

Primjena tehnologije dronova u održavanju zrakoplova

Pešić, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:018636>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marija Pešić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak

Student:

Marija Pešić

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Dragutinu Lisjaku na podršci, razumijevanju, stručnim savjetima i smjernicama.

Također zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima, a posebno zahvaljujem svojim roditeljima na potpori tijekom cijelog studija.

Marija Pešić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARIJA PEŠIĆ**

Mat. br.: 0035206105

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena tehnologije dronova u održavanju zrakoplova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of drone technology in aircraft maintenance**

Opis zadatka:

Jedan je temeljenih postupaka u procesu održavanja putničkih zrakoplova je vizualna kontrola oštećenja vanjskog trupa zrakoplova od oštećenja koja nastaju pod različitim okolnostima – od udara ptica, udara groma, učestala pojava korozije na pojedinim lokacijama trupa zrakoplova, popuštanja spojeva itd. Trenutno se ovaj postupak radi na način da certificirani djelatnici održavanja vizualno pregledavaju trup zrakoplova postavljanjem čelične konstrukcije oko samog trupa, a cijeli je postupak dugotrajan i logistički zahtjevan. Noviji način rješavanja ovog problema je primjena tehnologije dronova.

U skladu s prethodno navedenim, u radu je potrebno:

1. Opisati problematiku održavanja zrakoplova.
2. Dati detaljan pregled tehnologije dronova.
3. Predložiti i razviti prototip modela za rješavanja problema pregleda trupa zrakoplova primjenom tehnologije dronova.
4. Na temelju analize sprovedenog istraživanja izvesti zaključak te predložiti smjernice za daljnje istraživanje.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predvideni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:
Dragutin Lisjak
prof. dr. sc. Dragutin Lisjak

Komentor:
Davor Kolar
dr. sc. Davor Kolar

Predsjednica Povjerenstva:
Biserka Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ODRŽAVANJE ZRAKOPLOVA.....	2
2.1. Problematika održavanja zrakoplova	3
2.2. Preventivno i korektivno održavanje zrakoplova.....	6
2.3. Održavanje, popravak i remont.....	7
3. PRIMJENA DRONOVA U ODRŽAVANJU ZRAKOPLOVA.....	10
4. ZNAČAJKE DRONOVA.....	13
4.1. Inercijska mjerna jedinica	18
4.2. Satelitski navigacijski sustavi	23
4.3. Navigacija pomoću senzora	26
4.4. Navigacija pomoću kamere.....	30
4.4.1. Simultana lokalizacija i mapiranje.....	32
5. EKSPERIMENTALNI PRIMJER.....	42
5.1. Opis eksperimentalnog postava.....	42
5.2. Navigacija drona i fotografiranje oštećenja	44
5.3. Računalno prepoznavanje oštećenja	47
5.4. Analiza rezultata.....	51
5.5. Smjernice za daljnje istraživanje.....	51
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57
PRILOZI.....	61

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tehničar u održavanju zrakoplova [3].....	6
Slika 2.	Izazovi planiranja unutar operacija MRO-a [5].....	9
Slika 3.	Vizualni pregled zrakoplova pomoću drona [7].....	11
Slika 4.	"Pametni" hangar [9]	12
Slika 5.	Primjena dronova [10].....	13
Slika 6.	Predviđanja rasta svjetskog tržišta komercijalnih dronova [12].....	15
Slika 7.	Princip letenja kvadrokoptera [15]	16
Slika 8.	Dijelovi drona [16]	17
Slika 9.	IMU blok dijagram [20]	19
Slika 10.	Shema mehaničkog akcelerometra [18]	20
Slika 11.	Mehanički žiroskop: a) komponente žiroskopa; b) precesija [21]	21
Slika 12.	Princip rada kapacitivnog MEMS akcelerometra [23].....	22
Slika 13.	Princip rada MEMS žiroskopa [24].....	23
Slika 14.	GPS komunikacija s četiri satelita [25]	24
Slika 15.	MAPS protokol [26]	25
Slika 16.	Princip rada ultrazvučnog senzora [20].....	26
Slika 17.	Princip rada LiDAR senzora [29].....	27
Slika 18.	Objekt zabilježen laserskim impulsima [30]	28
Slika 19.	UWB fiksni čvorovi [33].....	29
Slika 20.	Optički tok [36]	31
Slika 21.	Stvarni prikaz optičkog toka [37].....	31
Slika 22.	Grafički prikaz SLAM problema [40].....	33
Slika 23.	EKF-SLAM blok dijagram [41]	35
Slika 24.	Grafički prikaz primjene EKF-a na online SLAM [40]	36
Slika 25.	Mono-SLAM prikaz [43]	38
Slika 26.	Odstupanje između stvarne i izračunate putanje drona [44]	40
Slika 27.	Zatvaranje petlje [44]	40
Slika 28.	Dron <i>Tello</i> u letu.....	42
Slika 29.	Elementi eksperimenta	43
Slika 30.	Fotografije oštećenja	44

Slika 31.	Blok dijagram putanje ispitivanja preciznosti	44
Slika 32.	Kretanje drona od početne pozicije do objekata.....	45
Slika 33.	Kontinuirano fotografiranje.....	46
Slika 34.	Fotografije prije i nakon greške.....	47
Slika 35.	Usporedba fotografija preklapanjem	48
Slika 36.	Blok dijagram usporedbe fotografija pomoću fiksnih točaka	48
Slika 37.	Usporedba fotografija pomoću fiksnih točaka	49
Slika 38.	Greške detektirane usporedbom fotografija pomoću fiksnih točaka.....	50
Slika 39.	RTK snimanje dronom [48].....	52
Slika 40.	PPK snimanje dronom [48]	54
Slika 41.	Struktura prijenosa podataka [51]	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Problemi održavanja zrakoplova [1]	3
Tablica 2. Provjere održavanja zrakoplova [1][4]	7
Tablica 3. Tehničke specifikacije drona <i>Tello</i> [45]	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
<i>F</i>	N	sila
<i>m</i>	kg	masa
<i>a</i>	m/s ²	akceleracija
<i>L</i>	kgm ² /s	kutni moment
<i>I</i>	kgm ²	moment tromosti
<i>ω</i>	rad/s	kutna brzina
<i>l</i>	m	duljina
<i>C</i>	F	električni kapacitet
<i>v</i>	m/s	brzina
<i>t</i>	s	vrijeme
<i>P</i>	W	snaga
<i>f</i>	Hz	frekvencija
<i>θ</i>	°	kut
<i>T</i>	K	temperatura
<i>U</i>	V	napon

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i> - Europska agencija za sigurnost u zračnom prometu
NDT	<i>Non - Destructive Testing</i> - nerazorno ispitivanje
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i> - održavanje po stanju
MRO	<i>Maintenance, Repair, and Overhaul</i> - Održavanje, popravak i remont
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> - bespilotne letjelice
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i> - elektronički regulator brzine
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> - inercijska mjerna jedinica
RG	<i>Rate gyroscopes</i> - žiroskopi kutne brzine
RIG	<i>Rate-integrating gyros</i> - žiroskopi integrala kutne brzine
MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i> - mikroelektromehanički sustavi
GPS	<i>Global Positioning System</i> - Globalni položajni sustav
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> - ultra visoka frekvencija
MAPS	<i>Multi-spacecraft Autonomous Positioning System</i> - Sustav autonomnog pozicioniranja svemirskih letjelica
M2M	<i>Machine-to-machine</i> - izravna komunikacija među strojevima
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> - senzor svjetlosnog zamjećivanja i klasifikacije
PPS	<i>Points per Second</i> - točaka u sekundi
UWB	<i>Ultra-Wideband</i> - ultraširokopoljasno
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> - prošireni Kalmanov filter
NLOS	<i>nonline-of-sight</i> - efekt nedostatka optičke vidljivosti
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i> - simultana lokalizacija i mapiranje
6-DOF	<i>6 Degrees of Freedom</i> - šest stupnjeva slobode
SFM	<i>structure from motion</i> - struktura iz kretanja
PTAM	<i>Parallel Tracking and Mapping</i> - paralelno praćenje i mapiranje
LSD-SLAM	<i>Large-Scale Direct Monocular SLAM</i> - izravni monokularni SLAM velikih razmjera
CNN-SLAM	<i>Convolutional Neural Network SLAM</i> - SLAM konvolucijskih neuronskih

SLAM	mreža
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i> - Svjetski geodetski sustav
ROS	<i>Robot Operating System</i> - fleksibilna razvojna cjelina otvorenog koda za upravljanje radnjama, zadacima i pokretima
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i> - konvolucijska neuronska mreža
RTK	<i>Real-Time Kinematic</i> - kinematika u stvarnom vremenu
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> - globalni navigacijski satelitski sustav
GCP	<i>Ground Control Points</i> - zemaljske kontrolne točke
PPK	<i>Post processed Kinematic</i> - kinematika naknadne obrade
IoT	<i>Internet of Things</i> - internet stvari

SAŽETAK

Održavanje zrakoplova jedno je od najkompleksnijih područja održavanja zbog velikih dimenzija zrakoplova, njihove kompleksne konstrukcije i izravnog utjecaja na sigurnost putnika i posade. Osim toga, održavanje ima i značajan udio u ukupnim troškovima zrakoplovnih tvrtki. Unatoč ugrađenoj sofisticiranoj opremi za testiranje i praćenje podataka o letu, održavanje zrakoplova i danas uglavnom obavljaju inženjeri održavanja na temelju iskustva.

