

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Toni Vuković

Teo Putarek

Marko Šimić

Dizajn i razvoj trokrilne rotacijske bespilotne letjelice

Zagreb, 2025.

Ovaj rad izrađen je u LARICS laboratoriju odjela ZARI pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Matka Orsaga i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

Kratice korištene u radu

1. **MOSFET** - Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor - Tranzistor s efektom polja metal-oksida-poluvodiča
2. **UAV** - Unmanned Aerial Vehicle - Bepilotna letjelica
3. **CCAA** - Civil Aviation Agency - Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo
4. **API** - Application Programming Interface - Sučelje za programiranje aplikacija
5. **TTL** - Transistor-Transistor Logic - Logika tranzistor-tranzistor
6. **DH** - Destination Address High - Viši dio odredišne adrese
7. **DL** - Destination Address Low - Niži dio odredišne adrese
8. **NI** - Node Identifier - Identifikator čvora
9. **PL** - Power Level - Razina izlazne snage
10. **UART** - Universal Asynchronous Receiver–Transmitter - Univerzalni asinkroni prijemnik-predajnik
11. **CMOS** - Complementary Metal–Oxide–Semiconductor - Komplementarni metal-oksida-poluvodič
12. **LiDAR** - Light Detection and Ranging - Detekcija svjetlom i određivanje udaljenosti
13. **IMU** - Inertial Measurement Unit - Jedinica inercijalnog mjerenja
14. **bps** - bits per second - Bitova u sekundi
15. **IDE** - integrated development environment - integrirano razvojno okruženje
16. **CAD** - computer-aided design - oblikovanje s pomoću računala
17. **PWM** - Pulse-Width modulation - modulacija širine pulsa
18. **LED** - light-emitting diode - svjetleća dioda
19. **LiPo** - lithium polymer battery - litij-polimer
20. **DC** - direct current - istosmjerna struja

21. **DOF** - Degrees of Freedom - stupnjevi slobode
22. **CSV** - Comma-Separated Values - datoteka razdvojena zarezima
23. **OpenCV** - Open Source Computer Vision Library - biblioteka za računalni vid
24. **STEM** - Science, Technology, Engineering and Mathematics - znanost, tehnologija, inženjerstvo i matematika

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
1.1.	Kontekst i motivacija projekta.....	1
1.2.	Pregled područja i sličnih UAV koncepata	1
1.3.	Ciljevi rada	3
1.4.	Struktura rada	3
2.	Zahtjevi, specifikacije i opis sustava.....	4
2.1.	Operativni zahtjevi	4
2.2.	Funkcionalni zahtjevi	4
2.3.	Sigurnosni i regulatorni zahtjevi.....	4
2.4.	Fizikalni model letjelice	5
2.5.	Arhitektura letjelice	6
3.	Mehanička konstrukcija, elektronika i pogon.....	8
3.1.	Dizajn i 3D-printani dijelovi	8
3.2.	Montaža krila i zaštitnih kućišta.....	9
3.3.	Pasivne sigurnosne značajke za “hard-landing”	10
3.4.	Brushed DC motori i propeleri	11
3.5.	Baterijski sustav i upravljanje napajanjem	11
3.6.	Arduino platforma	11
3.7.	Biblioteke i konfiguracija pinova	12
3.8.	MOSFET-i	13
3.9.	IMU	13
4.	Komunikacija, upravljačko sučelje i softverski algoritmi.....	14
4.1.	XBee moduli i protokoli.....	14
4.2.	Joystick	16

4.3.	Python upravljački algoritmi	17
4.4.	Arduino firmware – čitanje senzora i upravljanje motorima.....	18
4.5.	Izračun i filtriranje podataka.....	19
4.6.	Python skripte za prijenos i obradu podataka.....	20
4.7.	Algoritmi upravljanja letjelicom	21
4.8.	Watchdog i failsafe logika pri gubitku signala.....	23
5.	Integracija, testiranje i optimizacija dizajna krila.....	24
5.1.	Fizička montaža.....	24
5.2.	Kalibracija sustava.....	25
5.3.	Plan i scenariji testiranja.....	27
5.4.	Optimizacija dizajna krila.....	28
5.5.	Prikupljanje podataka	30
6.	Rezultati i rasprava te buduće primjene.....	31
6.1.	Rezultati.....	31
6.2.	Rasprava	35
6.3.	Autorotacija kao sigurnosni mehanizam	36
6.4.	Edukativne i hobi primjene.....	36
6.5.	Istraživačke i industrijske primjene	37
6.6.	Integracija kamere i obrada slike.....	37
6.7.	Nadzor ugroženih područja i vanjskih utjecaja	38
7.	Zaključak.....	39
8.	Literatura	39
9.	Prilozi.....	41
9.1.	GitHub repozitorij	41
9.2.	Video demonstracija	41

10.	Sažetak.....	42
11.	Summary	43

1. Uvod

1.1. Kontekst i motivacija projekta

U suvremenoj primjeni bespilotnih sustava rastu zahtjevi za pouzdanošću i sigurnošću letova u raznim uvjetima. Ova letjelica kombinira jednostavnu hardversku arhitekturu, Arduino kontroler na platformi s tri krila i rotorima na njihovim vrhovima te bežičnu komunikaciju pomoću XBee¹ modula. Laptop služi kao zemaljska stanica za prijem telemetrije² i slanje upravljačkih naredbi putem joysticka, koristeći Python skripte.

Motivacija projekta je razviti UAV sustav sposoban za stabilan i upravljan let, ali i opremljen sigurnosnim mehanizmom. U slučaju gubitka veze, ugrađeni sigurnosni mehanizam automatski isključuje motore, a jedinstveni dizajn krila omogućuje rotaciju za kontrolirani i siguran pad (Quan, i dr., 2020).

1.2. Pregled područja i sličnih UAV koncepata

Područje bespilotnih letjelica posljednjih je godina doživjelo snažan razvoj i diverzifikaciju primjena. Danas se UAV sustavi koriste u vojne, civilne, istraživačke, poljoprivredne i industrijske svrhe (Shakhathreh, i dr., 2019). Najraširenije konfiguracije obuhvaćaju letjelice s fiksnim krilima i rotorske letjelice.

Letjelice s fiksnim krilima odlikuju se energetsom učinkovitošću i velikim doletom, što ih čini pogodnima za misije nadzora, kartiranja i transporta. Njihov nedostatak je nemogućnost lebdenja i zahtjevnije manevriranje u skućenim prostorima. S druge strane, rotorske letjelice (multikopteri, helikopteri) pružaju iznimnu pokretljivost, vertikalno polijetanje i lebdenje, no ograničene su trajanjem leta i energetsom učinkovitošću.

¹ XBee – mali RF modul za jednostavnu bežičnu serijsku komunikaciju

² Telemetrija – prijenos podataka o stanju sustava ili uređaja s udaljene jedinice na zemaljsku stanicu

Kako bi se prevladala ograničenja klasičnih konfiguracija, u novije vrijeme razvijaju se hibridne platforme koje kombiniraju elemente oba koncepta. U tu skupinu ubrajaju se tilt-rotor letjelice, konvertibilni dronovi i rotacijske konstrukcije.

U literaturi je prikazano više eksperimentalnih i teorijskih pristupa razvoju ovakvih hibridnih UAV sustava. Primjeri uključuju:

- U radu (Orsag, Bogdan, Haus, Bunic, & Krnjak, 2011) predložen je koncept spincopter UAV-a, koji je prvo testiran u Matlab-u i X-Plane simulacijama, a zatim implementiran na stvarnoj platformi. Primijenjen je kontrolni algoritam s decoupling funkcijom, koji je omogućio uspješno waypoint navođenje. Eksperimentalna validacija provedena je pomoću vizijske lokalizacije bazirane na IR markerima i Hough transformaciji, što je potvrdilo stabilno pozicioniranje letjelice
- U radu (Orsag, Cesic, Haus, & Bogdan, 2013) predstavljen je UAV s dvama rotirajućim krilima, čiji matematički model potvrđuje inherentnu stabilnost sustava. Kontrola vertikalnog kretanja ostvaruje se promjenom potiska oba aktuatora, dok je horizontalno gibanje regulirano pulsiranjem aktuatora. Simulacije su pokazale da optimalni period pulsiranja nije osjetljiv na dinamiku motora, a dodatno je istražen i oblik krila podijeljen na segmente, s analizom utjecaja svakog segmenta na uzgon i otpor.
- U projektu (Rehm, 2022) razvijen je vrteći trikopter s tri krila. Ova letjelica posjeduje potpunu kontrolu u svim trima prostornim smjerovima (x, y, z), a posebna joj je karakteristika otpornost na otkaz motora. Naime, sustav može nastaviti lebdjeti i zadržati stabilnost čak i ako dođe do gašenja jednog ili dva motora, jer se s preostalim motorom može postići dovoljna brzina rotacije za generiranje uzgona. Time se dodatno povećava razina sigurnosti i robusnosti u stvarnim operativnim uvjetima.

U tom kontekstu pozicionira se i ovaj projekt. Za razliku od standardnih multikoptera, ova letjelica koristi tri krila postavljena pod kutom od 120° , s rotorima na njihovim krajevima. Ova konfiguracija omogućuje kombinaciju generiranja uzgona putem aerodinamičkog profila krila i kontroliranog skretanja pomoću motora. Posebnost dizajna je rotacijska sposobnost, koja letjelici omogućuje sigurno i kontrolirano spuštanje čak i u slučaju gubitka pogona, čime se postiže razina sigurnosti koju klasične konfiguracije teško ostvaruju ili zaobilaze problem kompleksnijim metodama (Roos, 2013).

1.3. Ciljevi rada

Cilj rada je razviti i validirati bespilotni sustav s pouzdanom komunikacijom, sigurnosnim mehanizmima i rotacijskim dizajnom.

Kao prvo, potrebno je uspostaviti pouzdanu bežičnu vezu između bespilotne letjelice i zemaljske stanice za što se koristiti XBee moduli i Python skripte koje će se izvršavati na laptopu. Paralelno s tim, razviti Arduino-based kontroler koji će upravljati motorima i očitavati podatke sa senzora, pri čemu će u njega biti ugrađena watchdog funkcija koja, u slučaju prekida signala, sigurnosno isključuje motore.

Nakon implementacije hardverskih i softverskih rješenja, potrebno je provesti niz testova rotacijskog dizajna trokrilne platforme kako bi se potvrdila stabilnost i kontrola spuštanja letjelice bez pogona. Završno, cijeli će se proces, od same integracije komponenti do razvoja softvera, detaljno dokumentirati, a rezultati eksperimentalnih ispitivanja poslužiti će za analizu performansi sustava u stvarnim uvjetima leta.

1.4. Struktura rada

Struktura rada započinje uvodom u kojem se razrađuju kontekst i motivacija projekta, definiraju ciljevi rada te daje pregled same organizacije.

Sljedeća poglavlja opisuju zahtjeve i specifikacije sustava, podijeljeni na operativne, funkcionalne te sigurnosne i regulatorne. Nakon toga slijedi opis platforme, koji obuhvaća arhitekturu letjelice, ključne komponente i detaljnu analizu mehaničke konstrukcije, uključujući 3D printane dijelove, montažu krila i pasivne sigurnosne značajke.

U poglavlju o elektronici i pogonu obrađuju se motori, baterijski sustav, Arduino platforma, MOSFET upravljački elementi i senzori. Posebno poglavlje posvećeno je komunikaciji i kontrolnom sučelju, gdje se analiziraju XBee moduli, pouzdanost veze, joystick i Python algoritmi. Softverska implementacija i upravljački algoritmi uključuju razvoj firmwarea za Arduino, Python skripte za prijenos i obradu podataka te implementaciju failsafe logike.

Nakon toga slijedi integracija sustava, testiranje i optimizacija dizajna krila i propelera, s naglaskom na stabilnost leta i učinkovitost zaštitnih mehanizama. U završnom dijelu razmatraju se buduće primjene i razvojne mogućnosti, primjerice edukativne i industrijske upotrebe te integracija kamere za nadzor teško dostupnih područja.

Rad završava prezentacijom rezultata, raspravom, zaključkom, popisom literature te sažecima na hrvatskom i engleskom jeziku.

2. Zahtjevi, specifikacije i opis sustava

2.1. Operativni zahtjevi

Letjelica mora biti u stanju izvesti kontinuirani let u različitim meteorološkim uvjetima, uključujući slabiju vidljivost, umjerenu kišu i vjetar, pri čemu minimalno trajanje leta iznosi 10 minuta uz neprekidnu dvosmjernu telemetriju između letjelice i zemaljske stanice. Bežična veza temelji se na XBee modulima i mora ostati stabilna na udaljenosti od najmanje 250 m, bez gubitka kontrolnih paketa. Kompletu letjelicu treba moći brzo rastaviti ili sastaviti na terenu, a postupak montaže ili demontaže ne bi trebao trajati dulje od 10 minuta, čime se osigurava visoka mobilnost i operativna fleksibilnost.

2.2. Funkcionalni zahtjevi

Hardverski dio sustava oslanja se na Arduino kontroler koji upravlja motorima, očitava brzinu rotacije propelera i kut elevacije krila, te kontinuirano nadzire stanje žiroskopa i drugih senzora. Softverska komponenta, implementirana u Pythonu na laptopu, omogućuje prijem telemetrije i slanje upravljačkih naredbi putem joysticka, a dodatno obrađuje i pohranjuje podatke u stvarnom vremenu. Ugrađeni watchdog mehanizam prepoznaje gubitak veze te automatski isključuje napajanje motora (Madhushankara, Ribu, Maneesh, & B., 2024), dok rotacijski dizajn trokrilne platforme jamči kontrolirano i usporeno spuštanje pri potpunom gubitku pogona.

