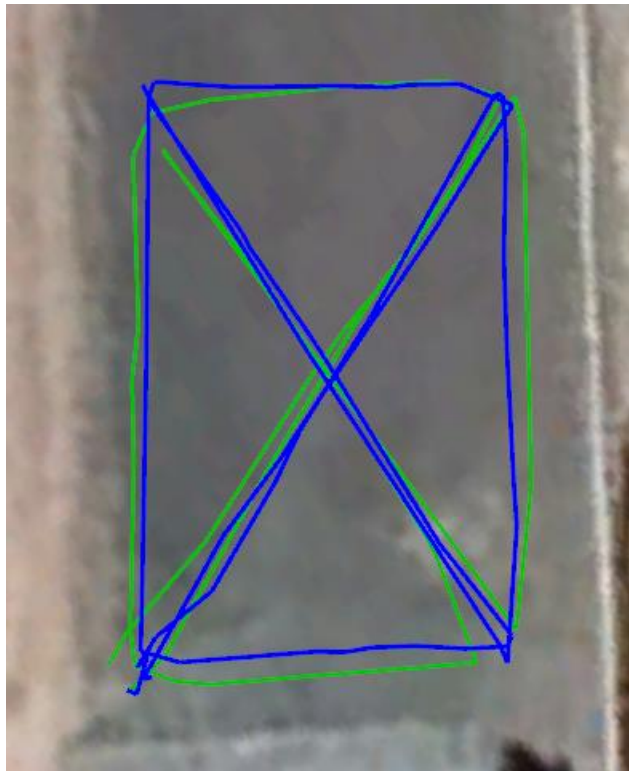
Slika 38 Prikaz putanje u slučaju upravljanja dronom pokretima ruku

Tablica 4 Vrijednosti odstupanja od referentne putanje u slučaju upravljanja dronom pokretima ruku

ETAPA:	AC [m]	CB [m]	BD [m]	DB [m]	BA [m]	AD [m]	DC [m]	CA [m]
VRIJEDNOSTI ODSTUPANJA OD REFERENTNE PUTANJE [m]	1,97	0,52	3,18	1,25	0,86	2,89	0,92	2,62
	2,46	0,87	0,44	0,06	0,5	2,29	1,86	2,47
	2,64	0,9	0,29	0,62	0,31	1,72	2,27	3,02
	2,9	1,54	0,16	1,55	0,05	0,92	2,65	3,23
	1,73	3,08	1,24	4,38	2,91	0,14	2,74	4,18
SREDNJE ODSTUPANJE PO ETAPI [m]	2,34	1,382	1,062	1,572	0,926	1,592	2,088	3,104
SREDNJE ODSTUPANJE POLIGONA OD REFERENTNE PUTANJE [m]	1,75825							

5.4. Mjerenje odstupanja između dvije putanje leta

U ovom odlomku predstavljena je usporedba putanji nastale različitim načinima upravljanja. Slika 39 prikazuje preklapljene obje putanje leta. Plavom bojom je prikazana putanja dobivena snimanjem trajektorije kretanja drona upravljanoj klasičnom radio stanicom, a zelenom bojom ona koja je dobivena upravljanjem pokretima ruku.