U radu je opisana problematika održavanja putničkih zrakoplova i značajke dronova. Detaljno su opisani navigacijski senzori i tehnologije koje se primjenjuju za snalaženje dronova počevši od osnovnih ka složenijim tehnologijama.

Dronovi mogu pristupiti teško dostupnim i opasnim mjestima, snimiti teren i prikupljene informacije poslati na računalo u stvarnom vremenu. Zbog ovih karakteristika i relativno pristupačne cijene pronalaze sve širu primjenu u različitim područjima života, od rekreativne primjene do intervencija u hitnim slučajevima.

Sve značajniju primjenu pronalaze i u području održavanja različitih postrojenja i objekata. Sukladno tome i kompleksno održavanje zrakoplova nastoji se unaprijediti tehnologijom dronova.

U eksperimentalnom primjeru ispitane su mogućnosti pozicioniranja i gibanja drona te snimanja potrebnih fotografija čijom bi se usporedbom detektirala eventualna oštećenja u cilju vizualnog pregleda trupa putničkog zrakoplova. Dijagnosticirane su slabosti i nedostaci pri izvođenju eksperimenta te su, na osnovu provedene analize, doneseni zaključci i predložene smjernice za daljnja istraživanja i postizanje boljih rješenja ove problematike.

Ključne riječi: održavanje zrakoplova, dron, navigacija, pozicioniranje, vizualni pregled

SUMMARY

Aircraft maintenance is one of the most complex maintenance areas due to the large dimensions of aircraft, their complex construction, and their direct impact on passenger and crew safety. In addition, maintenance also has a significant share in the total cost of airlines. Despite the built-in sophisticated equipment for testing and tracking flight data, aircraft maintenance is still mostly performed by experience-based maintenance engineers.

The paper describes the issue of maintenance of passenger aircraft and the characteristics of drones. Navigation sensors and technologies used to navigate drones are described in detail, starting from basic to more complex technologies.

Drones can access hard-to-reach and dangerous places, record the terrain and send the collected information to a computer in real-time. Due to these characteristics and relatively affordable prices, they are finding wider applications in various areas of life, from recreational applications to emergency interventions.

They are finding more and more significant applications in the field of maintenance of various plants and facilities. Accordingly, the complex maintenance of aircraft is being improved by drone technology.

In the experimental example, the possibilities of drone positioning, drone movement, and taking the necessary photographs were examined, the comparison of which would detect possible damage to visually inspect the fuselage of a passenger aircraft. Weaknesses and shortcomings in the performance of the experiment were diagnosed and, based on the analysis, conclusions were drawn, and guidelines were proposed for further research and achieving better solutions to this problem.

Key words: aircraft maintenance, drone, navigation, positioning, visual inspection

1. UVOD

Postupci održavanja putničkog zrakoplova izuzetno su zahtjevni, dugotrajni i skupi. Kako bi se oni učinili jednostavnijim, bržim i jeftinijim traže se drugačiji načini njihovog provođenja. Stoga je u ovom radu opisana problematika održavanja zrakoplova te primjena i tehnologija dronova kao jedan od mogućih modela unapređenja postupaka održavanja zrakoplova.

Opisani su navigacijski senzori i tehnologije koje se primjenjuju za snalaženje dronova u prostoru krenuvši od osnovnih ka složenijim tehnologijama koje još nisu u potpunosti istražene te se svakodnevno razvijaju, nadograđuju i usavršavaju.

Značajan problem u održavanju zrakoplova predstavlja vizualni pregled trupa zrakoplova budući da provođenje ovog dijela održavanja uglavnom izvode djelatnici održavanja na složenim čeličnim konstrukcijama i ljestvama pri čemu obično ne koriste naprednu tehnološku opremu.

Putnički zrakoplovi često su izloženi različitim vremenskim uvjetima, kao što su kiša, snijeg i tuča te udarima groma ili ptica, pa na površini zrakoplova dolazi do oštećenja u obliku udubljenja, pukotina, korozije, slabljenja spojeva i dr. Ta je oštećenja potrebno na vrijeme detektirati i po potrebi sanirati radi izbjegavanja težih oštećenja i povećanja sigurnosti putnika i posade.

Cilj ovog rada je eksperimentalno ispitati mogućnost vizualnog pregleda trupa zrakoplova pomoću drona s fokusom na preciznost pozicioniranja drona i mogućnost prikupljanja potrebnih fotografija za usporedbu i detektiranje eventualnih oštećenja.

U radu je opisan eksperiment, provedena je analiza rezultata, izveden je zaključak i predložene su smjernice za daljnje istraživanje.

2. ODRŽAVANJE ZRAKOPLOVA

Održavanje zrakoplova je zbog velike odgovornosti za sigurnost putnika, velikih dimenzija zrakoplova i njihove kompleksne konstrukcije izuzetno zahtjevno i skupo. Zrakoplovne tvrtke, izuzev troškova za samo gorivo zrakoplova, najviše financijskih sredstava izdvajaju za njihovo održavanje koje je, unatoč ugrađenoj sofisticiranoj opremi za testiranje i praćenje podataka o letu, uglavnom ljudska aktivnost te je najveći pritisak i odgovornost na inženjerima i radnicima koji rade na održavanju. Takvi radovi zbog specifičnih uvjeta rada kao što su: visina, skučen prostor, buka, hladnoća, sparina, vrućina i sl. osim potrebnog znanja, iskustva i koncentracije zahtijevaju i dobru fizičku snagu, spretnost i ravnotežu. Nepravilno održavanje ili „mali“ propust u detalju može dovesti do kvara zrakoplova, njegovog prizemljenja ili u najgorem slučaju do havarije i gubitka ljudskih života. Stoga održavanje predstavlja izuzetno važan čimbenik pouzdanosti i sigurnosti u zrakoplovstvu.

Specifični ciljevi održavanja zrakoplova su [1]:

- a) da je svaki zrakoplov koji je pušten u promet pravilno održavan i osposobljen za sigurno izvođenje svih operacija u zračnom prijevozu
- b) da se svi postupci održavanja i izmjene koje se izvode na zrakoplovu obavljaju u skladu s priručnikom za održavanje
- c) da održavanje zrakoplova i izvođenje svih preinaka na zrakoplovu mogu obavljati samo kompetentni stručnjaci za održavanje, odgovarajućom opremom i u odgovarajućim objektima.

Osnovni elementi programa održavanja zrakoplova obuhvaćaju nekoliko elemenata [1]:

- odgovornost za letenje
- priručnik za održavanje zrakoplova
- organizaciju održavanja zrakoplova
- izvršenje i odobrenje održavanja i preinaka
- raspored održavanja
- potrebne predmete inspekcije
- sustav vođenja evidencije održavanja
- ugovorno održavanje
- obuku kadrova

- sustav kontinuirane analize i nadzora.

Osim mehaničkog održavanja zrakoplova, ključno je i održavanje električnih i elektroničkih sustava koji su od vitalnog značaja za sigurnost zrakoplova. Navigacijski i komunikacijski sustavi uključuju radare, instrumente, računalne sustave, radio komunikaciju i zahtijevaju temeljno ispitivanje. Stoga se aktivnost održavanja zrakoplova mora gledati u cjelini te je kao takva kritična i ključna za sigurnost.