2.3. Sigurnosni i regulatorni zahtjevi

Sustav mora biti usklađen s propisima Hrvatske agencije za civilno zrakoplovstvo (CCAA³) u kategoriji „otvorena”, što uključuje masu do 2 kg, let unutar vidnog dosega operatera te

³ CCAA – skraćenica za Hrvatsku agenciju za civilno zrakoplovstvo (Civil Aviation Agency), regulatorno tijelo za nadzor i certificiranje civilnog zračnog prometa.

poštivanje minimalne visine leta od 50 m iznad tla i zabranu letenja nad zaštićenim ili naseljenim područjima bez posebne dozvole (Agency, 2019). Svi elektronički moduli moraju zadovoljiti zahtjeve elektromagnetske kompatibilnosti prema EN 301 489⁴ standardu, a baterijski i pogonski sklopovi moraju imati ugrađenu zaštitu od prenapona i kratkog spoja. Pasivne sigurnosne komponente poput softverske failsafe logike dodatno minimiziraju štetu i rizik pri nepredviđenim padovima ili sudarima.

2.4. Fizikalni model letjelice

Razmatrana letjelica je trikopter, pri čemu su tri krila postavljena međusobno pod kutom od 120°. Na svakom krilu nalazi se rotor (motor s propelerom) orijentiran tako da rotacijska os vrtnje leži horizontalno, odnosno rotor „gledaju“ okomito na krila u horizontalnom smjeru. Takva konfiguracija omogućuje generiranje uzgona pomoću krila, dok rotor svojim potiskom rotiraju letjelicu oko vlastite z-osi. U fizikalnom modelu letjelice razmatraju se sljedeće sile:

- Sile potiska rotora (F_T): proizlaze iz rada elektromotora i propelera, te su usmjerene tangentno u odnosu na kružnicu koju opisuje rotor. Te sile stvaraju moment oko Z-osi, čime se letjelica zakreće (kutna brzina ω).
- Sile uzgona (F_L): nastaju djelovanjem strujanja zraka preko krila tijekom rotacije. Krila su konstruirana s aerodinamičkim profilom, što omogućuje pretvaranje horizontalnog kretanja u vertikalnu komponentu sile. Ta sila djeluje prema gore, smanjujući efektivnu težinu letjelice.
- Sile otpora zraka (drag) (F_D): posljedica su viskoznih sila i turbulencija u strujanju zraka oko krila i tijela letjelice. Otpor djeluje u suprotnom smjeru od relativnog strujanja i raste približno s kvadratom brzine rotacije.

Potisak rotora ovisi o elektromotorima koji ga pokreću, svojstvima propelera i jačini napajanja, dok formule za izračun uzgona (2.1) i otpora (2.2) zraka glase:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L A \quad (2.1)$$

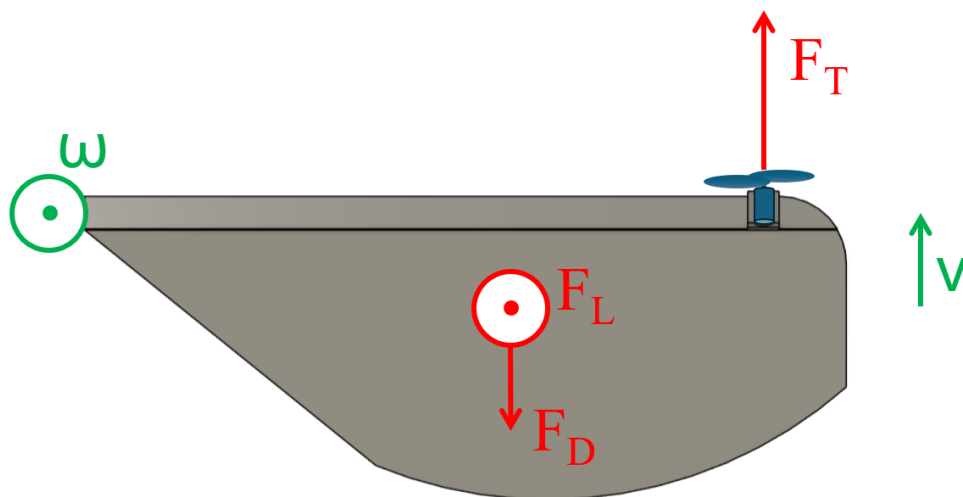
⁴ EN 301 489 – skup europskih tehničkih standarda za elektromagnetsku kompatibilnost i prihvatljive razine radio-frekvencijskih smetnji kod uređaja radi usklađivanja s direktivom EU o radio-opremi.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (2.2)$$

pri čemu je ρ gustoća fluida (odnosno zraka), v linearna brzina krila, C_L, C_D koeficijenti uzgona i otpora (koji ovise o geometriji krila), a A površina krila.

Ukupno ponašanje letjelice može se promatrati kroz ravnotežu momenata i sile. Sile potiska rotora definiraju kutnu brzinu (ω), dok se sile uzgona i otpora zraka pojavljuju kao posljedica te rotacije. Dinamika letjelice stoga ovisi o interakciji između momenta generiranog potiskom, uzgona generiranog aerodinamičkim profilom krila, utjecaja otpora zraka te sile teže.

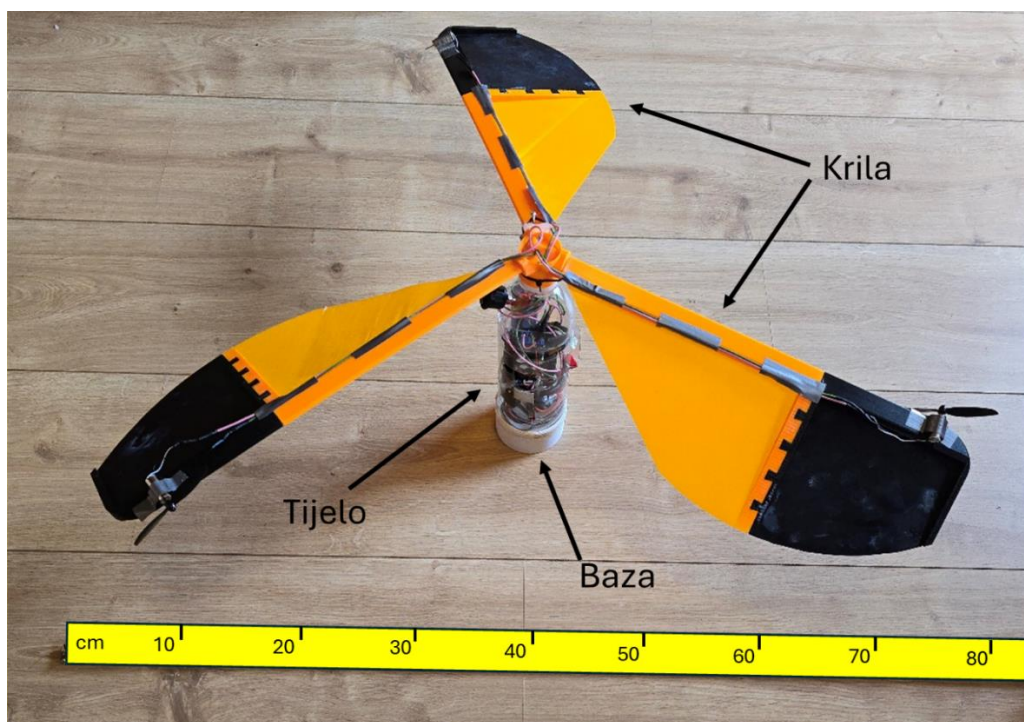
Na slici (Slika 2.1) sila uzgona označena je s F_L , sila potiska s F_T , sila otpora zraka s F_D , a kutna brzina letjelice s oznakom ω .



Slika 2.1 Shema sile koje djeluju na krilo letjelice

2.5. Arhitektura letjelice

Letjelica se sastoji od 3 glavna dijela (Slika 2.2). Krila koja se nalaze na vrhu same letjelice i zaslužna su za stvaranje uzgona koji podiže letjelicu u zrak. Tijela letjelice u kojem su smještene sve elektroničke komponente zaslužne za upravljanje samom letjelicom i komunikaciju s upravljačem. Na dnu same letjelice nalazi se baza u obliku polukugle koja uz negativ te baze na zemlji omogućuje jednostavno polijetanje (Slika 2.3).



Slika 2.2 Letjelica, uz označene 3 glavne komponente

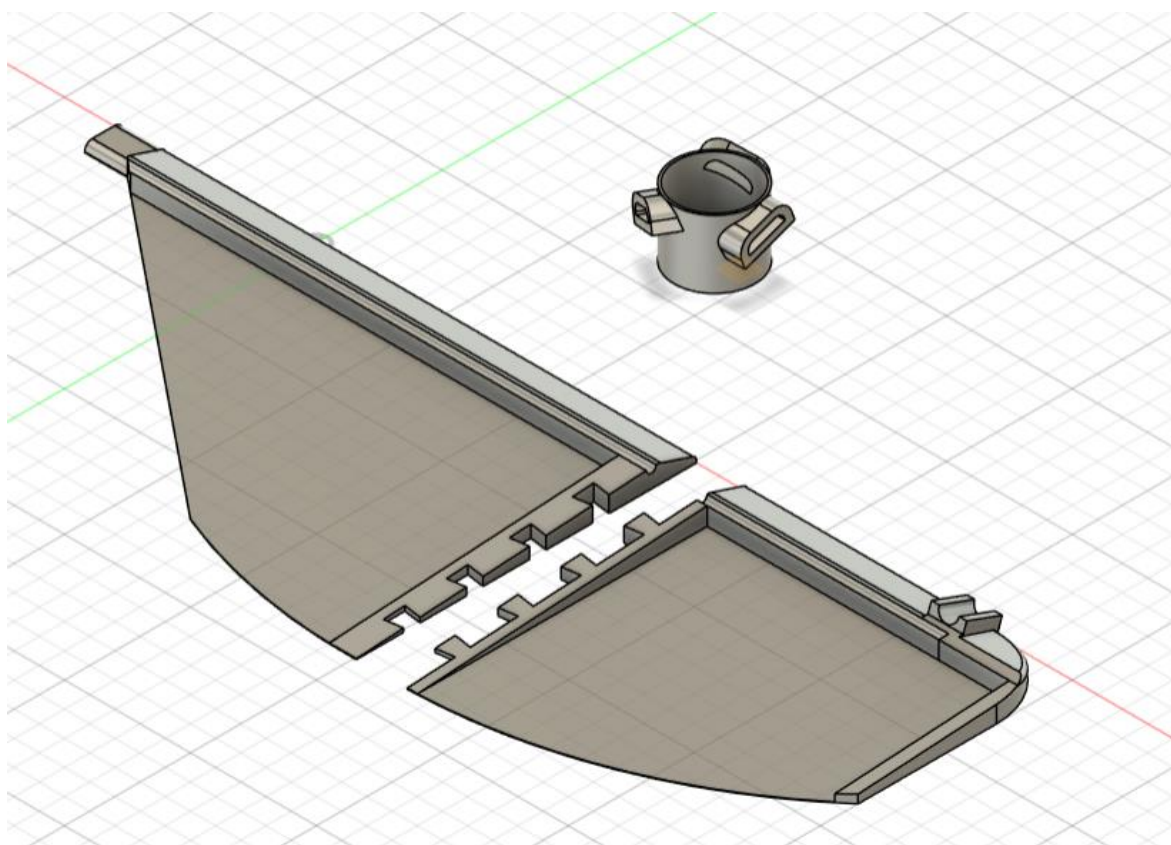


Slika 2.3 Baza letjelice (lijevo) i njen inverz (desno)

3. Mehanička konstrukcija, elektronika i pogon

3.1. Dizajn i 3D-printani dijelovi

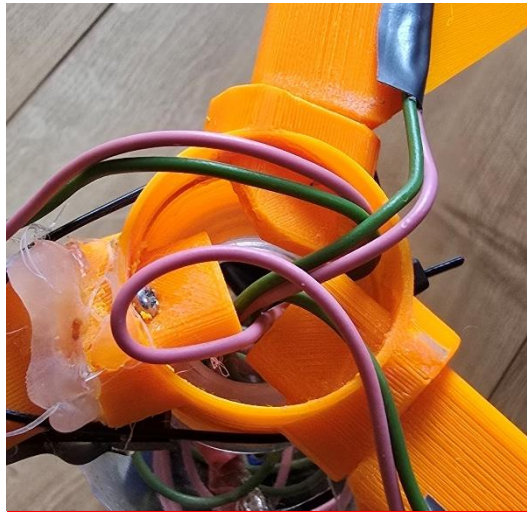
Dizajn letjelice napravljen je u CAD programu Autodesk Fusion. Glavni cilj dizajna bila je funkcionalna, a što je moguće lakša konstrukcija. Krila letjelice izvedena su u dva dijela kako bi ih bilo moguće isprintati na 3D printerima manjih dimenzija. Duž cijelih krila napravljen je utor za naponske žice motora, a na krajevima nosači za motore. Konektor kao glavna poveznica između krila i tijela letjelice izveden je kao cilindar s utorima zakrenutih za 120° jedan od drugog i navojem na dnu za montažu tijela (Slika 3.1). Za tijelo letjelice odabrana je plastična boca zbog vrlo male mase. Kad bi se i tijelo izrađivalo na 3D printeru njegova masa bila bi nekoliko puta veća.



Slika 3.1 Dizajn krila u 2 komponente i konektora, prikaz u programu Fusion 360

3.2. Montaža krila i zaštitnih kućišta

Dva dijela krila povezana su utorima između njih i dvokomponentnim epoxy ljepilom. Utori onemogućuju razdvajanje dijelova krila u horizontalnom pravcu što je bitno kod vrtnje letjelice kada se stvara snažna centrifugalna sila u smjeru od konektora prema vrhovima krila. Tako dobivena krila spajaju se na konektor u njegove uture i osiguravaju se već spomenutim ljepilom (Slika 3.2).