Slika 39 Prikaz putanji nastale u oba slučaja upravljanja

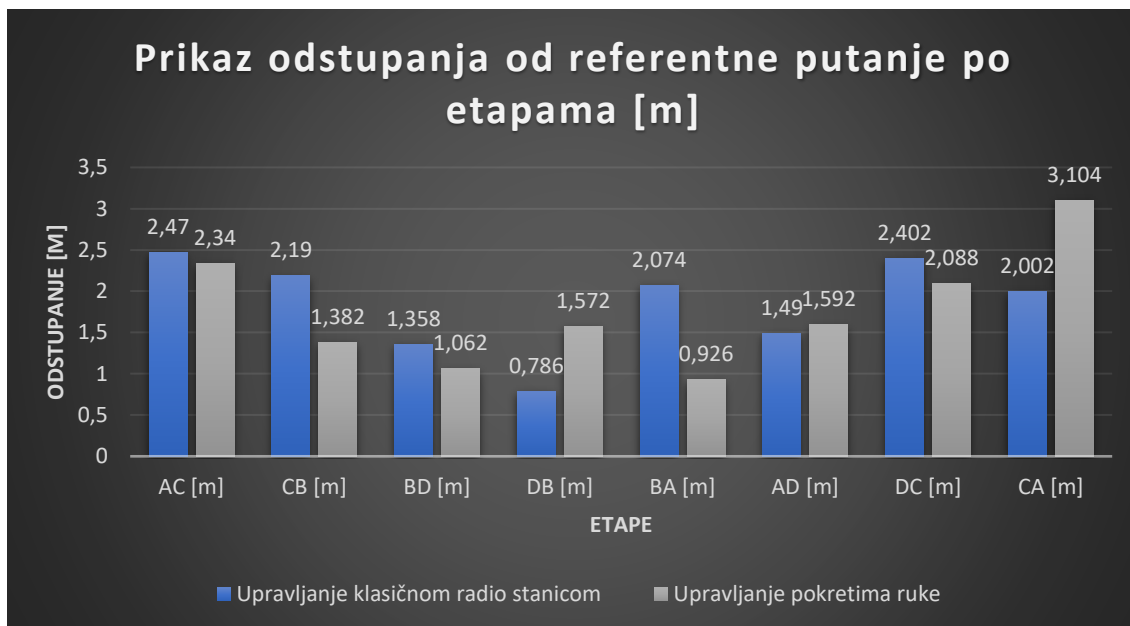
Tablica 5 prikazuje rezultate mjerenja odstupanja putanje kojom je upravljano pokretima ruku i putanje koja je nastala klasičnim upravljanjem dronom. Podaci su prikazani po etapama gdje je mjereno odstupanje na svakoj petini etape kako bi se dobilo srednje odstupanje između dvije navedene putanje po etapama, također prikazano je i srednje odstupanje između cijelih putanji.

Tablica 5 Vrijednosti odstupanja između putanji nastale upravljanjem drona pokretima ruku i klasičnog upravljanja dronom

ETAPA:	AC [m]	CB [m]	BD [m]	DB [m]	BA [m]	AD [m]	DC [m]	CA [m]
SREDNJE	0,73	0,98	1,85	3,5	2,14	0,4	1,45	0,81
ODSTUPANJE	0,43	1,12	0,77	0,45	1,15	0,7	0,43	0,47
IZMEĐU DVIJE	0,25	1,1	0,43	0,25	1,26	0,76	0,15	0,62
PUTANJE [m]	0,35	0,92	0,5	0,44	1,17	0,76	0,22	1,34
	0,98	1,85	3,68	2,14	0,99	1,98	0,8	1,53
SREDNJE	0,548	1,194	1,446	1,356	1,342	0,92	0,61	0,954
ODSTUPANJE PO								
ETAPI [m]								
PROSJEČNA RAZLIKA								
IZMEĐU DVIJU								
ODLETENIH PUTANJI								
[m]	1,04625							

5.5. Analiza i usporedba rezultata mjerenja

Koristeći Microsoft Excel i funkciju za određivanje srednje vrijednosti dobivene su srednje vrijednosti odstupanja putanje kojom je letio dron od referentne putanje kao i odstupanja između putanji koje su nastale različitim načinima upravljanja. Na dijagramu 1 grafički su prikazane vrijednosti odstupanja putanji nastale klasičnim upravljanjem i upravljanjem pokretima ruke od referentne putanje po etapama izražene u metrima. Vidljivo je da je najveće odstupanje za klasično upravljanje na etapi AC koje iznosi 2.47 m, a najmanje odstupanje je na etapi DB i iznosi 0,786 m. Za upravljanje pokretima ruke najveće odstupanje je na etapi CA koje iznosi 3.104 m, a najmanje odstupanje je na etapi DB i iznosi 0.926 m.



Dijagram 1 Prikaz odstupanja od referentne putanje po etapama za oba načina upravljanja

Dijagram 2 prikazuje odnose srednjih vrijednosti odstupanja u oba slučaja. Na dijagramu je vidljivo da je srednje odstupanje u slučaju upravljanja pokretima ruke manje od odstupanja u slučaju upravljanja klasičnom radio stanicom, a razlika iznosi svega 8.8 cm.



Dijagram 2 Usporedba srednjih vrijednosti odstupanja

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je ukupno odstupanje u odnosu na referentnu putanju najveće na etapama između vrhova A i C, a kada se gleda odstupanje između dviju odletenih

putanji tada je razlika na toj etapi najmanja. Iz toga se može zaključiti da je greška prijemnika pri određivanju referentne putanje koja je izmaknuta dolje-desno imala najveći utjecaj na odstupanje po etapi između vrhova A i C jer je izmaknuta točno okomito na tu etapu. A kako je u slučaju dviju odletenih putanji razlika na toj etapi najmanja može se zaključiti da se radi o greški prijemnika koja je najizraženija bila baš pri određivanju referentne putanje, a ne da je razlika nastala radi kretanja drona bočno od navedene putanje.