2.1. Problematika održavanja zrakoplova

Zahtjevnost problematike održavanja zrakoplova proizlazi iz [2]:

- velike mreže projekata održavanja koje uključuju veliki broj aktivnosti
- velikog broja komponenata i različite razine održavanja
- problema integracije planiranja materijala, operacija i resursa te planiranja projekta
- velikog broja konfiguracija za generičku strukturu zrakoplova
- ogromne količine podataka i informacija u brojnim sustavima
- velikog postotka neplaniranih aktivnosti održavanja.

Glavni problemi održavanja zrakoplova mogu se svrstati u nekoliko osnovnih kategorija. To su: greške pri ugradnji, greške pri servisiranju, greške popravka, greške izolacije, testiranja ili inspekcije, greške oštećenja stranim predmetom, greške oštećenja dijelova i opreme zrakoplova i ozljede radnika prilikom održavanja. Glavni problemi održavanja zrakoplova i mogući razlozi njihove pojave prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Problemi održavanja zrakoplova [1]

GLAVNI PROBLEMI	MOGUĆI RAZLOZI NASTANKA PROBLEMA
Greške pri ugradnji	<ul style="list-style-type: none"> • oprema/dio nije instalirana • instalirana pogrešna oprema/dio • pogrešna orijentacija • neispravno mjesto • nepotpuna instalacija • ugrađeni dodatni dijelovi • pristup nije zatvoren • sustav/oprema nije ponovno

	<p>aktiviran/deaktiviran</p> <ul style="list-style-type: none"> • oštećenje prilikom instalacije • unakrsna veza
Greške pri servisiranju	
	<ul style="list-style-type: none"> • nema dovoljno tekućine • previše tekućine • pogrešna vrsta tekućine • potrebno servisiranje tekućine nije obavljeno • pristup nije zatvoren • sustav/oprema nije deaktiviran/ponovno aktiviran
Greške popravka (npr. popravak komponente ili strukturni popravak)	
Greške izolacije, testiranja ili inspekcije	
	<ul style="list-style-type: none"> • kvar nije otkriven • greška nije pronađena izolacijom kvara • greška nije pronađena operativnim/funkcionalnim testom • greška nije pronađena inspekcijom • pristup nije zatvoren • sustav/oprema nije deaktiviran/ponovno aktiviran
Greške oštećenja stranim predmetom	
	<ul style="list-style-type: none"> • materijal ostavljen u zrakoplovu/motoru • krhotine na rampi • krhotine koje padaju u otvorene sustave
Greške oštećenja dijelova i opreme zrakoplova	
	<ul style="list-style-type: none"> • alati/oprema korišteni nepropisno • korišteni neispravni alati/oprema • sudarna oštećenja • mehanička oštećenja uslijed povlačenja ili guranja

Ozljede radnika prilikom održavanja

Uz problematiku održavanja zrakoplova najznačajnija su tri čimbenika:

- ljudski čimbenici
- odgovarajuća oprema
- uvjeti u kojima se održavanje provodi.

Prema pravilima Europske agencije za sigurnost u zračnom prometu (eng. *European Union Aviation Safety Agency - EASA*) dozvole za održavanje zrakoplova podijeljene su u dvije kategorije: prvu koja omogućuje certificiranje radova na konstrukcijama, motorima i električnim sustavima i drugu koja omogućuje certificiranje radova koji se obavljaju na elektroničkim sustavima. [3]

Uvjeti u kojima se održavanje provodi odnose se na prostor u kojima se provode postupci održavanja, doba dana, adekvatno osvjetljenje, temperaturu i sl.

Održavanje se izvodi u tri razine pregleda: opći vizualni, detaljni i posebno detaljni. Opći vizualni pregledi provode se kako bi se otkrila očita oštećenja kao što su jasno vidljive pukotine, korozija ili udubljenja. U sklopu detaljnih pregleda provode se intenzivni vizualni i taktilni pregledi za utvrđivanje manje očitih nedostataka pri čemu se mogu koristiti i leće ili zrcala. Posebno detaljna inspekcijska ispitivanja vrše se tehnikama nerazornog ispitivanja (eng. *Non – Destructive Testing – NDT*) koja uključuju ultrazvuk, termografiju, X-zrake i tehnike penetracije boje. Pri svim navedenim pregledima izuzetno je bitan ljudski faktor. Na Slici 1. prikazan je tehničar održavanja.



Slika 1. Tehničar u održavanju zrakoplova [3]

Iz slike je vidljivo da radnik samostalno vrši pregled kompleksnog dijela zrakoplova te je očito da je samim tim velika mogućnost pojave grešaka.

Kao najčešće ljudske greške navode se greške memorije (zaboravljanje nekih radnji), proceduralna neusklađenost (nedosljednost pridržavanja zakonskih zahtjeva i preporuka proizvođača), greške pretpostavki (pogrešna pretpostavka u analizi situacije i izostanak provjere pretpostavke) i greške temeljene na znanju (greške koje proizlaze iz nedostatka znanja o sustavu). [3]

2.2. Preventivno i korektivno održavanje zrakoplova

Održavanje zrakoplova može se podijeliti na kategorije preventivnog održavanja čije se aktivnosti održavanja obavljaju redovito, bilo svakodnevno, bilo u nekim drugim unaprijed zakazanim intervalima i korektivnog održavanja koje se provodi kada dođe do neplaniranih oštećenja zrakoplova ili kvara njegovih komponenti.

Korektivno održavanje podrazumijeva aktivnosti koje uključuju detekciju kvarova te popravak ili zamjenu neispravnih dijelova i komponenti. Može biti uzrokovano udarom groma ili ptica te otežanim slijetanjem, a zahtijeva vrlo brzo provođenje kako bi se zrakoplov što brže osposobio za letenje jer bi u suprotnom morao ostati prizemljen čime bi se cijena ovakvih kvarova, koja je ionako visoka, značajno povećala. [3]

Neplanirano održavanje je izuzetno velik problem, budući da se 50 - 60% svih radova popravaka ne mogu planirati i predvidjeti jer se problemi detektiraju tek prilikom pregleda. Stoga je i po obujmu i po važnosti najznačajnije održavanje po stanju (eng. *Condition Based Maintenance* - CBM) koje se temelji na dijagnostičkim informacijama i praćenju stanja. Veliki problem kod CBM održavanja zrakoplova predstavlja upravljanje zalihama rezervnih dijelova zbog visokih cijena zaliha i dugog vremena isporuke za mnoge komponente. [2]

2.3. Održavanje, popravak i remont

Održavanje, popravak i remont u zrakoplovstvu (eng. *Maintenance, Repair, and Overhaul* – MRO) je popravak, servis ili inspekcija zrakoplova ili njegovih komponentata, odnosno sve aktivnosti održavanja koje se provode kako bi se osigurala sigurnost i plovidbenost svih zrakoplova prema međunarodnim standardima. MRO se dijeli u četiri glavna područja održavanja: bazno održavanje, linijsko održavanje, održavanje motora i održavanje komponenti od kojih svako područje obuhvaća niz planiranja, kontrola i izvođenja.

Glavninu održavanja čine bazno i linijsko održavanje.

Bazno održavanje se temelji na projektu i uključuje tehnike za planiranje, kontrolu i izvođenje svih komponentata (materijala, resursa, operacija) te za razliku od linijskog održavanja obuhvaća opsežnije, kompleksnije i dugotrajnije radove. [2]

Planirano bazno održavanje podrazumijeva podmazivanje te rutinske i detaljne provjere koje se kategoriziraju kao jednostavnije, A i B provjere i zahtjevnije, C i D provjere kako je prikazano u Tablici 2.