Slika 3.2 Spoj krila i konektora

Na dnu konektora nalaze se navoji u koje se tijelo letjelice pričvršćuje. Slično kao i kod konektora, na dnu tijela se također nalaze navoji na koje se pričvršćuje baza kojom je tijelo zatvoreno.

Kao što je već navedeno, duž krila je napravljen utor za žice, a na krajevima krila nosač za motore. Žice i motori su na svoja mjesta učvršćeni ljepljivom trakom, što omogućuje brzu montažu ili rastavljanje, ali i dalje postiže dovoljnu čvrstoću (Slika 3.3).



Slika 3.3 Krilo, motor i žice

3.3. Pasivne sigurnosne značajke za “hard-landing”

Kod najčešće korištenih dronova s 4 motora koji stvaraju uzgon u vertikalnom smjeru za podizanje letjelice, ako dođe do otkaza barem jednog motora, ta letjelica nekontrolirano pada i lako može doći do ozljeda ili materijalne štete. Nasuprot tome, u konfiguraciji u kojoj propeleri na motorima ne generiraju uzgon nego prvenstveno osiguravaju kutnu brzinu rotacije većih krila, otkaz jednog ili čak dva motora ne uzrokuje pad letjelice. Umjesto toga dolazi do rotacije krila i postupnog smanjenja kutne brzine, pa uzgon opada kontinuirano. Posljedično, letjelica ne pada nekontrolirano, nego ulazi u kontroliran, sporiji silazak prema tlu.

Taj efekt rotacije krila može se povezati s autorotacijom, gdje gibanje tijela omogućuje stvaranje uzgona i pri odsustvu aktivnog pogona. Primjer iz prirode može se pronaći kod sjemenki javora koje, zahvaljujući svojem obliku i autorotacijskom padu, lagano kruže prema tlu umjesto da slobodno padaju (Desenfans, 2019). Ovaj princip otvara mogućnosti

za dizajn letjelica koje i u slučaju potpunog otkaza pogonskog sustava usporeno padaju prema tlu (detaljnije razmotreno u poglavlju 6.3.).

3.4. Brushed DC motori i propeleri

Brushed DC motori zbog svoje jednostavnosti, niske cijene, malih dimenzija i mase idealni su za primjenu na malim bespilotnim letjelicama. Ne zahtijevaju komplicirane upravljače module, već se jednostavnim promjenama napona kontrolira njihova brzina. Na motorima montirani su propeleri koji su optimizirani za rad na tim motorima, daju optimalne performanse s obzirom na njihovu snagu.

3.5. Baterijski sustav i upravljanje napajanjem

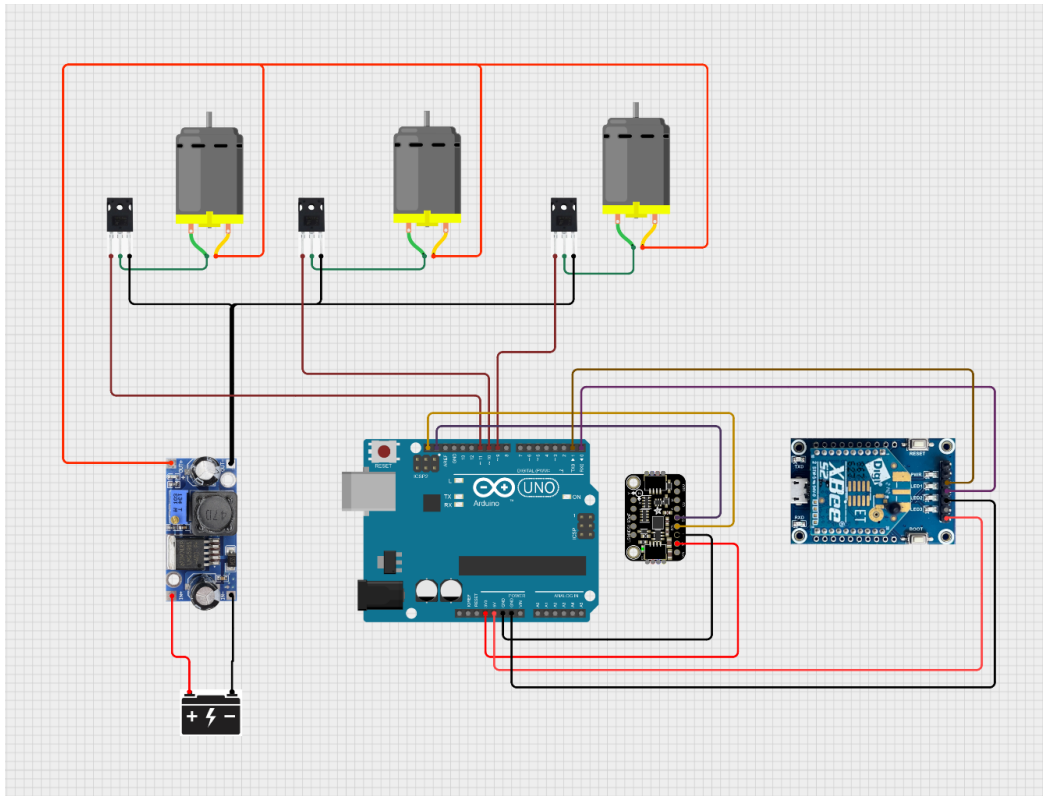
Napajanje je izvedeno jednom LiPo baterijom kapaciteta 600mAh nazivnog napona 7.4 V, koja će omogućiti nekoliko minuta letenja. LiPo baterije imaju visoku energetska gustoću, mogu isporučiti veliku struju i male su mase što ih čini idealnim za primjenu u dronovima.

Uz bateriju još jedna komponentna sustava napajanja je i DC-DC konverter koji napon od 7.4 V koji daje baterija, spušta i stabilizira na 5 V, što je nominalni napon motora i Arduino mikro kontrolera. Ostale komponente napajaju se direktno s Arduina.

3.6. Arduino platforma

Arduino je open-source mikrokontrolerska platforma koja se sastoji od hardverske pločice i programskog okruženja, namijenjena brzom razvoju i prototipiranju elektroničkih projekata (McRoberts, 2013). Središnji element Arduino pločica čini mikrokontroler, koji izvršava programske upute pohranjene u svojoj memoriji.

Arduino funkcionira tako da putem digitalnih i analognih ulaza očitava podatke sa senzora, prekidača ili drugih elektroničkih komponenti, zatim obrađuje te informacije prema unaprijed definiranom algoritmu, te generira odgovarajuće izlazne signale prema motorima, LED diodama ili komunikacijskim modulima (Slika 3.4). Programiranje se odvija u Arduino IDE okruženju koristeći jezik temeljen na C/C++ sintaksi. Zbog svoje jednostavnosti, široke dokumentacije i globalne zajednice korisnika, Arduino je postao standardno rješenje u edukaciji, istraživanju, hobi elektronici i industrijskom prototipiranju.



Slika 3.4 Shema elektroničkih komponenti

3.7. Biblioteke i konfiguracija pinova

U programskom kodu korištene su dvije biblioteke, LSM9DS1TR-SOLDERED.h i Wire.h. Biblioteka LSM9DS1TR-SOLDERED omogućuje jednostavan rad s 9-osnim IMU senzorom LSM9DS1TR, koji integrira akcelerometar, žiroskop i magnetometar. Pomoću ove biblioteke moguće je očitavati sirove i obrađene podatke o ubrzanju, kutnoj brzini i magnetskom polju te provoditi njihovu kalibraciju, što omogućuje precizno praćenje orijentacije i kretanja u prostoru. Za komunikaciju između senzora i Arduino

mikrokontrolera koristi se standardna Wire.h biblioteka, koja implementira I²C protokol, omogućujući razmjenu podataka preko dvije žice (SDA i SCL).

3.8. MOSFET-i

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) je vrsta tranzistora koji se koristi za elektroničko upravljanje strujom u strujnim krugovima. Sastoji se od tri terminala: gate (G), drain (D) i source (S). Struja između draina i sourcea kontrolira se naponom primijenjenim na gate, pri čemu se gate odvojen tankim slojem oksida od kanala, što omogućuje vrlo visoku ulaznu impedanciju i nisku potrošnju energije pri upravljanju. MOSFET-i se često koriste u elektroničkim sklopovima za prekidanje i regulaciju visokih struja i napona, zahvaljujući svojoj brzini, učinkovitosti i sposobnosti rada u digitalnim i analogno-pulsirajućim (PWM) sustavima.

Pomoću MOSFET-a izvedeno je upravljanje snagom na motorima. Arduino šalje PWM signal koji se sastoji od HIGH i LOW pulseva koji se izmjenjuju visokom frekvencijom. Navedeni signal dolazi na gate MOSFET-a i kada na gate dođe HIGH puls MOSFET propušta struju na motor, a kada dođe LOW ne propušta. Kada se pulsevi izmjenjuju dovoljno visokom frekvencijom motor radi zadanom brzinom. Ovaj način upravljanja motorima odabran je zbog ograničenja komercijalnih kontrolera te zbog nekoliko puta manje mase od ostalih komercijalnih rješenja.

3.9. IMU

Za potrebe mjerenja kinematičkih veličina korišten je LSM9DS1TR 9-DOF Breakout modul. Ovaj senzor integrira trodimenzionalni akcelerometar, žiroskop i magnetometar, omogućujući istovremeno praćenje translacijskog ubrzanja, kutne brzine i intenziteta magnetskog polja.

Prema službenim specifikacijama, LSM9DS1TR omogućuje:

- mjerenje ubrzanja do ± 16 g,
- mjerenje kutne brzine do ± 2000 °/s,
- mjerenje magnetskog polja do ± 16 Gauss.

Uređaj sadrži ugrađeni temperaturni senzor, FIFO memoriju za upravljanje podacima te interrupt funkcije koje signaliziraju mikrokontroleru kada su podaci spremni ili kada je

detektiran određeni događaj. Komunikacija se odvija putem I²C sučelja, što omogućuje jednostavnu integraciju s raznim mikrokontrolerima, uključujući Arduino platformu.

Razlozi odabira ovog IMU-a za projekt:

- Integrirani magnetometar: za izračun kuta zaošijanja nužno je koristiti magnetometar, a ovaj modul ga sadrži zajedno s akcelerometrom i žiroskopom, čime se izbjegava potreba za dodatnim senzorima.
- Kompatibilnost s Arduino: senzor je potpuno podržan Arduino bibliotekama, što olakšava implementaciju i komunikaciju.
- Relativno niska cijena: LSM9DS1TR spada u pristupačne 9-DOF senzore s dobrim odnosom cijene i performansi.

Ova kombinacija značajki čini LSM9DS1TR prikladnim za mjerenja potrebna u ovom projektu, gdje je ključno istodobno mjeriti linearnu akceleraciju, kutnu brzinu i magnetsko polje kako bi se moglo odrediti ponašanje letjelice u prostoru.

4. Komunikacija, upravljačko sučelje i softverski algoritmi

4.1. XBee moduli i protokoli

Za bežičnu dvosmjernu komunikaciju između laptopa i Arduina koristi se XBee DigiMesh S2C Through-Hole module (Wire Antenna) u transparent operating modu, što omogućuje izravni prijenos serijskih podataka bez potrebe za dodatnim enkapsulacijskim slojem, iako API mod nudi naprednije mogućnosti provjere paketa (Slika 4.1). Jedan modul (XBEE_A) konfiguriran je na laptopu, a drugi (XBEE_B) na Arduino, pri čemu su oba spojena i programirana putem Digi-XCTU⁵ alata.

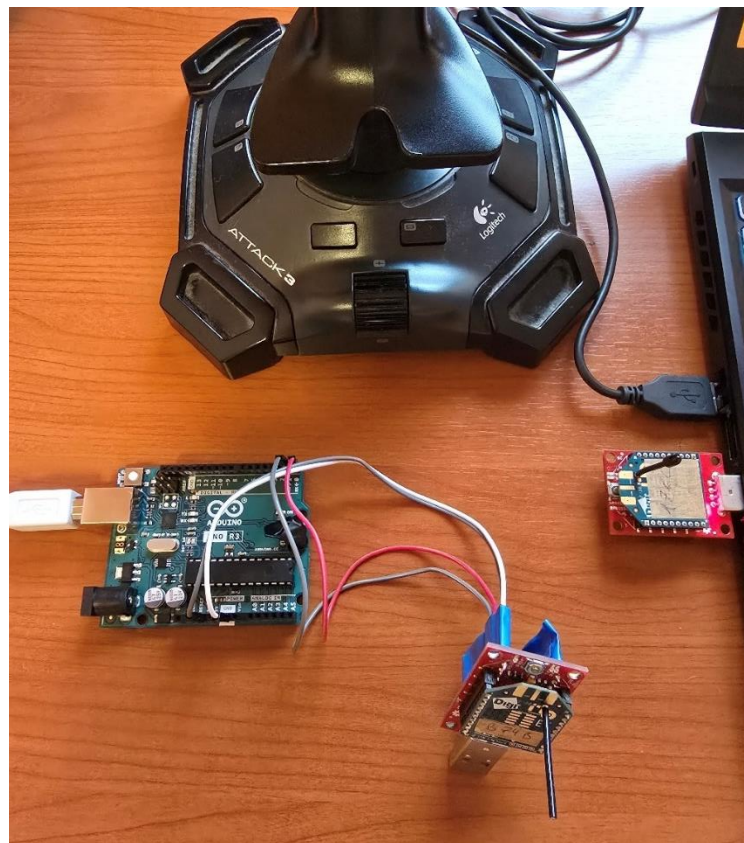
Postavke za XBEE_A obuhvaćaju mrežni identifikator ID=D161, visoki dio odredišne adrese DH=0013A200, niski dio DL unesen kao zadnjih osam znakova MAC adrese XBEE_B, čvorni identifikator NI=XBEE_A te nivo izlazne snage PL=0.