Prema dijagramu 2 srednja odstupanja između dva načina upravljanja iznose svega 8.8 cm što govori da je funkcionalnost upravljanja pokretima ruke, koje je predstavljeno u ovom radu, jednako učinkovita kao i upravljanje klasičnom radio stanicom.

6. ZAKLJUČAK

Kontrola pokretima ruke omogućava korisnicima jednostavniji i intuitivniji način upravljanja dronovima, omogućavajući im korištenje ruku i gesti za kontrolu drona. Ova tehnologija čini učenje upravljanja dronom bržim i jednostavnijim od tradicionalne metode upravljanja dronovima, poput korištenja daljinskih upravljača s kontrolnim palicama.

Iako može zahtijevati više vježbe, klasično upravljanje preko radio stanice s dvije palice može biti izuzetno precizno, što je važno za napredne manevre ili za precizno fotografiranje ili snimanje. Klasično upravljanje omogućuje veću stabilnost i preciznost u letu, posebno u zahtjevnim uvjetima kao što su jaki vjetrovi ili nestabilni uvjeti leta.

Ukratko, odluka o načinu upravljanja dronom ovisi o preferencijama korisnika, vrsti drona i uvjetima u kojima se dron koristi. Upravljanje pomoću pokreta ruke, gestama ili akcelerometra je intuitivnije i brže, ali klasično upravljanje preko radio stanice s dvije palice može pružiti veću preciznost i stabilnost leta.

Ovim radom zaključuje se da je predloženi intuitivni kontrolni sustav za dronove korištenjem pokreta ruke bio izvediv i da je jednako učinkovit kao i klasični kontrolni sustav koji koristi dvije palice te da otvara nove mogućnosti za upravljanje dronovima u raznim područjima poput nadzora, istraživanja i zabave.

POPIS LITERATURE

- [1] »ArduPilot,« [Mrežno]. Dostupno: <https://ardupilot.org/copter/index.html>. [Pokušaj pristupa 25. 02. 2023.].
- [2] Arduino.cc, [Mrežno]. Dostupno: <https://support.arduino.cc>. [Pokušaj pristupa 05. 01. 2023.].
- [3] »Electropeak,« [Mrežno]. Dostupno: <https://electropeak.com>. [Pokušaj pristupa 01. 02. 2023.].
- [4] AUTODESK, »AUTODESK Instructables,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.instructables.com>. [Pokušaj pristupa 12. 01. 2023.].
- [5] »How To Mechatronics,« [Mrežno]. Dostupno: <https://howtomechatronics.com>. [Pokušaj pristupa 15. 12. 2022.].
- [6] D. Bonači, »Sustavi za praćenje i vođenje procesa-I2C sabirnica,« 2007. [Mrežno]. Dostupno: <http://spvp.zesoi.fer.hr>. [Pokušaj pristupa 25. 01. 2023.].
- [7] »Life hacking for life,« GoTravels, [Mrežno]. Dostupno: <https://hr.go-travels.com>. [Pokušaj pristupa 12. 01. 2023.].
- [8] »Microchip,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.microchip.com>. [Pokušaj pristupa 02. 02. 2023.].
- [9] »iStock,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.istockphoto.com>. [Pokušaj pristupa 03. 03. 2023.].
- [10] »Last minute engineers,« [Mrežno]. Dostupno: <https://lastminuteengineers.com>. [Pokušaj pristupa 25. 01. 2023.].
- [11] »Garmin Connect,« Garmin, [Mrežno]. Dostupno: <https://connect.garmin.com>. [Pokušaj pristupa 06. 03. 2023.].
- [12] »Analog devices,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.analog.com>. [Pokušaj pristupa 05. 01. 2023.].
- [13] »Level developments,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.leveldevelopments.com>. [Pokušaj pristupa 01. 21. 2023.].
- [14] T. P., MEMS inercijski senzori, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, 2016.
- [15] Google, *Google Earth Pro aplikacija*, 2023.