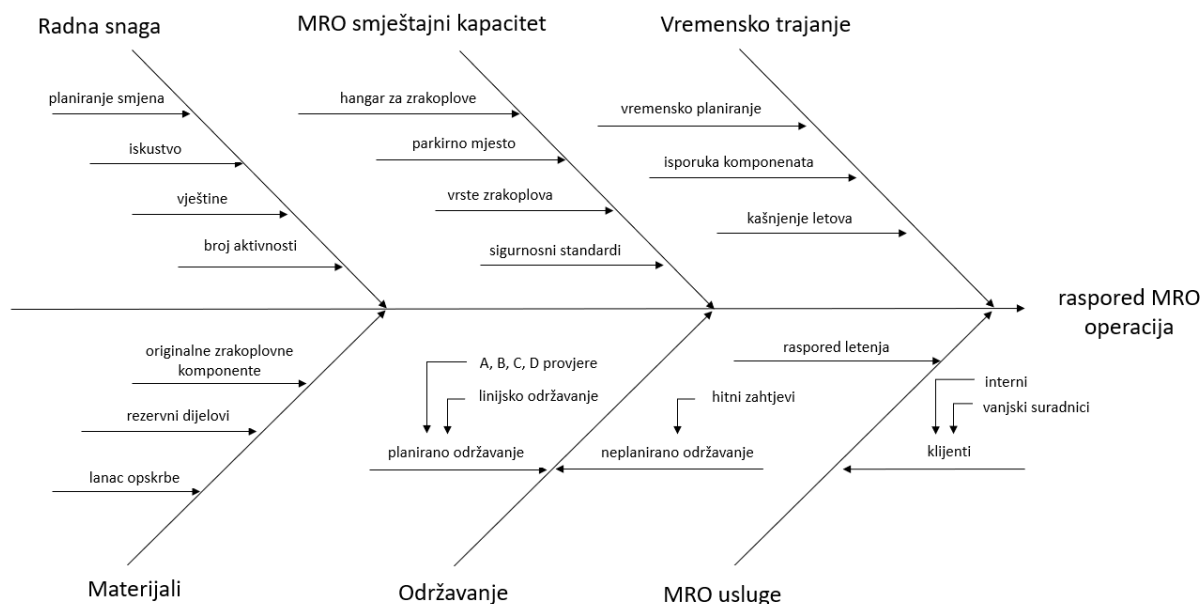
Tablica 2. Provjere održavanja zrakoplova [1][4]

PROVJERA	OPIS
A	<ul style="list-style-type: none"> • izvodi se otprilike svakih 400 - 600 sati leta ili 200 - 300 ciklusa (ciklusom se smatra polijetanje i slijetanje zrakoplova) • obično se izvodi na ulazu u zračnu luku • traje 20 - 60 radnih sati
B	<ul style="list-style-type: none"> • izvodi se svakih 6 - 8 mjeseci • izvodi se u hangaru u zračnoj luci • traje oko 120 - 150 radnih sati (1 - 3 dana) • mogu se uključiti u uzastopne A provjere

C	<ul style="list-style-type: none"> • izvodi se svakih 6 - 8 mjeseci, nakon određenog broja stvarnih sati leta ili kako je definirao proizvođač • puno je opsežnija od B provjere • zahtijeva više prostora od A i B provjere • obuhvaća pregled većine zrakoplovnih komponenti • traje 1 - 2 tjedna (do 6000 radnih sati) • izvodi se u hangaru u bazi održavanja • dok ova provjera ne završi zrakoplov mora biti izvan upotrebe i ne smije napustiti mjesto održavanja
IL	<ul style="list-style-type: none"> • provjera održavanja radi korozije ili propadanja određenih dijelova okvira zrakoplova • može se rasporediti u nekoliko C provjera ili uključiti u D provjeru
D	<ul style="list-style-type: none"> • najzahtjevnija, najopsežnija i najskuplja provjera • obavlja se otprilike svakih 6 godina • rastavljanje cijelog zrakoplova • može potrajati i do 2 mjeseca (do 50 000 radnih sati) • zahtijeva najviše prostora od svih ostalih provjera • planira se godinama unaprijed • tijekom radnog vijeka zrakoplov otprilike 3 puta prođe D provjeru • tijekom ove provjere izvode se i ostali radovi koji zahtijevaju zrakoplov izvan upotrebe kao što su izmjene u kabini te postavljanje novih sjedala, tepiha i sl.
<p>sve provjere ovise o vrsti zrakoplova, broju ciklusa letenja i broju radnika uključenih u provjere održavanja</p>	

Navedene provjere obavljaju se na svim civilnim avionima, dok za vojne avione postoje posebni programi održavanja.

Glavni izazovi s kojima se suočavaju MRO tvrtke uključuju optimalno balansiranje između proizvođača originalne opreme, planiranja održavanja zrakoplova, educirane radne snage potrebne za provođenje postupaka održavanja i vremena trajanja tih postupaka. [5] Navedeni elementi prikazani su na dijagramu riblje kosti na Slici 2.



Slika 2. Izazovi planiranja unutar operacija MRO-a [5]

Nedostupnost originalnih dijelova ili potrebnih alata može izravno utjecati na sigurnosne standarde, kao i nedostatak stručnjaka za održavanje koji bi potrebne postupke trebali provoditi i nadzirati. Osim toga, neophodno je i osigurati potreban prostor u kojem bi se postupci održavanja, popravaka i remonta mogli provoditi u određenom vremenskom trajanju ili po potrebi. Iz dijagrama je vidljivo kako je provođenje MRO postupaka izuzetno kompleksno jer ovisi o jako puno čimbenika koji se moraju uskladiti kako bi se zadovoljili svi sigurnosni standardi, a da zrakoplovi pri tome nisu puno vremena izvan letenja te da ukupni troškovi održavanja budu što manji. [5]

3. PRIMJENA DRONOVA U ODRŽAVANJU ZRAKOPLOVA

U održavanju zrakoplova dronovi mogu skratiti vrijeme potrebno za preglede i eventualne popravke na zrakoplovu te značajno smanjiti propuste uzrokovane ljudskim faktorom koji mogu dovesti i do katastrofalnih posljedica. Premda dronovi ne mogu izvoditi same popravke na zrakoplovu, njihova upotreba može značajno unaprijediti procese održavanja, a ujedno i smanjiti troškove.

Upotrebom dronova u održavanju zrakoplova može se [6]:

- procijeniti cjelokupno stanje konstrukcije, pojedinačnih komponenata ili podsustava
- vršiti vizualni pregled oštećenja od udara groma, tuče i naleta ptica
- izvoditi preventivno održavanje
- osigurati rano otkrivanje kvarova (npr. korozije, pukotina, nedostatka zakovica, vidljivih grešaka motora, udubljenja, raslojavanja i dr.)
- automatski otkrivati nedostatke pomoću strojnog učenja, umjetne inteligencije i kataloga poznatih grešaka
- eliminirati potrebu za dizalicama i sličnom pomoćnom opremom
- detaljnije istražiti već poznate greške
- poboljšati kvalitetu izvještaja o utvrđenom stanju u stvarnom vremenu te ih usporediti s prethodnim izvještajima
- smanjiti vrijeme koje zrakoplov mora provesti u hangaru (vrijeme zastoja)
- povećati sigurnost
- smanjiti troškove konvencionalnih postupaka vizualnog pregleda
- ubrzati i olakšati vizualne provjere u teško dostupnim područjima
- projektirati specifične ponovljive i pouzdane inspekcijske staze oko zrakoplova
- snimiti slike na sigurnoj udaljenosti od konstrukcije i s različitih gledišta
- točno procijeniti kvarove uspoređivanjem dobivenih slika s 3D strukturnim modelima zrakoplova
- prikupljati različite informacije pomoću senzora ugrađenih na bespilotnu letjelicu
- izraditi automatska izvješća o inspekciji i obavljanju točnih pregleda nakon svakog leta.

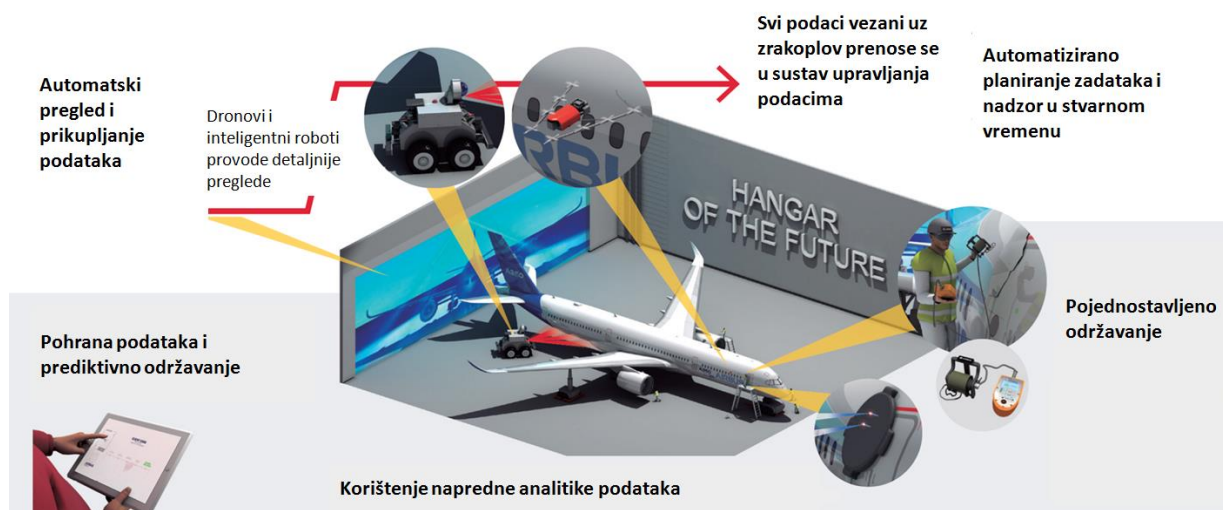
Na Slici 3. prikazan je dron koji vrši vizualni pregled trupa zrakoplova.