⁵ Digi XCTU – besplatni multimetodski alat proizvođača Digi International za konfiguraciju, testiranje i upravljanje XBee i drugih RF modula putem grafičkog sučelja.

Za XBEE_B su istovjetni parametri, pri čemu se DL postavlja na SL vrijednost XBEE_A, a NI postaje XBEE_B. Mrežni ID osigurava da se oba uređaja povezuju unutar iste DigiMesh mreže, DH i DL definiraju međusobno adresiranje paketa, NI olakšava identifikaciju modula u sustavu, dok minimalna izlazna snaga PL=0 smanjuje nepotrební domet i smanjuje mogućnost smetnji u gusto naseljenim ili RF-zasićenim okruženjima.

Oba modula rade na brzini serijske veze od 115 200 bps. Svaki se XBee modul napaja stabiliziranim 3,3 V; budući da Arduino radi na 5 V logici, između njegovih UART pinova i XBee modula ugrađen je level shifter (ili se koristi TTL-UART pin na 3,3 V), čime se osigurava kompatibilnost i sprječava oštećenje modula.

Nakon podešavanja svih parametara u Digi-XCTU-u, klikom na “Write radio settings” trajno se sprema konfiguracija, što rezultira pouzdanom i niskolatencijskom serijskom vezom između Python aplikacije na laptopu i Arduinoom upravljanoj kontrolera (Digi, 2018).



Slika 4.1 Povezivanje joysticka i Arduina putem laptopa i xbee modula

4.2. Joystick

Za upravljanje letjelicom koristi se Logitech Attack 3 joystick čiji analogni ulazi u neutralnom položaju ne vraćaju vrijednost (0, 0), nego srednju vrijednost (127, 127). Kako bi se centrirale upravljačke komande, u Arduinu se prvo očitava šesteročlani niz vrijednosti poslanih s Python skripte na laptopu preko XBee veze. Nakon parsiranja tih vrijednosti, pomiču se osi X i Y za 127 jedinica kako bi se iz neutralne zone dobilo (0, 0).

Radi sprječavanja „drhtanja” u centru, definirane su dead-zone tako da se svi ulazi između 110 i 145 pretvaraju u 127, a zatim se normaliziraju oduzimanjem 127, što daje jedinstveni koordinatni sustav središta:

$$x' = \begin{cases} 0, & 110 \leq x \leq 145 \\ x - 127, & \text{inače} \end{cases}, \quad y' = \begin{cases} 0, & 110 \leq y \leq 145 \\ y - 127, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.1)$$

Na temelju pomaknutih vrijednosti osi izračunava se daljina od centra (r_{xy}) i azimutna koordinata⁶ (kut) pomoću funkcija atan2 i sqrt (formula 4.2), a zatim se raspoređuju brzine triju motora proporcionalno pomaku i osnovnoj brzini z osi.

$$r_{xy} = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}, \quad kut = atan2(y', x') \quad (4.2)$$

Os Z, koja regulira osnovnu brzinu pogona, očitava se iz joystickovog triggera i prelazi iz opsega 0–255 izravno u vrijednost PWM signala⁷ za analogWrite. U slučaju da je osnovna brzina jednaka nuli, svi se motori gase.

⁶ Azimutna koordinata – horizontalni kut između referentne osi (obično sjevera) i linije gledanja do objekta, izražen u stupnjevima od 0° do 360°.

⁷ PWM signala – modulacija širine impulsa, tehnika regulacije prosječnog napona ili snage uređaja prilagođavanjem omjera trajanja uključenog i isključenog stanja impulsa.

4.3. Python upravljački algoritmi

Python skripta pokreće se na laptopu i putem biblioteka `evdev` i `pyserial` ostvaruje ulazno-izlaznu petlju koja čita podatke s Logitech Attack 3 joysticka, oblikuje ih u serijsku poruku i šalje XBee modulom prema Arduino (Paredes, 2011).

Prilikom inicijalizacije otvara se serijski port (`/dev/ttyUSB0`) na brzini od 115 200 bps te se paralelno pokreće watchdog thread, mehanizam koji provjerava je li proteklo više od 0,1 sekunde od zadnjeg slanja poruke i, ako jest, ponovno šalje posljednju spremljenu poruku kako bi se spriječio prekid u radu motora.

Glavna petlja prvo pronalazi joystick prema nazivu uređaja, a zatim u `read_loop` čita `EV_ABS` događaje za tri analogne osi i `EV_KEY` događaje za tri gumba. Svaka promjena vrijednosti u opsegu 0–255 ažurira stanje u zajedničkom Python rječniku `state`.

Kad su sve tri analogne osi inicijalizirane (nisu `None`), poziva se funkcija `send_state`, koja iz rječnika oblikuje tekstualni niz u formatu `x:<vrijednost> y:<vrijednost> z:<vrijednost> a:<0/1> b:<0/1> c:<0/1>\r\n`, upisuje ga na serijski port i sprema u varijablu `last_message` uz bilježenje vremena slanja.

Time se osigurava glatka i brza komunikacija: promjene pomaka joysticka odmah se prosljeđuju na Arduino, dok watchdog zadatak garantira da čak ni kratkotrajni gubitak ulaza ili prekid čitanja ne zaustavi nadzor motora. Ovaj pristup kombinira nisku latenciju pri prijenosu upravljačkih komandi s robusnošću protiv nestabilnosti serijske veze.

Funkcija `watchdog_task(ser):`

Beskonačna petlja:

Pričekaj `watchdog_interval` sekundi

Zaključaj pristup podacima

Ako postoji `last_message` I prošlo je $\geq$ `watchdog_interval` od zadnjeg slanja:

Pošalji `last_message` preko `ser`

Zabilježi trenutno vrijeme kao `last_send_time`

Funkcija `send_state(ser):`

Napravi poruku `msg` u formatu:

`"x:<vrijednost> y:<vrijednost> z:<vrijednost> a:<0/1> b:<0/1> c:<0/1>"`

Pošalji `msg` preko `ser`

Zaključaj pristup podacima

Spremi `msg` u `last_message`

Zabilježi trenutno vrijeme kao `last_send_time`

4.4. Arduino firmware – čitanje senzora i upravljanje motorima

Arduino firmware implementiran na mikrokontroleru ima dvostruku funkciju: kontinuirano čitanje podataka s inercijalne mjerne jedinice (IMU) te generiranje PWM signala za upravljanje motorima letjelice.

Komunikacija s računalom odvija se putem serijskog porta na 115200 bps, što omogućuje dovoljno brzu razmjenu podataka za stvarno-vremensko upravljanje. Ulazni podaci dolaze u obliku niza brojeva razdvojenih razmacima, gdje su prva tri parametra namijenjena translacijskom upravljanju (X, Y, Z osi), a preostali parametri dodatnim funkcijama ili testiranju.

Nakon parsiranja podataka, za regulaciju brzine motora koristi se funkcija `analogWrite()` na definiranim pinovima (9, 10, 11), koji su hardverski sposobni generirati PWM signal (Shirriff, 2024). Vrijednosti koje se proslijeđuju funkciji kreću se od 0 do 255, gdje 0 odgovara stalnoj razini od 0 V (motor zaustavljen), a 255 predstavlja puni radni napon od približno 5 V (maksimalna brzina).

Ugrađeni PWM modul mikrokontrolera ne mijenja stvarni napon izvora, već vrlo brzo uključuje i isključuje izlazni pin određenim omjerom trajanja signala (duty cycle). Na taj način motor "vidi" efektivni napon koji je proporcionalan zadanoj vrijednosti, što omogućuje glatku i preciznu kontrolu brzine bez potrebe za dodatnim analogno-digitalnim pretvaračima.

Senzorski dio koda koristi biblioteku `LSM9DS1TR-SOLDERED` za dohvat sirovih podataka s akcelerometra, žiroskopa i magnetometra. Ti se podaci dodatno skaliraju i prolaze kroz postupak kalibracije, što uključuje kompenzaciju pomaka (offset) i korekciju skaliranja (scale factor), kako bi se uklonile pogreške senzora. Na temelju tih korigiranih vrijednosti računa se orijentacija letjelice u terminima roll (valjanje), pitch (poniranje) i yaw (ili heading, zaošijanje). Za filtriranje mjerenja koristi se low-pass filter, koji postiže kompromis između brzog odziva sustava i stabilnosti podataka.

Posebna pažnja posvećuje se postavljanju maksimalnog raspona senzora (gyro ± 2000 °/s, akcelerometar ± 16 g) kako bi se izbjeglo zasićenje mjernog sustava pri naglim ili brzim manevrima.

Osim promjene skale, u kodu se podešava i najveća dostupna frekvencija uzorkovanja (sample rate), primjerice, za žiroskop i akcelerometar 952 Hz, a za magnetometar 80 Hz.

Ovo povećanje sample ratea smanjuje vremenski razmak između mjerenja i poboljšava preciznost, posebno u dinamičnim uvjetima, čime se smanjuje rizik od propuštanja brzih promjena orijentacije.

Arduino kod pomoću kojeg se ostvaruje inicijalizacija navedenih postavki:

```
Kreiraj IMU objekt
Postavi parametre žiroskopa (uključen, raspon senzora, frekvencija uzorkovanja)
Postavi parametre akcelerometra (uključen, raspon senzora)
Postavi parametre magnetometra (uključen, raspon senzora, frekvencija uzorkovanja)
Pokreni inicijalizaciju IMU senzora
```

4.5. Izračun i filtriranje podataka

Za izračun orijentacije moguće je koristiti dva pristupa: direktno računanje headinga iz IMU senzora (kombinacija akcelerometra i magnetometra) ili integraciju kutne brzine dobivene iz žiroskopa. Formule za izračun valjanja ϕ , poniranja θ , zaošijanja ψ_m te zaošijanja uz integraciju kutne brzine ψ_n :

$$\tan \phi = \frac{-a_y}{-a_z}, \phi \in (-\pi, \pi) \quad (4.3)$$

$$\tan \theta = \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.4)$$

$$\tan \psi_m = \frac{-m_y * \cos \phi + m_z * \sin \phi}{m_x * \cos \theta + m_y * \sin \theta * \sin \phi + m_z * \cos \phi * \sin \theta} \quad (4.5)$$

$$\psi_n = \psi_{n-1} + \Delta t * g_z \quad (4.6)$$

pri čemu su a , m , g mjerenja akcelerometra, magnetometra i žiroskopa u indeksiranim osima. Dobivenom zaošijanju je potrebno oduzeti deklinaciju zemljinog magnetskog polja Δ_m , koje ovisi o geografskoj dužini i širini, da bi se uzela u obzir razlika između pravog i magnetskog sjevera.

$$\psi = \psi_m + \Delta_m \quad (4.7)$$

U kodu je implementiran jednostavni low-pass filtar koji kombinira trenutna mjerenja i prethodno filtrirane vrijednosti, čime se smanjuje šum i iznenadne promjene:

$$\phi_n = (1 - \alpha) * \phi_{n-1} + \alpha * \phi_{trenutni} \quad (4.8)$$

pri čemu je α propusnost filtra (u eksperimentima postavljena na 0.2), $\phi_{trenutni}$ kut dobiven iz najnovijih podataka IMU-a, a ϕ_n promatrana vrijednost.

Najbolja praksa u ovom slučaju je da se početna pozicija headinga odredi dok letjelica miruje, koristeći kompletan IMU set podataka, jer tada mjerenje magnetometra daje najtočniji apsolutni smjer. Tijekom kretanja, za praćenje promjena orijentacije preporučuje se integracija kutne brzine iz žiroskopa, jer rotacijska brzina obično varira glatko i konzistentno. Osim toga, ovaj pristup eliminira problem diskontinuiteta kod prelaska s 360° na 0° , što je česta pojava pri izračunu headinga izravno iz magnetometra. Time se postiže stabilniji i pouzdaniji izračun orijentacije, posebno tijekom dinamičnih manevara.

4.6. Python skripte za prijenos i obradu podataka

Na strani računala koristi se skup Python skripti koje omogućuju dvosmjernu komunikaciju s Arduinoom te prikupljanje i obradu telemetrije. Skripta `serial_sendRecWd.py` implementira slanje naredbi putem serijskog porta te istovremeno čita odgovor mikrokontrolera, čime se ostvaruje kontrolna petlja. Komunikacija uključuje i watchdog mehanizam na Python strani, koji osigurava da se podaci redovito šalju, u suprotnom Arduino automatski prelazi u failsafe režim, detaljnije objašnjeno u poglavlju 4.8.

Dodatne skripte služe za vizualizaciju prikupljenih podataka, npr. prikaz kuta zaošijanja u stvarnom vremenu, što pomaže pri podešavanju algoritama upravljanja. Python kod obrađuje ulazne podatke od korisnika (npr. iz joysticka ili tipkovnice), pretvara ih u format prihvatljiv Arduino i osigurava sinkronizaciju serijske komunikacije. Time se postiže pouzdana interakcija između korisnika i letjelice.

Primjer csv datoteke koja se koristi za spremanje podataka poslanih s Arduina vidljiv je na slici (Slika 4.2).