POPIS KRATICA

- ADC (Analog to digital converter) Analogno-digitalni konverter
- DAC (Digital to analog converter) Digitalno-analogni konverter
- g ubrzanje sile teže
- GPS (Global Positioning System) Globalni navigacijski sustav
- IoT (Internet of things) Označava povezivanje uređaja putem interneta
- IDE (Integrated Development Environment) Integrirano razvojno okruženje u kojem se može napisati i pokrenuti program na istom mjestu
- LSB (The least significant bit) Bit najmanjeg značaja, često se koristi za najmanju promjenu napona koju može otkriti A/D pretvarač
- MEMS (microelectromechanical systems) Mikro elektro-mehanički sustavi
- PCB (printed circuit board) Tiskana ploča - nevodljivi materijal s vodljivim linijama koje su tiskane ili ugravirane

POPIS SLIKA

Slika 1 Shematski prikaz smjera vrtnje pojedinog motora, [1]	3
Slika 2 Shematski prikaz promjene brzina pojedinih motora u manevrima	4
Slika 3 Dron i njegov kontroler korišteni u radu	5
Slika 4 Arduino Uno R3, [2]	6
Slika 5 Akcelerometar ADXL345, [3].....	8
Slika 6 Blok shema akcelerometra, [3].....	9
Slika 7 Primjer spajanja uređaja na I2C sabirnicu, [4]	11
Slika 8 Blok shema RC filtera, [8].....	13
Slika 9 Radni ciklus od 50 %, [8]	15
Slika 10 Analogni napon od 2.5 V na osciloskopu, [4].....	16
Slika 11 Analogni napon od 0 V na osciloskopu, [8].....	17
Slika 12 Analogni napon od 5 V na osciloskopu, [8].....	17
Slika 13 Valovitost analognog izlaza, [8]	18
Slika 14 Prijenosna baterija, [5].....	19
Slika 15 Arduino IDE, [6].....	20
Slika 16 smjer djelovanja x i y osi, [9].....	23
Slika 17 Djelovanje sile u bestežinskom stanju, [9].....	26
Slika 18 Djelovanje sile duž x osi, [9].....	26
Slika 19 Djelovanje gravitacijske sile, [9].....	27
Slika 20 Shematski prikaz mikro strukture akcelerometra, [3]	28
Slika 21 Blok shema potenciometra, [10]	30
Slika 22 Blok shema cijelog sučelja	31
Slika 23 Izgled sastavljenog sučelja sa svim komponentama.....	31
Slika 24 Proces printanja plastične kutije na 3D printeru	32
Slika 25 Završni izgled sučelja za upravljanje dronom pokretima ruke spremnog za korištenje.....	33
Slika 26 Izlazne vrijednosti senzora kad je senzor u horizontalnom položaju	34
Slika 27 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut naprijed.....	35
Slika 28 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut unazad	35
Slika 29 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut udesno.....	36
Slika 30 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut ulijevo	36
Slika 31 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut nazad-desno	37
Slika 32 Izlazne vrijednosti kad je senzor nagnut naprijed-lijevo.....	38
Slika 33 Tlocrt poligona za testiranje	39
Slika 34 GPS prijemnik pričvršćen za dron	40
Slika 35 Referentna putanja	41
Slika 36 Garmin Fenix 6 Solar, [11]	42
Slika 37 Primjer mjerenja odstupanja između putanje nastale klasičnim upravljanjem i referentne putanje	43
Slika 38 Prikaz putanje u slučaju upravljanja dronom pokretima ruku	45
Slika 39 Prikaz putanji nastale u oba slučaja upravljanja	46

POPIS TABLICA

Tablica 1 Nazivi i značenje pinova	9
Tablica 2 Kod pomoću kojega sustav prikuplja i obrađuje podatke	23
Tablica 3 Vrijednosti odstupanja od referentne putanje u slučaju klasičnog upravljanja dronom	44
Tablica 4 Vrijednosti odstupanja od referentne putanje u slučaju upravljanja dronom pokretima ruku ..	45
Tablica 5 Vrijednosti odstupanja između putanji nastale upravljanjem drona pokretima ruku i klasičnog upravljanja dronom	47

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1 Prikaz odstupanja od referentne putanje po etapama za oba načina upravljanja	48
Dijagram 2 Usporedba srednjih vrijednosti odstupanja	48

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ **diplomski rad** _____
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu **diplomskog rada** pod naslovom _____ **Upravljanje bespilotnom letjelicom pokretima ruke** _____, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

Filip Tranić

(potpis)

U Zagrebu, 20/02/2023