Slika 3. Vizualni pregled zrakoplova pomoću drona [7]

Iako su zrakoplovi konstruirani tako da izdrže teške atmosferske uvjete, nakon svake teže oluje i udara groma, koji se prosječno dogodi barem jednom godišnje, nužno je izvršiti temeljiti pregled i otkloniti nastala oštećenja. Sam pregled je dugotrajan i skup proces jer se i za vrlo sitna oštećenja mora angažirati nekoliko inženjera i pomoćna oprema te je za sam primarni pregled potrebno prosječno izdvojiti nekoliko sati rada što zrakoplovne kompanije može stajati milijarde dolara godišnje. Primjenom dronova postiže se značajna ušteda vremena, čak do 75 %. [8]

Stoga su dronovi postali dio koncepta "pametnog hangara". Jedan takav koncept kompanije *Airbus* prikazan je na Slici 4.



Slika 4. "Pametni" hangar [9]

Nakon što zrakoplov uđe u hangar izvodi se njegovo cjelovito pregledavanje radi potencijalnih oštećenja te se svi prikupljeni podaci u sustavu za upravljanje podacima automatski analiziraju. Određuju se radni zadaci koje je potrebno izvršiti i oni se u stvarnom vremenu dodjeljuju radnicima preko njihovih mobilnih uređaja. Radnicima se omogućuje pristup potrebnoj tehničkoj dokumentaciji i svim informacijama potrebnim za obavljanje zadataka. Sve je digitalizirano pa nema potrebe za opsežnom papirnatom dokumentacijom. Naprednom analitikom podaci se generiraju i koriste za predviđanje kvarova čime se povećava učinkovitost održavanja i troškovi se svode na minimum. Podaci o održavanju digitalno se pohranjuju na potrebnu lokaciju. [9]

4. ZNAČAJKE DRONOVA

Bespilotne letjelice ili dronovi (eng. *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) počeli su se razvijati u prvoj polovici dvadesetoga stoljeća u vojnoj industriji i tada su prvenstveno služili za obuku pilota. Danas se međutim, zahvaljujući brzom razvoju moderne tehnologije zbog koje je postao cjenovno prihvatljiv, sve više koristi i u civilne svrhe.

Dronovi mogu biti vrlo malih (mikro) dimenzija, ali i veliki gotovo kao borbeni zrakoplovi. Namjene su im, također, vrlo različite. Mogu se koristiti kao dječja igračka, ali i kao specijalisti za izviđanje i nadziranje državnih granica, prijenos oružja i drugih vojnih sredstava te pravo borbena djelovanje. Osim u policijskim i vojnim zadacima dronovi služe za snimanje terena i situacije te transport različitih stvari na nepristupačnim područjima na kojima bi klasičan pristup bio otežan, nedovoljno brz, a ponekad i opasan.

Dronovi mogu biti izrađeni kao bespilotne letjelice s visokom sposobnošću manevriranja te prikupljati podatke i snimke iz ptičje perspektive kroz prostorno ograničena područja (šuma, kanjona i sl.), ali i unutar zatvorenih prostora i pri tome ne smetati značajno ni okruženju ni ljudima unutar njega.

Spektar primjene dronova je vrlo širok, a neke primjene su prikazane na Slici 5.



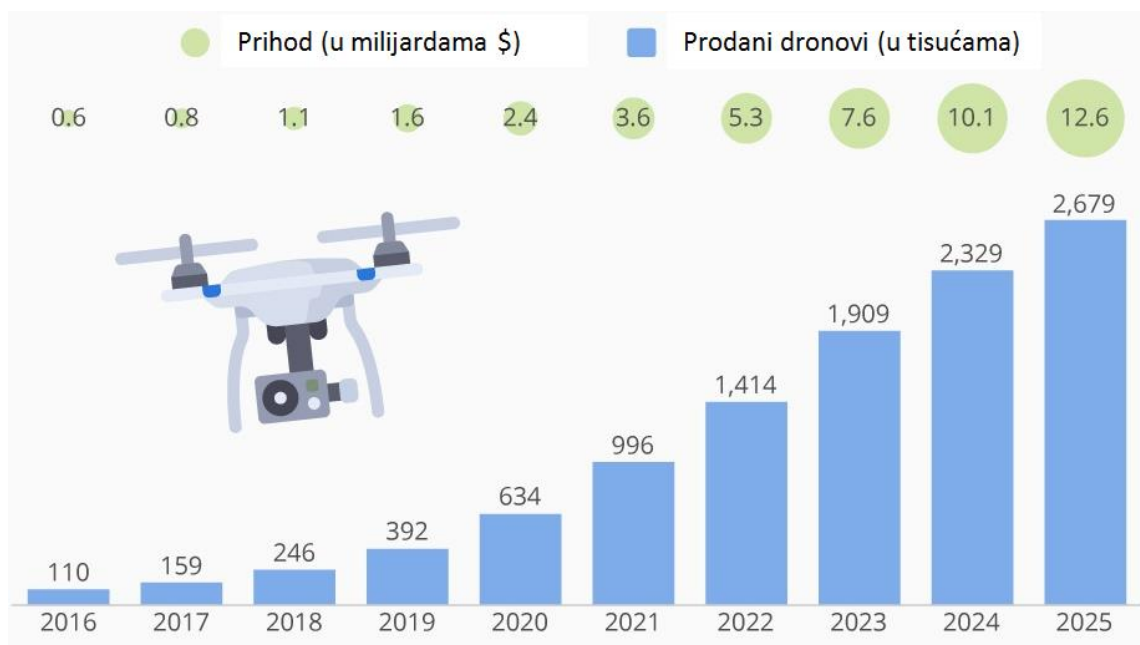
Slika 5. Primjena dronova [10]

Kao što je vidljivo iz slike, dronovi imaju vrlo široku primjenu u različitim područjima, a neke od primjena su [11]:

- vizualna inspekcija opasnih i teško dostupnih područja
- održavanje skladišta i postrojenja
- preventivno održavanje
- automatsko otkrivanje nedostataka pomoću:
 - strojnog učenja
 - umjetne inteligencije
 - kataloga poznatih grešaka
- građevinarstvo
 - topografska mjerenja
 - 3D modeliranje
 - praćenje stanja na gradilištu
 - provjera dizalica i skela
 - snimanje termalnih slika
- agrikultura i meteorologija
- transport i dostava paketa
- nadzor
- hitne službe
- izvještavanje iz zraka, zabava, film, fotografija.

U Industriji 4.0 dronovi imaju sve značajniju ulogu u postupcima održavanja postrojenja, skladišta i različitih drugih objekata bilo da prikupljaju podatke i prosljeđuju ih inženjerima ili da pomoću naprednih senzorskih tehnologija i analitičkih podataka sami procjenjuju potrebe održavanja.

Dronovi teško dostupnim mjestima mogu pristupiti jednostavnije, brže i s manje rizika nego čovjek te u takvim zahtjevnim okruženjima mogu zadatke nadzora i održavanja izvršiti znatno jeftinije, preciznije i sigurnije, a uz to ne ugroziti ljudsko zdravlje ili život. Stoga se očekuje da će u obavljanju dosadnih, prljavih, udaljenih i opasnih poslova dronovi imati sve značajniju ulogu kao što se i vidi iz predviđanja prikazanih na Slici 6.