1	roll,pitch,yaw
2	-30.19,-25.24,197.97
3	-30.26,-25.36,197.75
4	-30.26,-25.34,198.10
5	-30.19,-25.27,197.99
6	-30.28,-25.41,197.78
7	-30.88,-25.29,197.65
8	-30.25,-25.23,196.86
9	-30.08,-25.34,197.12
10	-29.78,-24.99,196.31
11	-29.95,-25.27,196.80
12	-30.27,-25.27,197.76

Slika 4.2 Primjer podataka spremljenih u csv formatu

4.7. Algoritmi upravljanja letjelicom

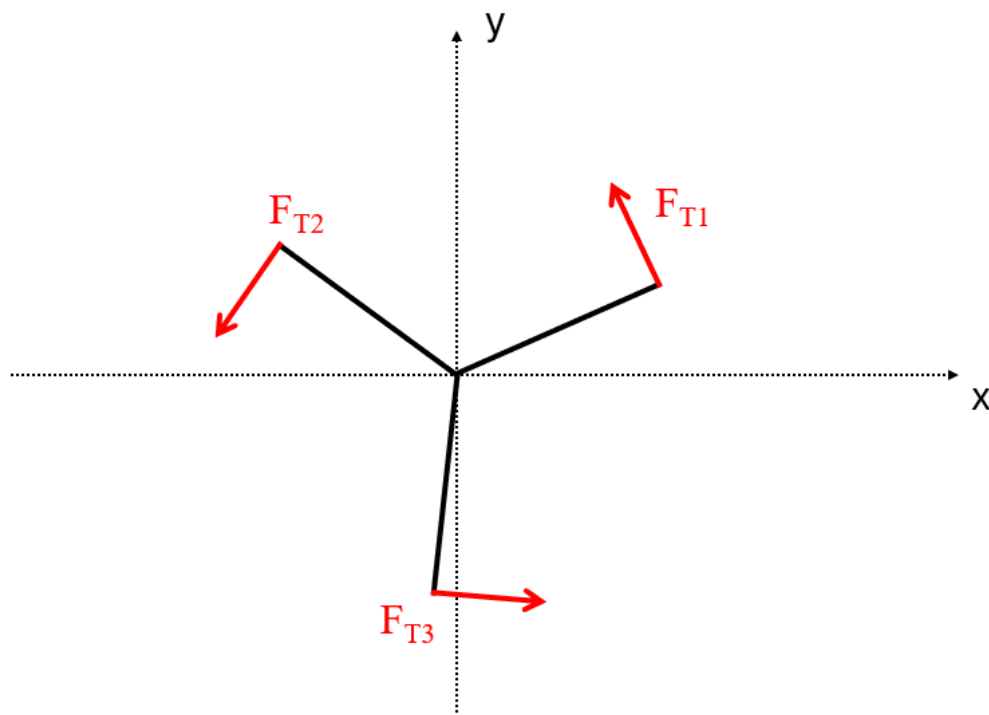
Algoritam upravljanja implementiran u Arduino temelji se na geometrijskom izračunu brzina triju motora kako bi se postiglo željeno kretanje u prostoru i stabilizacija orijentacije letjelice.

Kontrola u vertikalnom smjeru vrlo je jednostavna. Povećanjem jačine rada svih motora proporcionalno povećava se kutna brzina rotacije cijele letjelice, a time i ukupan uzgon (vidi formulu 2.1). Promjenom vrijednosti varijable baseSpeed mijenja se kutna brzina, što izravno utječe na povećanje ili smanjenje vertikalne brzine, odnosno na visinu leta.

Ako su potisci svih motora jednaki, zbog simetrije konstrukcije njihov vektorski zbroj u horizontalnoj ravnini (XY) jednak je nuli:

$$\overrightarrow{F_{XY}} = \overrightarrow{F_{T1}} + \overrightarrow{F_{T2}} + \overrightarrow{F_{T3}} = \vec{0} \quad (4.9)$$

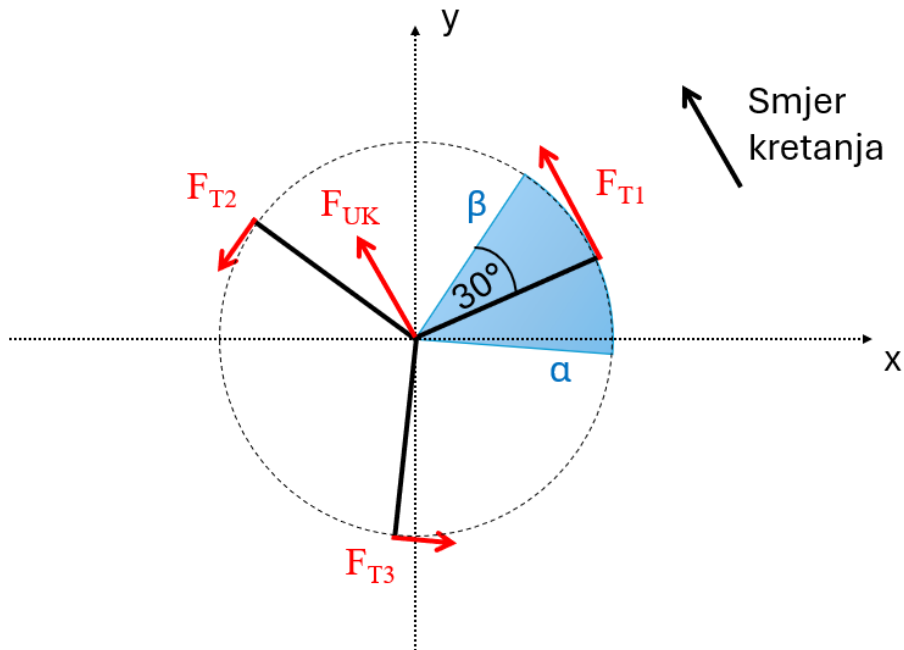
Ova situacija prikazana je na slici (Slika 4.3), gdje su tri sile potiska F_{T1} , F_{T2} , F_{T3} međusobno razmaknute za 120° .



Slika 4.3 Sile potiska motora

Kretanje u horizontalnoj ravnini ostvaruje se pulsiranjem potiska pojedinih motora tijekom svakog ciklusa vrtnje. Kada se smjer sile potiska jednog motora poravna s željenim smjerom kretanja, njegov se potisak privremeno poveća, dok se potisak preostala dva motora proporcionalno smanji. Na taj način ukupna kutna brzina ostaje približno konstantna, ali se mijenja rezultanta sila u XY ravnini.

Pritom se promjena potiska ne odvija samo u točki poravnanja, već unutar kružnog sektora od približno $\pm 30^\circ$ oko željenog smjera (granice α i β). Ovakav pristup omogućuje da integracija sila tijekom rotacije ima što veći doprinos u željenom smjeru gibanja. Ova situacija prikazana je na slici (Slika 4.4), gdje motor 1 ostvaruje veći potisak od motora 2 i 3, pa ukupna rezultanta pokazuje u smjeru potiska F_{T1} .



Slika 4.4 Sile potiska motora za vrijeme horizontalnog kretanja

Ulazne vrijednosti s joysticka x , y i z se preračunavaju u upravljačke vrijednosti r_{xy} , kut po principu iz poglavlja 4.2. Kako bi se održala stabilnost i spriječilo preopterećenje, maksimalna dodatna komponenta potiska ograničava se na polovicu osnovne brzine. Time se osigurava da najslabiji motor uvijek radi na barem 50% osnovne vrijednosti.

```
kut ← atan2(speedY, speedX) // smjer kretanja u XY
r_xy ← sqrt(speedX2 + speedY2) // iznos kretanja
r_max ← baseSpeed / 2 // najsporiji ≥ 50% brzine
```

4.8. Watchdog i failsafe logika pri gubitku signala

Watchdog mehanizam osigurava sigurnost rada letjelice u slučaju prekida komunikacije. Na Arduino strani implementiran je jednostavni timer (wdTime) koji prati vrijeme od zadnje primljene poruke s računala. Ako vrijeme prekorači zadani prag (npr. 300 ms), funkcija shutdown() automatski zaustavlja sve motore postavljanjem PWM izlaza na nulu. Time se sprječava nekontrolirani let ili oštećenje opreme pri gubitku veze.

Failsafe logika također uključuje vraćanje komandnih varijabli na neutralne vrijednosti ($X = 127$, $Y = 127$, $Z = 0$), čime se izbjegava neželjeno ponašanje pri ponovnom uspostavljanju veze. Na strani Python skripti, watchdog osigurava redovito slanje podataka; u slučaju pada softvera ili prekida veze, Arduino prepoznaje izostanak komunikacije i automatski aktivira zaštitni mehanizam.

Ovaj pristup je ključan za sustave s udaljenim upravljanjem, gdje kašnjenja ili gubitak signala mogu dovesti do nesigurnih situacija.

5. Integracija, testiranje i optimizacija dizajna krila

Prije nego što je bilo moguće započeti s testiranjem, bilo je nužno fizički integrirati sve elektroničke i mehaničke komponente, provesti kalibraciju senzora te osigurati da sustav radi pouzdano u osnovnim uvjetima.

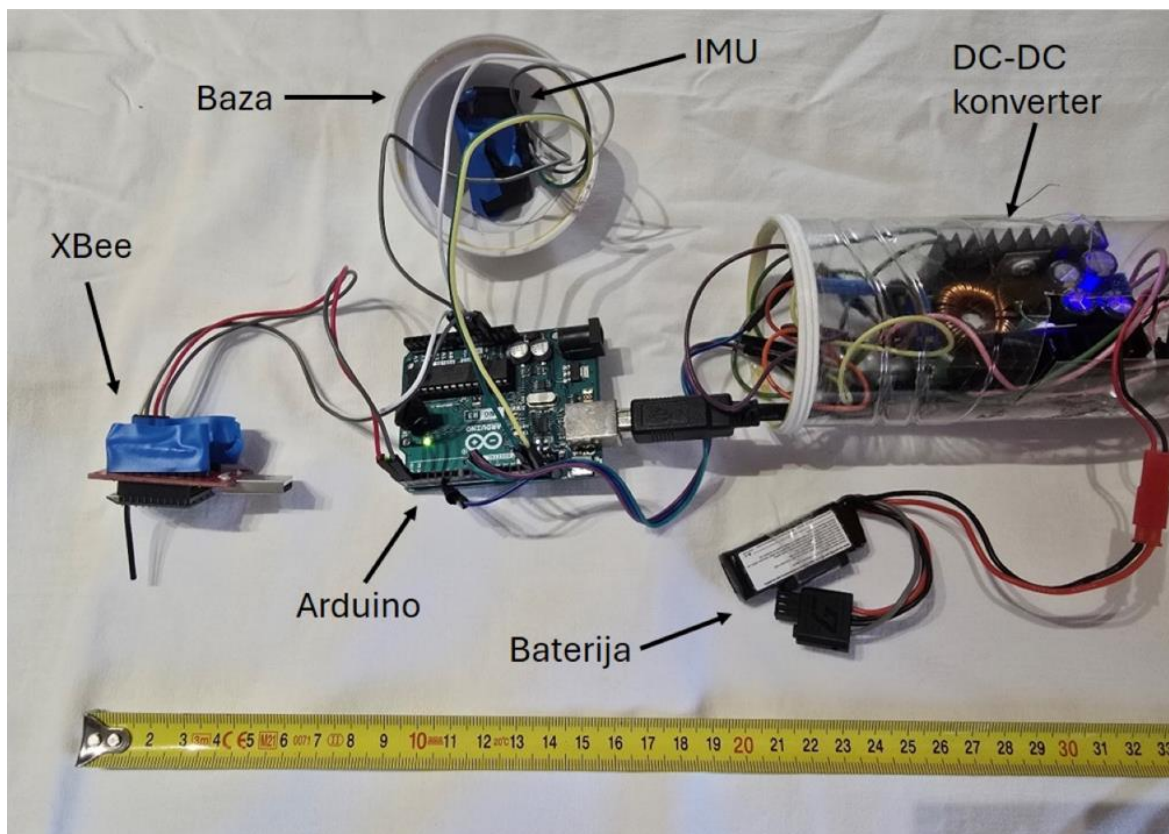
5.1. Fizička montaža

Sve elektroničke komponente postavljene su u plastičnu bocu kojoj je odrezano dno, a donji otvor zatvoren je 3D isprintanom kupolom koja se navija na bocu poput čepa. Na vrhu boce, koji je trajno zalijepljen za krila, nalazi se glavni spoj s aerodinamičkim elementima.

IMU senzor zalijepljen je na dno kupole, čime se osigurava konzistentna orijentacija senzora tijekom okretanja. Time se minimizira mogućnost pogreške u mjerenju kutnih brzina i orijentacije.

Na rubu boce izrezan je otvor kroz koji se baterija lako ubacuje i vadi radi punjenja. Dodatno, na bočnom dijelu boce napravljen je izrez pored USB priključka Arduina, što omogućuje brzo reprogramiranje mikrokontrolera bez potrebe za rastavljanjem cijele konstrukcije.

Cijela konstrukcija vidljiva je na slici (Slika 5.1).



Slika 5.1 Montaža komponenata unutar baze letjelice

5.2. Kalibracija sustava

Kalibracija IMU-a je kritičan korak za dobivanje pouzdanih orijentacijskih informacija i za uspješnu kontrolu letjelice. Koristi se standardni model korekcije mjerenja magnetometra i akcelerometra zapisan formulom:

$$m = A(m' - b) \quad (5.1)$$

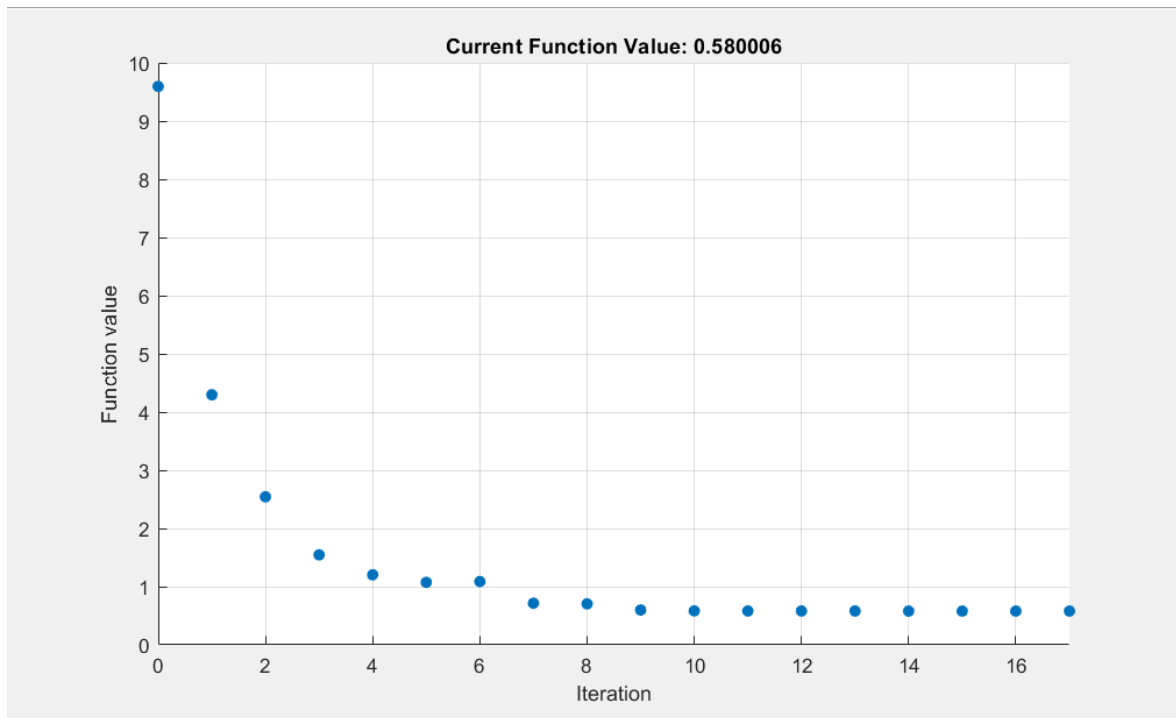
gdje je m' vektor sirovih mjerenja senzora, b predstavlja hard-iron offset (konstantni pomak, odnosno translaciju centra mjerenja), a A je matrica koja opisuje soft-iron iskrivljenja i korekcije skaliranja/rotacije. Dakle, prvo se od sirovog mjerenja oduzima pomak b , a zatim se rezultat množi invertiranom transformacijom A .

Estimacija parametara radi se iterativnim numeričkim postupkom. Definira se funkcija pogreške koja mjeri koliko su vrijednosti udaljene od željenog modela. Za akcelerometar, pri mirovanju se očekuje da je normirani vektor ubrzanja približno $\|a\| \approx g$. Stoga se koristi

funkcija pogreške koja računa srednji kvadrat odstupanja norme od g , gdje input označava sirova mjerenja senzora za i -ti uzorak:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\|(\text{input}_i - b)A^T\| - g)^2 \quad (5.2)$$

Za minimizaciju se koristi MATLAB funkcija `fmincon` jer omogućava postavljanje granica (bounds) i dobro radi s nelinearnim problemima ovog tipa. Optimizacija je inicijalizirana bliskim identitetskim rješenjem ($A = I$, $b = 0$) i ograničena razumnim gornjim/donjim granicama kako bi se spriječilo odstupanje u neprirodnim rješenjima (Slika 5.2).



Slika 5.2 Graf minimizacije funkcije pogreške kroz iteracije

Za magnetometar je procedura slična, ali se koristi MATLAB funkcija `magcal` koja pomoću podataka rotacije u svim smjerovima daje resultantne A i b (MATLAB, 2025).

Kalibracija žiroskopa odvija se na isti način kao i za akcelerometar, a konačni rezultati kalibracija koji se upisuju u firmware iznose:

```
=== Akcelerometar kalibracija ===
```

```
Matrica A:
```

```
1.0003    0.0000    0.0051
0.0000    1.0000    0.0012
0.0051    0.0012    0.9105
```

```
Offset b:
```

```
0.0093    0.0001    0.0827
```

```
=== Žiroskop kalibracija ===
```

```
Matrica A:
```

```
0.9000    0.0253    0.5000
0.0253    0.9236   -0.5000
0.5000   -0.5000    0.9000
```

```
Offset b:
```

```
-1.0000    1.0000   -1.0000
```

```
=== Magnetometar kalibracija ===
```

```
Matrica A:
```

```
1    0    0
0    1    0
0    0    1
```

```
Offset b:
```

```
0.2391   -0.1571   -0.5319
```

5.3. Plan i scenariji testiranja

Testiranje letjelice provedeno je u kontroliranim uvjetima, pri čemu je letjelica postavljena na ravnu, čvrstu podlogu kako bi se isključio utjecaj vanjskih sila poput vjetra ili neravnog terena.

Cilj ovog pristupa bio je precizno analizirati reakcije sustava upravljanja, raspodjelu momenta te promjene kutne brzine ovisno o jačini rada motora. Plan testiranja obuhvatio je dvije osnovne serije pokusa.

U prvoj seriji, sva tri motora bila su aktivna, a brzina rada povećavana je postupno, od minimalne do maksimalne vrijednosti PWM signala. U drugoj seriji provedeni su identični testovi, ali samo s dva aktivna motora, čime se željelo procijeniti kako asimetrična raspodjela pogona utječe na stabilnost i kutnu brzinu. Za oba scenarija provedeni su i pokusi s naglim prelaskom motora na maksimalnu brzinu, čime je analizirana sposobnost sustava da podnese nagle promjene opterećenja.

Planirano je da se za svaki test prikupe podaci o kutnoj brzini u funkciji jačine rada motora, te da se rezultati prikažu u obliku grafova, po jedan za testove s tri aktivna motora i po jedan za testove s dva motora. Ovakav pristup omogućuje izravnu usporedbu simetričnog i asimetričnog pogona u kontroliranim uvjetima.

Slika (Slika 5.3) isječena iz videosnimke testiranja, dostupne na poveznici u poglavlju 9.



Slika 5.3 Testiranje letjelice

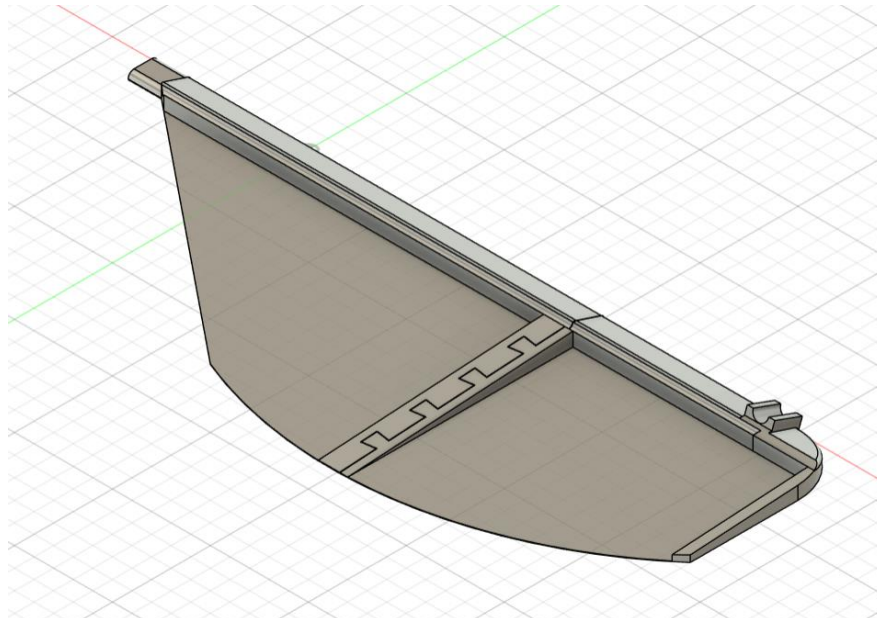
5.4. Optimizacija dizajna krila

Optimizacija krila provedena je u softveru Autodesk Fusion, pri čemu su korišteni 3D modeli koji omogućuju preciznu prilagodbu geometrije i strukture. Krilo je projektirano kao kombinacija čvrstog kostura i tanke aerodinamičke plohe. Kostur je izrađen tako da bude

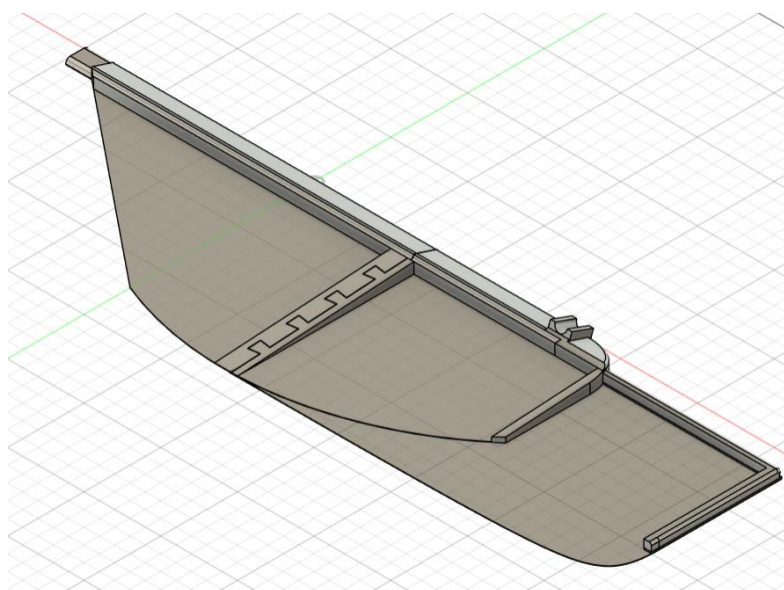
dovoljno robustan kako bi spriječio savijanje pri velikim brzinama vrtnje, dok je plohu činilo samo dva sloja plastike kako bi se smanjila masa.

Posebna pažnja posvećena je raspodjeli širine krila, ona su šira što su udaljenija od centralnog konektora, budući da se na tim mjestima vrte većom brzinom i daju veći doprinos stvaranju uzgona.

Tijekom ispitivanja dvije verzije krila, pokazalo se da početna verzija s manjim dimenzijama ima prednost u stabilnosti pri pokretanju, jer je sklonost naginjanju letjelice manja u odnosu na optimiziranu verziju s većim krilima (Slika 5.4). Međutim, druga verzija pruža veći potencijal za generiranje uzgona, iako je zbog ograničenja pogona taj potencijal trenutačno neiskorišten (Slika 5.5).



Slika 5.4 Prva verzija krila



Slika 5.5 Druga verzija krila

5.5. Prikupljanje podataka

Tijekom testiranja prikupljeni su podaci o kutnoj brzini pomoću ugrađenog IMU sustava, uz kontinuirano bilježenje vrijednosti PWM signala poslanog na motore.

U početnim testovima mjerene su i bilježene vrijednosti vremena, kuteva roll, pitch i yaw, te kutne brzine. Međutim, kako bi se omogućilo slanje podataka većom frekvencijom bez gubljenja paketa, u kasnijim testovima paket podataka je smanjen tako da sadrži samo yaw i kutnu brzinu.

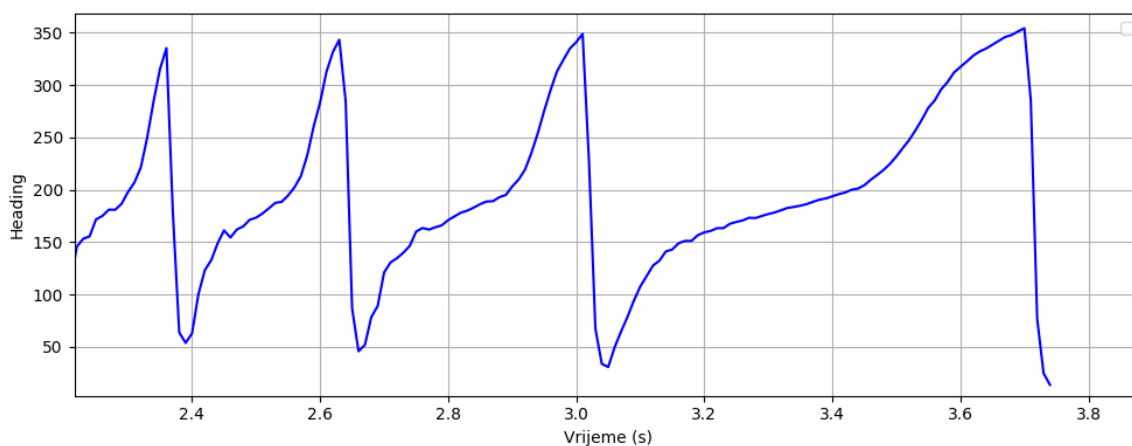
Podaci su se bilježili i spremali u CSV datoteke, u formatu opisanom u poglavlju 4.6, čime je olakšana njihova kasnija analiza u MATLAB-u i Pythonu.