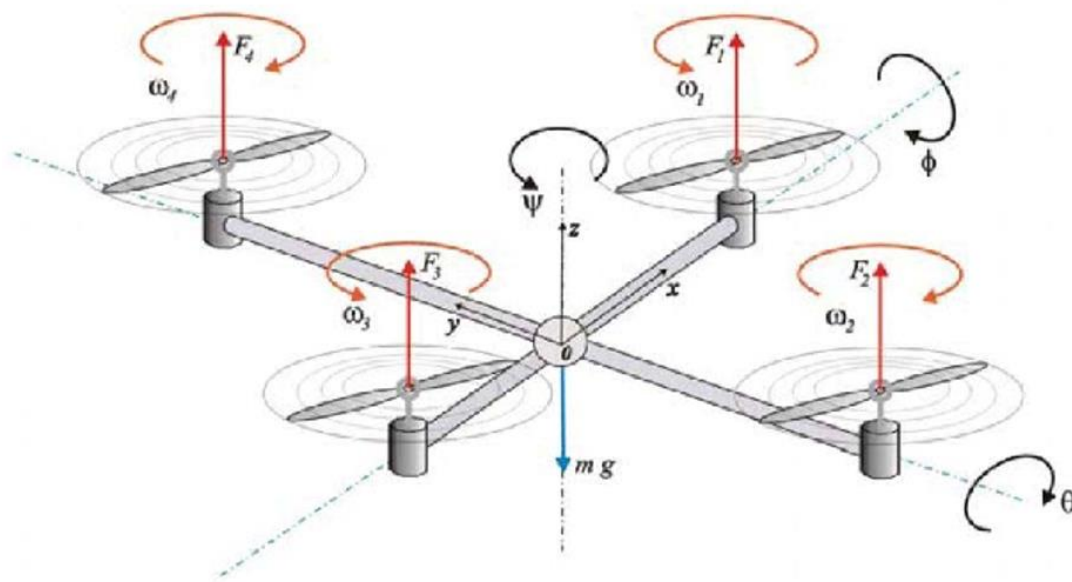


Slika 6. Predviđanja rasta svjetskog tržišta komercijalnih dronova [12]

Očekuje se da će do 2025. godine broj prodanih dronova porasti gotovo trostruko, a prihodi još i više.

Dronovi se razlikuju po dimenzijama i konstrukcijskim izvedbama te mogu biti jednostavni, ali i vrlo kompleksni, ovisno o njihovoj vrsti i namjeni. Mogu se klasificirati prema različitim specifikacijama kao što su: nosivost, domet, izdržljivost, mogućnost postizanja određene visine leta, brzina letenja, broj propelera, broj motora i dr., a u skladu s tim i prema cjenovnome rangu. S obzirom na broj propelera dronovi mogu biti izvedeni kao kvadrokopteri, oktokopteri te drugi multikopteri. Mogu koristiti različite izvore napajanja kao što su gorivo (kerozin), baterije i solarne ćelije, ali se danas za multikoptere manjih dimenzija i za kraće udaljenosti najčešće koriste baterije. [13]

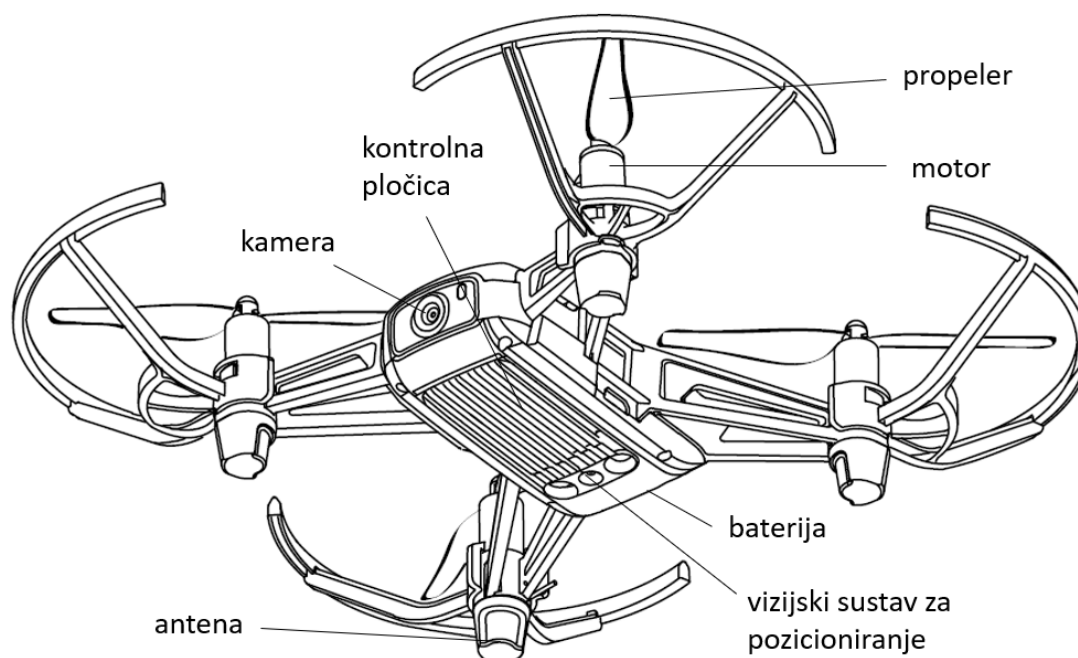
Kvadrokopteri, koji su danas najrasprostranjeniji, sastoje se od četiri propelera i pripadajućih motora od kojih svaki proizvodi određeni protok zraka i silu ubrzanja na tijelo kvadrokoptera. Uključivanjem sva četiri motora dron polijeće. Kako bi dron ostao na mjestu, potisak sva četiri motora zajedno mora kompenzirati zemaljsku gravitaciju. Uz to suma momenata sva četiri motora mora biti jednaka nuli kako bi se izbjegao moment koji bi uzrokovao rotaciju kvadrokoptera oko vlastite osi. Zbog toga se kod dronova dva nasuprotna motora uvijek kreću u istom smjeru, a druga dva se rotiraju u suprotnom smjeru kao što je prikazano na Slici 7. [14]



Slika 7. Princip letenja kvadrokoptera [15]

Na prikazani način se postiže da je suma zakretnih momenata sva četiri rotora jednaka nuli. Povećanjem brzine sva četiri motora dolazi do povećanja ukupnog potiska i uspona drona, a smanjenjem do spuštanja. Ovaj princip koristi se i za induciranje određene rotacije. Za skretanje kvadrokoptera ulijevo, povećava se brzina motora u smjeru kazaljke na satu, odnosno desno rotirajućih motora što dovodi do indukcije zakretnog momenta koji će okrenuti kvadrokopter ulijevo. Nasuprot tome, za skretanje udesno, povećava se brzina lijevo rotirajućih motora i smanjuje brzina desno rotirajućih motora. Kako bi se dron pomaknuo prema naprijed, smanjuje se brzina prednjeg motora i povećava brzina stražnjeg motora, a za kretanje unatrag postupak je obrnut. Na isti način dron se pomiče ulijevo i udesno. Gibanje drona po željenoj putanji se odvija kombinacijom navedenih pokreta. [14]

Osnovni dijelovi svakog drona, osim motora i propelera, su i izvor napajanja te sustav kontrole i navigacije. Na Slici 8. prikazani su dijelovi drona *Tello*.



Slika 8. Dijelovi drona [16]

Propeleri na dronu uglavnom se izrađuju od polimernih materijala (manji i jeftiniji dronovi) ili od ugljičnih vlakana (veći i skuplji dronovi). O kvaliteti i ispravnosti propelera i motora ovisi i učinkovitost leta samog drona.

Da bi se dron pomoću motora i propelera mogao gibati mora imati kontroler leta kojim se svi ulazni podaci sa senzora obrađuju u informacije za upravljanje dronom i antenu pomoću kojih se ostvaruje izmjena informacija s upravljačem na zemlji. Praćenje i mijenjanje brzine drona tijekom leta postiže se elektroničkim regulatorom brzine (eng. *Electronic Speed Controller* – ESC). Dronovi sadrže razne senzore za izbjegavanje prepreka i prikupljanje podataka, a gotovo svi imaju i kameru kojom se postiže vizijsko praćenje. [17]

Sustav kontrole i navigacije, koji obuhvaća različita hardverska i softverska tehnološka rješenja kojima se omogućava upravljanje dronom i prikupljanje potrebnih podataka, najznačajniji je dio svakog drona.

Sustavi nadzora i kontrole pomoću dronova u svrhu poboljšavanja funkcije održavanja u industriji, zrakoplovstvu ili nekim drugim djelatnostima prvenstveno se svode na što brže prikupljanje što točnijih podataka i slika različitim sensorima i kamerama. Dronovi bi stoga trebali biti sposobni koristiti senzorske i vizijske podatke za praćenje objekata, samostalnu navigaciju i izbjegavanje sudara te prikupljati nove podatke ili snimke, kreirati nove karte i

sve učestalo ažurirati. Da bi dronovi mogli izvoditi ovakve zadatke, ovisno o mjestu (otvoreni ili zatvoreni prostor) i cilju njihove konkretne primjene, odabiru se najadekvatnije hardverske komponente, softverska rješenja i mrežna infrastruktura.