6. Rezultati i rasprava te buduće primjene

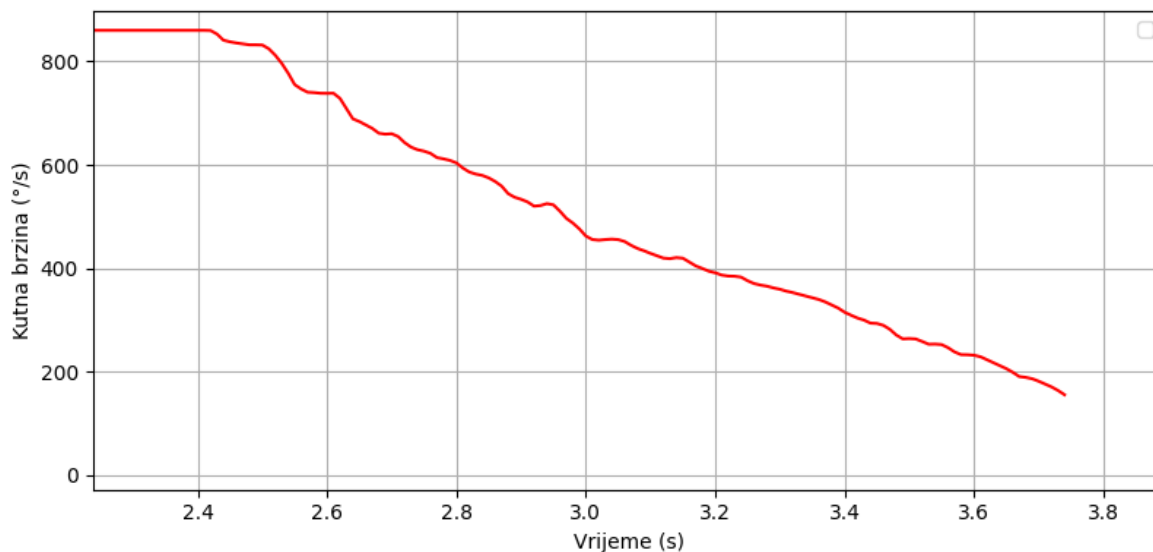
6.1. Rezultati

Sva prikazana mjerenja i rezultati odnose se na verziju letjelice s prvim tipom krila, koja se pokazala praktičnija i uspješnija za testiranje.

Kao što je navedeno u poglavlju 4.5, pri izračunu usmjerenja pomoću magnetometra, javlja se problem diskontinuiteta kod prijelaza s 360° na 0° , vidljivo na grafu (Slika 6.1). Korištenjem žiroskopa eliminira se navedeni problem, odnosno mjerenja su kontinuirana, a na grafu (Slika 6.2) se vidi kutna brzina istog eksperimenta kao s grafa (Slika 6.1).

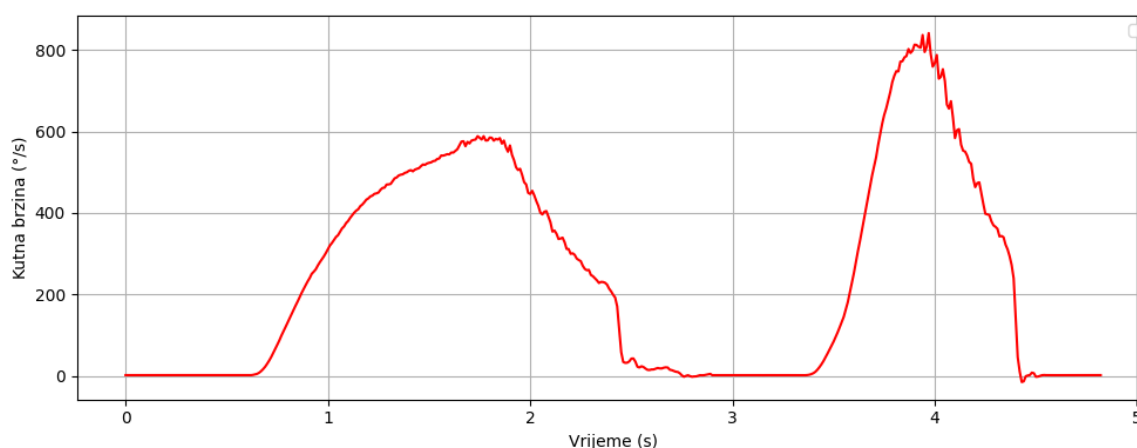


Slika 6.1 Graf ovisnosti izračunate vrijednosti usmjerenja (heading, pomoću formule 4.5 i filtra 4.6) u odnosu na vrijeme, test 1



Slika 6.2 Graf ovisnosti kutne brzine letjelice u odnosu na vrijeme, test 1

Analiza prikupljenih podataka pokazala je da pri maksimalnoj jačini rada i uz aktivna sva tri motora, letjelica postiže stabilnu kutnu brzinu od približno 1400°/s, što odgovara otprilike četiri potpuna okreta u sekundi. Ova brzina postiže se postupno kada se motori polako ubrzavaju, dok se kod naglog uključivanja na maksimalnu snagu javlja izraženiji skok kutne brzine prije nego se sustav stabilizira. Na grafu (Slika 6.3) vidi se razlika između postupnog i naglog povećanja snage motora.

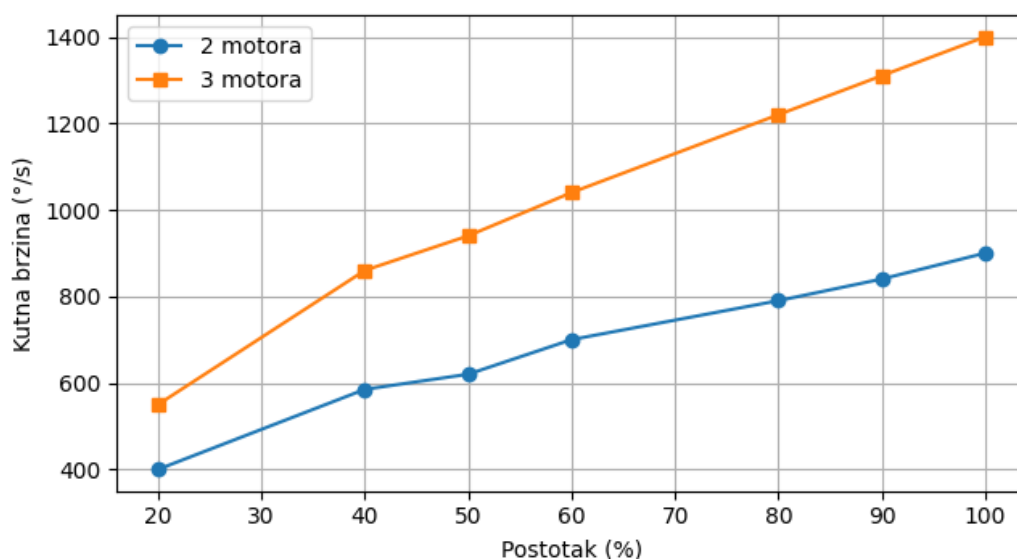


Slika 6.3 Graf ovisnosti kutne brzine letjelice u odnosu na vrijeme, test 2

Kod testova s dva aktivna motora uočeno je smanjenje maksimalne kutne brzine te pojava lagane vibracije zbog neravnomjerne raspodjele momenta. Razlike u odzivu jasno su vidljive u tablici 1 i grafu (Slika 6.4), gdje je pri potpunom pogonu rast kutne brzine za otprilike 50% veći nego kod pogona na 2 motora.

Tablica 1 Ovisnost kutne brzine letjelice u odnosu na aktivnih motora i njihove jačine

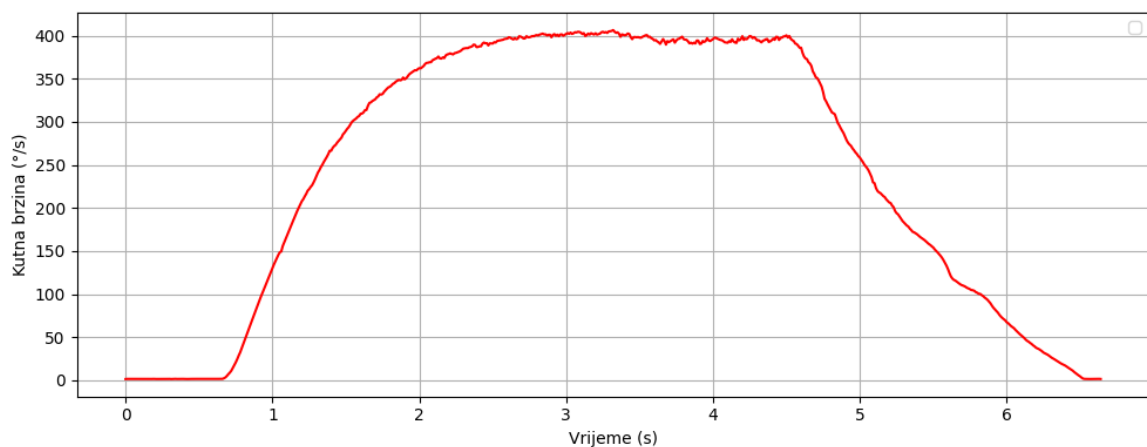
Jačina motora	Kutna brzina uz 2 motora aktivna (°/s)	Kutna brzina uz 3 motora aktivna (°/s)
20%	400	550
40%	585	860
50%	620	940
60%	700	1040
80%	790	1220
90%	840	1310
100%	900	1400



Slika 6.4 Graf ovisnosti kutne brzine letjelice o jačini rada motora

Failsafe funkcije testirane su u uvjetima u kojima letjelica nije mogla poletjeti, ali je zbog žiroskopskog efekta održavala uspravan položaj na podlozi. Ovakav pristup omogućio je sigurnu provjeru reakcije sustava u simuliranim situacijama gubitka signala, smanjenja napona napajanja ili namjerne deaktivacije motora.

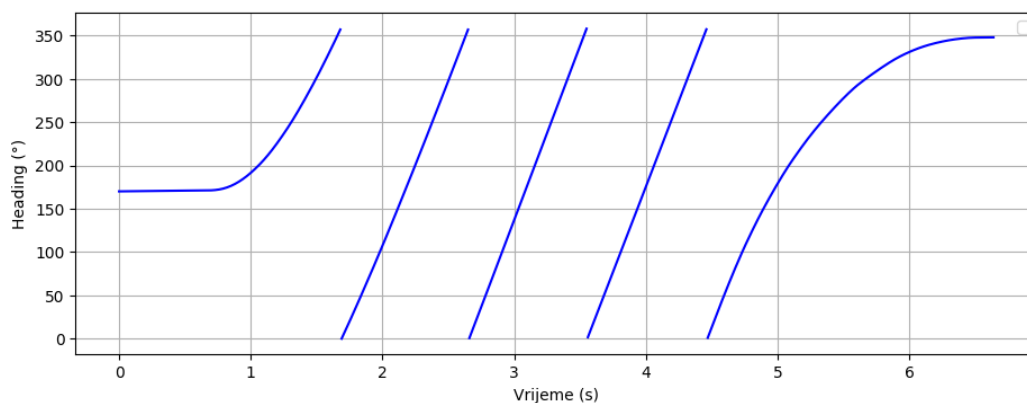
Testovi su pokazali da, kada se motori isključe, kutna brzina se postupno smanjuje (Slika 6.5) zahvaljujući konstrukcijskom rješenju letjelice i otporu zraka, što rezultira laganim prestankom vrtnje bez naglih destabilizacija. Iako testovi nisu uključivali stvarno slijetanje iz zraka, uvjeti na podlozi dovoljno su vjerno simulirali mehanička opterećenja i odzive motora tijekom zaustavljanja.



Slika 6.5 Graf ovisnosti kutne brzine letjelice o vremenu, test 3 - gubitak signala

Trenutačna verzija letjelice nema dovoljno snage za polijetanje. Dobiveni rezultati optimizacije krila stoga služe kao temelj za daljnje modifikacije s ciljem postizanja balansa između stabilnosti i učinkovitosti generiranja uzgona, uz istodobno povećanje ukupnog uzgona letjelice.

Heading letjelice kroz eksperiment s grafa (Slika 6.5), izračunat integracijom kutne brzine, pri čemu je početno usmjerenje određeno pomoću magnetoskopa, prikazan je na grafu (Slika 6.6).



Slika 6.6 Graf ovisnosti usmjerenja letjelice u odnosu na vrijeme, test 3

Za razliku od grafa (Slika 6.1), diskontinuitet ne stvara problem pri izračunu (prijelaz je linearan uzimajući u obzir omatanje oko raspona od 360°). Ovim postupkom, uz dobro kalibriran žiroskop, moguće je dobiti podatke koji se koriste u izračunima algoritma skretanja (Poglavlje 4.7).

6.2. Rasprava

Kao što je komentirano u rezultatima, trenutačna letjelica nema dovoljno uzgona za polijetanje. Dobiveni rezultati optimizacije ipak će poslužiti kao temelj za daljnje modifikacije s ciljem postizanja balansa između stabilnosti i učinkovitosti generiranja uzgona.

Poboljšanja se mogu provoditi u nekoliko smjerova: povećanjem površine krila, povećanjem brzine vrtnje (primjenom jačih motora ili smanjenjem mase konstrukcije), te eventualnom promjenom koeficijenta uzgona, što bi uključivalo promjenu kuta postavljanja krila ili aerodinamičkog profila. Posljednju opciju teže je testirati s trenutačno dostupnim resursima, ali predstavlja potencijalni put razvoja.

U obradi podataka s IMU-a moguće je koristiti i druge tipove filtriranja ili metoda čitanja podataka, uključujući složenije fuzije senzorskih podataka poput Kalmanovog filtra ili komplementarnih filtara višeg reda.

Također, sama kalibracija senzora može se provesti detaljnije, uz nelinearne modele i više točaka mjerenja, što bi moglo smanjiti sistematske pogreške.

Tijekom testiranja uočeno je kako gašenjem jednog od tri motora kutna brzina letjelice pada za približno jednu trećinu. Ovaj rezultat ukazuje na to da bi, uz dostatan maksimalni uzgon, bilo moguće postići lebdenje letjelice i s dva motora. Ipak, takav način rada zahtijevao bi značajnu prilagodbu algoritma za horizontalno kretanje, kako bi se kompenzirala manja simetričnost pogona i osigurala stabilnost tijekom letenja.

Letjelica ovog tipa dokazano je izvediva, što potvrđuju i primjeri iz literature i drugih izvora, a aktualna istraživanja predstavljaju korak prema optimizaciji dizajna i kontrole.

6.3. Autorotacija kao sigurnosni mehanizam

S obzirom na jednostavnost mehaničkog koncepta, autorotacija ne zahtijeva dodatne pokretne dijelove ili kompleksne algoritme za aktivaciju, sigurnosna funkcija proizlazi iz same geometrije konstrukcije i rasporeda krila. To je čini posebno pogodnom za edukativne i istraživačke projekte, gdje se traže pouzdana, ali i cjenovno pristupačna rješenja.

U usporedbi s tradicionalnim failsafe mehanizmima multikoptera, koji se najčešće svode na automatsko spuštanje uz preostalu snagu baterije, autorotacijski pristup osigurava pasivnu zaštitu, neovisnu o stanju elektronike i napajanja. Takav pristup značajno povećava operativnu pouzdanost, budući da rizik od potpunog gubitka kontrole gotovo nestaje.

Daljnji razvoj u ovom smjeru mogao bi uključivati optimizaciju aerodinamičkog profila krila za učinkovitiju autorotaciju te testiranja u realnim scenarijima pada s većih visina. Time bi se dodatno kvantificirala sposobnost sustava da osigura sigurno prizemljenje u različitim uvjetima.

6.4. Edukativne i hobi primjene

Razvoj trokrilne bespilotne letjelice otvara brojne mogućnosti za nastavak istraživanja i širenje primjena u različitim područjima, od obrazovanja i hobija do industrijskih rješenja i nadzora ugroženih područja.

Fleksibilna arhitektura sustava omogućuje jednostavno dodavanje novih senzora, prilagodbu softvera i proširenje komunikacijskih protokola, a rotacijski dizajn krila jamči sigurnost i u najzahtjevnijim situacijama.

Zahvaljujući upotrebi Arduino platforme i otvorenog Python koda, bespilotna letjelica predstavlja idealnu edukativnu platformu za studente i amatere. Sastavljanje letjelice, kalibracija senzora, pisanje i prilagodba firmwarea te testiranje rotacije kroz praktične laboratorijske vježbe mogu značajno unaprijediti razumijevanje elektrotehnike, mehatronike i programiranja u STEM obrazovanju.

U hobističkom okruženju, entuzijasti će cijeniti modularnost i prilagodljivost sustava, koji omogućuje eksperimentiranje s različitim propelerima, baterijama ili dodatnim senzorima poput ultrazvuka ili LiDAR-a.

6.5. Istraživačke i industrijske primjene

U istraživačkom kontekstu, ova platforma može služiti za testiranje novih algoritama upravljanja, optimizaciju aerodinamičkih svojstava krila i razvoj autonomnih sustava navigacije u zbunjujućim okruženjima.

Industrijski sektor može koristiti letjelicu za inspekciju teško dostupnih objekata, poput konstrukcija vjetroelektrana, visokih dimnjaka ili čeličnih mostova, gdje je sigurno spuštanje ključna prednost rotacijskog dizajna (Kanellakis, Fresk, Mansouri, Kominiak, & Nikolakopoulos, 2019). Daljnji razvoj uključuje integraciju sofisticiranih modula za obradu zvuka i vibracija, što bi moglo pomoći u preventivnom otkrivanju oštećenja konstrukcija.

6.6. Integracija kamere i obrada slike

Dodavanjem CMOS kamere visoke rezolucije i 16-bitne video-stream komunikacije letjelica se može pretvoriti u pravu pokretnu nadzornu stanicu, sposobnu za snimanje, prijenos i analizu videozapisa u stvarnom vremenu.

Kamera je smještena u središtu tijela letjelice, koje se, zahvaljujući rotacijskom dizajnu, okreće sinkronizirano s tri krila. Time se pri svakom punom okretu ostvaruje kompletan panoramski prikaz od 360°, bez mrtvih kutova ili potrebe za dodatnim mehanizmom zakretanja (gimbalom).

Tijekom leta, feed kamere prenosi se kroz XBee ili alternativni širokopojasni link na zemaljsku stanicu, gdje ga Python aplikacija obrađuje pomoću OpenCV biblioteke. U praksi to znači da je uz minimalnu latenciju moguće pokrenuti algoritme za detekciju i

prepoznavanje objekata, npr. ljudi, vozila ili oštećenih građevinskih konstrukcija te u stvarnom vremenu označavati i bilježiti koordinate kritičnih točaka.

Dodatno, modul za strukturirano svjetlo omogućuje slojevito mapiranje terena i izradu 3D modela okoline, što je neprocjenjivo za precizne geodetske ili arhitektonske primjene. U poljoprivredi, takav sustav lako se može nadograditi termalnom kamerom pa se može pratiti stanje vegetacije, identificirati stres biljaka ili detektirati pojavu štetnika prema promjeni temperature lista.

6.7. Nadzor ugroženih područja i vanjskih utjecaja

Bespilotne letjelice se sve češće koriste u spasilačke svrhe zbog svoje fleksibilnosti, brze implementacije i sposobnosti djelovanja u okruženjima nepristupačnima ljudskim ekipama. Zahvaljujući rotacijskom dizajnu i mogućnosti montaže zaštitnih kućišta, predložena letjelica može se koristiti za izviđanje ili hitni nadzor područja pogođenih prirodnim katastrofama poput klizišta, poplava ili požarišta.

Posebna prednost konstrukcije je činjenica da se cijela struktura, uključujući krila i tijelo, tijekom leta okreće sinkronizirano. Time se omogućuje da kamera ugniježđena u središtu letjelice pruža kontinuiranih 360° pregled terena, što značajno olakšava brzu prosudbu situacije i identifikaciju opasnosti. U uvjetima gdje tradicionalni dronovi riskiraju oštećenje pri prisilnom slijetanju, ova platforma može sigurno pristati i prenijeti ključne podatke, od vizualnih snimki urušenih građevina do termalnih karata aktivnih požarišta.

Daljnje proširenje sposobnosti nadzora ostvaruje se integracijom dodatnih senzora. Na primjer, senzori za plinove (CO, CO₂, SO₂) i čestice prašine omogućuju rano upozorenje na otrovne ili zapaljive atmosferske uvjete, dok ugradnja LiDAR modula otvara mogućnost izrade preciznih 3D modela terena s ucrtanim točkama ugroze. Spasilačke ekipe tako dobivaju podatke o visinskim razlikama i pristupnim pravcima u realnom vremenu, što ubrzava donošenje odluka.

Za komunikaciju u područjima bez dostupne infrastrukture, sustav se može nadograditi satelitskim ili mesh-radio vezama, čime se osigurava kontinuirana razmjena podataka i komandi između UAV-a i zemaljskih timova.

U literaturi se ističe i šira vizija korištenja UAV-ova u upravljanju katastrofama. Primjerice, u radu (Erdelj, Natalizio, Chowdhury, & Akyildiz, 2017) UAV sustavi se ne promatraju

samo kao alati za izviđanje pogođenih područja, već i kao ključni elementi u uspostavi komunikacijskih mreža. UAV-ovi u takvim scenarijima mogu služiti kao privremeni repetitori koji povezuju preživjele s najbližom dostupnom mobilnom infrastrukturom, čime se spašava dragocjeno vrijeme u inicijalnim fazama kriznog odgovora. Autori pritom predlažu različite mrežne arhitekture prilagođene različitim tipovima katastrofa (geofizičkim, klimatskim i meteorološkim) te raspravljaju izazove poput održavanja povezanih zračnih mreža, sigurnosnih i energetske zahtjeva, kao i potrebe za besprijekornim handoffom između više UAV-ova u letu.

7. Zaključak

Provedenim radom razvijena je jedinstvena trokrilna rotacijska UAV platforma koja, unatoč trenutnom nedostatku dovoljnog uzgona za potpuno samostalno polijetanje, potvrđuje tehničku izvedivost koncepta i pruža čvrste temelje za daljnja poboljšanja. Sustav je uspješno integrirao mehaničke, elektroničke i softverske komponente u funkcionalnu cjelinu, pri čemu je naglasak bio na pouzdanoj komunikaciji, sigurnosnim mehanizmima i fleksibilnosti za nadogradnju. Testiranja su potvrdila učinkovitost watchdog i failsafe logike te sposobnost kontroliranog usporavanja i sigurnog zaustavljanja. Iako je optimalna konfiguracija krila još predmet buduće optimizacije, dobiveni rezultati ukazuju na jasan smjer razvoja, uključujući povećanje površine krila, jačanje pogonskog sustava i unaprjeđenje algoritama upravljanja. Ovaj projekt ne predstavlja samo tehnički izazov, nego i vrijednu platformu za istraživanje, edukaciju i razvoj inovativnih primjena bespilotnih sustava u različitim okruženjima.

8. Literatura

- [1] Agency, C. C. (11. 6 2019). *Uputa za usklađivanje UAS operatora*. Dohvaćeno iz ccaa.hr: <https://www.ccaa.hr/file/10871f22f8c921a1431917d87a02e5567504>
- [2] Desenfans, P. (2019). *The Aerodynamics of a Falling Maple Seed*. Hamburg: Aircraft Design and Systems Group (AERO), Department of Automotive and Aeronautical Engineering, Hamburg University of Applied Science.

- [3] Digi. (5 2018). *XBee S2C DigiMesh 2.4 Kit - Radio Frequency (RF) Module*. Dohvaćeno iz docs.digi.com:
<https://docs.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001526.pdf>
- [4] Erdelj, M., Natalizio, E., Chowdhury, K. R., & Akyildiz, I. F. (2017). Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management. *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, no. 1, 24-32.
- [5] Kanellakis, C., Fresk, E., Mansouri, S. S., Kominiak, D., & Nikolakopoulos, G. (2019). Autonomous visual inspection of large-scale infrastructures using aerial robots. *Robotics (cs.RO)*.
- [6] Madhushankara, M., Ribu, M., Maneesh, M. S., & B., V. (2024). Design, Verification and Implementation of a Watchdog Timer for Drone. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 59-65.
- [7] MATLAB. (2025). Dohvaćeno iz
<https://ch.mathworks.com/help/fusion/ug/magnetometer-calibration.html>
- [8] McRoberts, M. (2013). *Beginning arduino*. Apress.
- [9] Orsag, M., Bogdan, S., Haus, T., Bunic, M., & Krnjak, A. (2011). Modeling, simulation and control of a spincopter. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China: IEEE.
- [10] Orsag, M., Cesic, J., Haus, T., & Bogdan, S. (2013). Spincopter Wing Design and Flight Control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 165–179.
- [11] Paredes, M. (2011). *Python for Serial Communication*. Dohvaćeno iz academia.edu:
https://www.academia.edu/25595383/Python_for_Serial_Communication_Python_for_Serial_Communication
- [12] Quan, Q., Zhao, Z., Lin, L., Wang, P., Wonham, W., & Cai, K.-Y. (2020). Failsafe Mechanism Design of Multicopters Based on Supervisory Control Theory. *IET Cyber-Systems and Robotics*, 31-42.
- [13] Rehm, N. (2022). *The "Cyclone-Rotor" UFO Drone*. Dohvaćeno iz Hackaday:
<https://hackaday.io/project/186410-the-cyclone-rotor-ufo-drone>

- [14] Roos, T. (2013). *Design and Implementation of a Failsafe Solution for Quadrocopters*. Digitala Vetenskapliga Arkivet.
- [15] Shakhatreh, H., Sawalmeh, A., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., . . . Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access* 7, 48572–48634.
- [16] Shirriff, K. (27. 5 2024). *Secrets of Arduino PWM*. Dohvaćeno iz Arduino docs: <https://docs.arduino.cc/tutorials/generic/secrets-of-arduino-pwm/>

9. Prilozi

9.1. GitHub repozitorij

Cjelokupni izvorni kod, Arduino firmware, Python skripte i ostalo dostupni su na sljedećoj poveznici:

<https://github.com/marko-simic1/DIZAJN-I-RAZVOJ-TROKRILNE-ROTACIJSKE-BESPILOTNE-LETJELICE>

9.2. Video demonstracija

Video testiranja i prezentacije rada UAV platforme dostupan je putem Google Drive poveznice:

<https://drive.google.com/drive/folders/1OUrVkrDvhaLlQmOK2xPAaNxIQ4sWN0H?usp=sharing>

10. Sažetak

Toni Vuković, Teo Putarek, Marko Šimić

DIZAJN I RAZVOJ TROKRILNE ROTACIJSKE BESPILOTNE LETJELICE

U radu je opisan proces dizajna, razvoja i testiranja trokrilne bespilotne letjelice s rotacijskim sposobnostima. Platforma kombinira Arduino kontroler, XBee komunikaciju i Python algoritme upravljanja, uz fokus na sigurnosnim mehanizmima i modularnosti sustava. Iako testiranja pokazuju nedostatak potrebnog uzgona za samostalno polijetanje, koncept je potvrđen i pruža mogućnost daljnjih optimizacija mehaničkih i pogonskih komponenti. Rezultati istraživanja i ispitivanja mogu se primijeniti u edukativne, istraživačke i industrijske svrhe, uz potencijal za proširenje funkcionalnosti integracijom kamera, LiDAR-a i drugih senzora.

Ključne riječi: Беспilотна летјеліца, Rotacija, Trokrilna platforma, Arduino, Sigurnosni mehanizmi

11. Summary

Toni Vuković, Teo Putarek, Marko Šimić

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A TRI-WING ROTATIVE UNMANNED AERIAL VEHICLE

This paper describes the design, development, and testing of a three-wing unmanned aerial vehicle with rotation capabilities. The platform integrates an Arduino controller, XBee communication modules, and Python-based control algorithms, with a strong focus on safety mechanisms and system modularity. While testing revealed insufficient lift for autonomous takeoff, the concept has been validated and offers significant potential for further optimization of mechanical and propulsion components. The results of the research and experiments can be applied in educational, research, and industrial contexts, with the possibility of expanding functionalities through the integration of cameras, LiDAR, and other sensors.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Rotation, Tri-wing platform, Arduino, Safety mechanisms