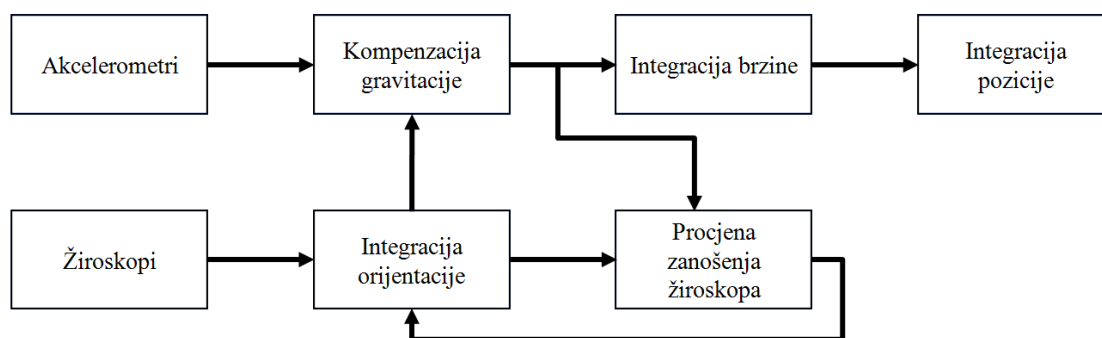
Kao hardverske komponente ugrađuju se kamere koje mogu i pri velikim brzinama i nadmorskim visinama dati snimke visoke rezolucije, akcelerometri, žiroskopi, satelitske tehnologije, inercijske mjerne jedinice, razni senzori i dr.

Softverska rješenja mogu obuhvaćati ugrađene sustave, mrežne aplikacije, nadzorne ploče i druge komponente koje dronovima omogućuju prikupljanje senzorskih i vizijskih podataka te njihov prijenos i obradu.

Osnovni senzori i tehnologije za navigaciju koji se, između ostaloga, primjenjuju i kod dronova opisani su u sljedećim potpoglavljima.

4.1. Inercijska mjerna jedinica

Inercijska mjerna jedinica (eng. *Inertial Measurement Unit* - IMU) je uređaj koji se često ugrađuje u inercijalne navigacijske sustave za vođenje i kontrolu zrakoplova, brodova, podmornica, projektila, satelita, bespilotnih letjelica (dronova), robota i dr. Sastoji se od akcelerometara za mjerenje linearnog ubrzanja i žiroskopa za mjerenje kutne brzine. Pomoću njih procjenjuje položaj, brzinu i ubrzanje. Inercijska mjerna jedinica najčešće sadrži po tri mikroelektromehanička akcelerometra i žiroskopa kako bi se postiglo šest stupnjeva slobode gibanja te niz dodatnih senzora kojima se postiže veća preciznost i točnost mjerenja. [18] Inercijske mjerne jedinice se s obzirom na način postavljanja izvode kao platformski sustavi gdje su instrumenti postavljeni na platformu i izolirani od štetnih utjecaja okoline te kao učvršćeni sustavi (eng. *Strapdown*) koji su učvršćeni na promatrani uređaj. [19] Na Slici 9. prikazan je IMU blok dijagram učvršćenog sustava koji pokazuje postupak dobivanja orijentacije, brzine i pozicije iz početnih podataka.



Slika 9. IMU blok dijagram [20]

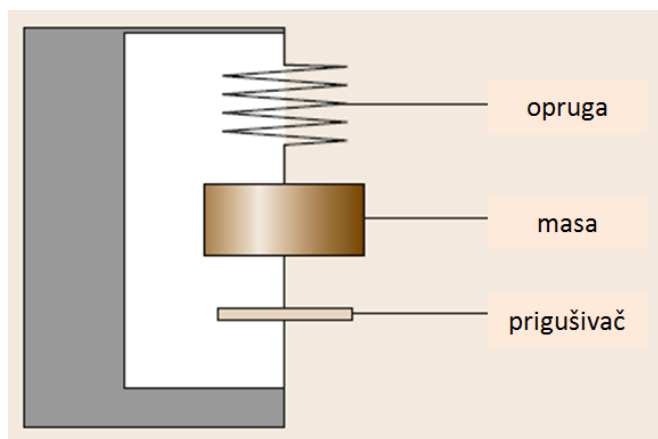
Podaci se dobivaju iz akcelerometara i žiroskopa. Žiroskopima se dobivaju kutne brzine u sva tri smjera te se dobiveni podaci integriraju da bi se dobila orijentacija. Nakon što se odredi orijentacija, poznat je smjer gravitacijske sile. Potom se vrši kompensacija gravitacije iz očitavanja ubrzanja kako bi se dobilo ubrzanje koje se trenutno primjenjuje na inercijskoj mjernoj jedinici. Integracijom ubrzanja dobiva se brzina uređaja, a ponovnom integracijom pozicija. Budući da se postupak integriranja ponavlja, prvotna pogreška orijentacije se povećava te se pogreške akumuliraju i očitavanja nisu točna. Zbog toga procijenjeno ubrzanje nakon gravitacijske kompensacije obično prolazi kroz postupak filtriranja jer orijentacija najčešće nije potpuno ispravna. Orijetacija se ispravlja procjenom vrijednosti zanošenja žiroskopa te se podaci vraćaju u integraciju orijentacije kako bi se kompenziralo zanošenje. Zbog temeljnog problema zanošenja, uz IMU se u uglavnom koristi dodatni mjerni sustav (npr. GPS). [18]

Akcelerometri su mjerni uređaji koji služe za mjerenje ubrzanja, odnosno akceleracije. Primjenjuju se u navigaciji, aeronautici, seizmologiji te u različitim vrstama industrije. Nalaze se u brojnim napravama kao što su pametni telefoni, tableti, automobili i dr. Akcelerometri su, uz žiroskope, jedan od najznačajnijih elemenata u sustavu inercijalne navigacije koji mjerenjem inercijalne akceleracije određuju poziciju i orijentaciju objekta koji se kreće u odnosu na Zemlju. [19]

Princip rada akcelerometra zasniva se na drugom Newtonovom zakonu koji kaže da je akceleracija nekog tijela proporcionalna vanjskoj sili koja djeluje na to tijelo i obrnuto proporcionalna njegovoj masi:

$$F = m \times a$$

Najjednostavniji akcelerometri sastoje se od tijela referentne mase koje je oprugama pričvršćeno za podlogu i prigušivača. Pri djelovanju vanjske sile na masu, opruga se pomiče. [18] Shema mehaničkog akcelerometra prikazana je na Slici 10.



Slika 10. Shema mehaničkog akcelerometra [18]

Vanjske sile se uravnotežuju s unutarnjim te se računaju prema izrazu:

$$F_{promijenjeno} = F_{inercije} + F_{prigušivanja} + F_{opruga} \quad [18]$$

Akcelerometri se općenito dijele na mehaničke i mikroelektromehaničke akcelerometre. Akcelerometri koji se temelje na izravnom mehaničkom mjerenju vanjskih sila nazivaju se mehaničkim akcelerometrima, a danas se daleko više primjenjuju mikroelektromehanički akcelerometri koji se sastoje od mikromehaničkih i mikroelektronskih komponenti.

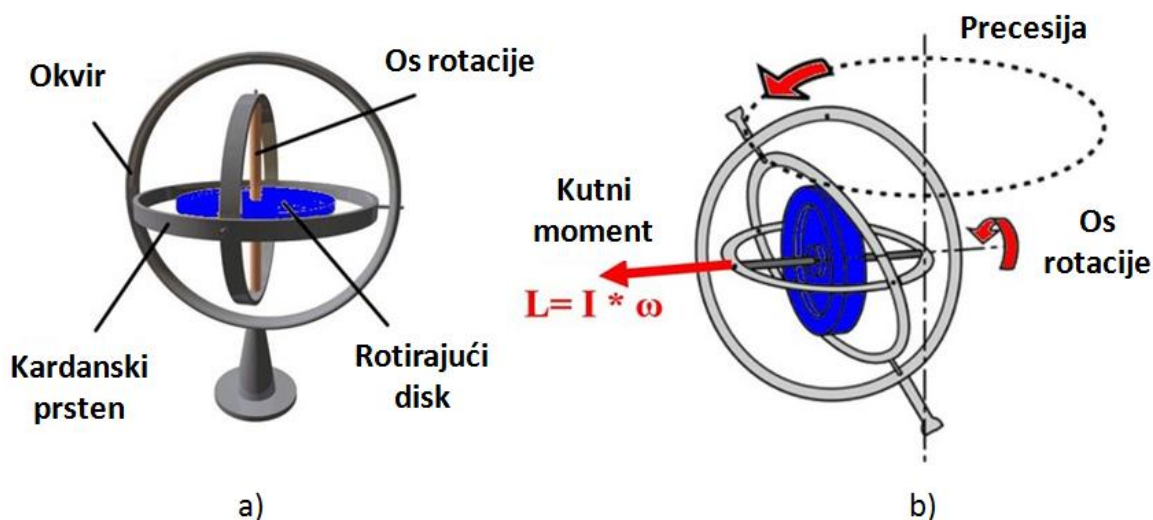
Žiroskopi su mjerni uređaji koji mjere orijentaciju ili kutnu brzinu. Žiroskopi kutne brzine (eng. *Rate gyroscopes - RG*) mjere kutnu brzinu rotacije, a žiroskopi integrala kutne brzine (eng. *Rate-integrating gyros - RIG*) integracijom kutne brzine procjenjuju apsolutni kutni pomak. Uz akcelerometre, žiroskopi su jedna od osnovnih komponenti svih IMU uređaja. Rad žiroskopa se bazira na zakonu očuvanja kutne količine gibanja po kojemu se rotacijsko tijelo, ako na njega ne djeluje neki vanjski moment, nastavlja rotirati istom kutnom brzinom oko iste osi rotacije. Kutni moment (L) izražava se kao umnožak momenta tromosti (I) i kutne brzine (ω).

$$L = I \times \omega \quad [18]$$

Žiroskopska inercija svojstvo je zadržavanja orijentacije rotirajućeg diska i ona je temeljno svojstvo svih žiroskopa rotirajuće mase. Smjer vektora kutnog momenta podudara se s osi

rotacije te je njegov smjer fiksiran u prostoru. Djelovanjem vanjskog momenta dolazi do precesije, tj. skretanja osi rotacije u ravnini okomitoj na smjer djelovanja sile.

S obzirom na fizikalne principe koje primjenjuju u detekciji kutnog gibanja oko neke osi razlikuju se mehanički, elektronički i optički žiroskopi. Mehanički žiroskopi sastoje se od okvira, rotirajućeg diska i jednog ili više kardanskih prstenova (eng. *gimbal*) od kojih svaki daje disku dodatni stupanj slobode. [18] Slika 11.a prikazuje mehanički žiroskop s dva kardanska prstena, a 11.b precesiju žiroskopa.



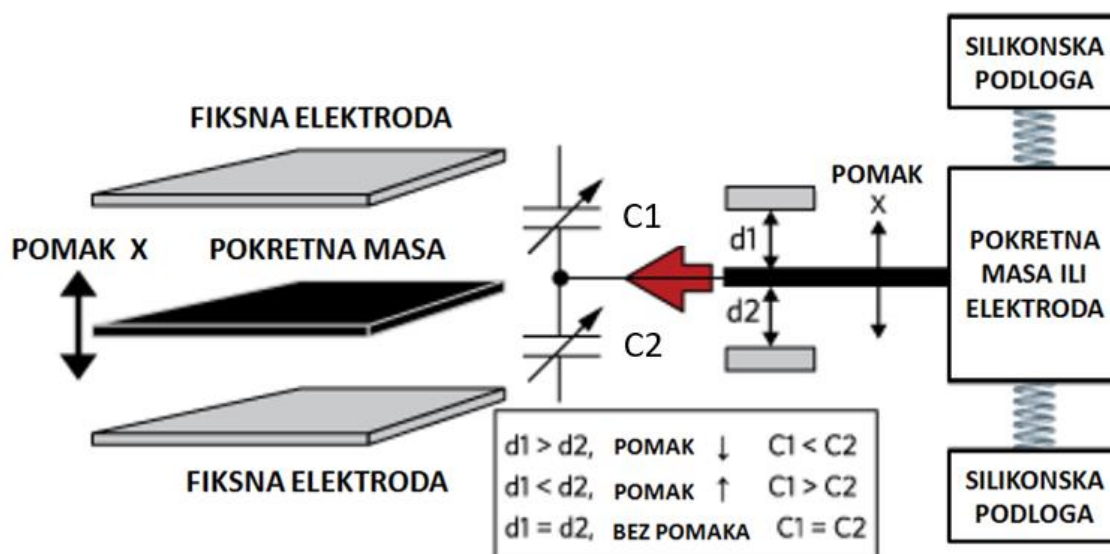
Slika 11. Mehanički žiroskop: a) komponente žiroskopa; b) precesija [21]

U novije vrijeme se sve češće koriste tehnološki napredniji optički i mikroelektromehanički žiroskopi.

Mikroelektromehanički sustavi (eng. *Microelectromechanical systems* - MEMS) su uređaji veličine od 20 μm do 1 mm, a sastavljeni su od komponenti veličine od 1 do 100 μm . [22] Najčešće se sastoje od nekoliko mehaničkih komponenti koje prikupljaju podatke iz okoline (mikrosenzora) i središnje jedinice koja te podatke obrađuje (mikroprocesora). Izvedbe ovih uređaja mogu biti različite ovisno o njihovoj namjeni. Za inercijsku mjernu jedinicu značajni su MEMS akcelerometri i MEMS žiroskopi.

MEMS akcelerometri su često bazirani na kapacitivnom principu kod kojeg je akceleracija vezana uz promjenu kapaciteta pokretne mase. Osim malih dimenzija, ove akcelerometre karakterizira i jednostavna konstrukcija, mala osjetljivost na šumove i promjenu temperature te visoka točnost i stabilnost zbog čega imaju vrlo široku primjenu u modernoj industriji. [23]

Schema principa rada kapacitivnog MEMS akcelerometra s jednom pokretnom masom prikazana je na Slici 12.



Slika 12. Princip rada kapacitivnog MEMS akcelerometra [23]

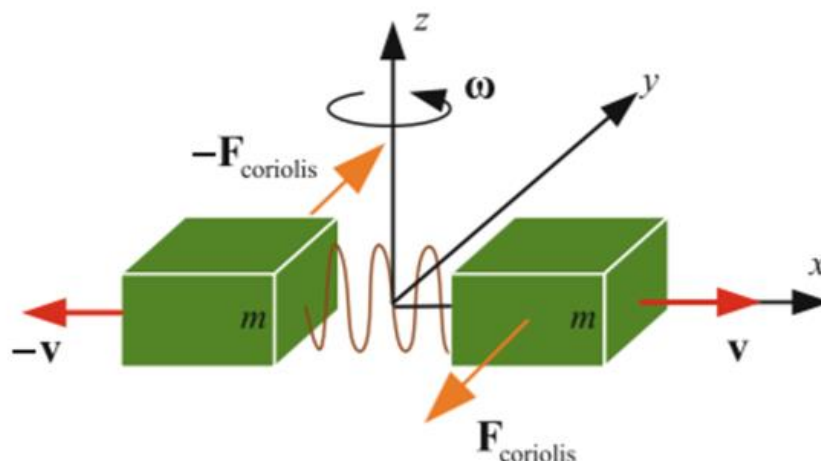
Pokretna masa s mehaničkom oprugom postavljena je između dvije fiksirane silicijske ploče ili elektrode (d_1 i d_2). Pomicanjem mase po osi x dolazi do promjene kapaciteta između mase i silicijskih ploča. Pomak i smjer mase dobivaju se preko razlike kapaciteta (C_1 i C_2).

Budući da pomak pokretne mase prouzrokovan akceleracijom stvara malu promjenu kapaciteta, potrebno je koristiti više paralelno povezanih pokretnih i fiksnih elektroda što omogućuje veću promjenu kapaciteta te se postiže veća točnost. [23]

MEMS žiroskopi su nešto složeniji od akcelerometara. Najčešće se izvode s vibracijskom strukturom za osjet rotacije i mjere kutnu brzinu na temelju Coriolisovog ubrzanja. Coriolisovo ubrzanje je prividno ubrzanje koje se javlja vanjskim promatranjem objekta koji se giba pravocrtno po osi okomitoj na os rotacije u rotirajućem referentnom okviru. Coriolisova sila dana je formulom:

$$F_{COR} = 2mv \times \omega \quad [24]$$

Princip rada MEMS žiroskopa prikazan je na Slici 13.



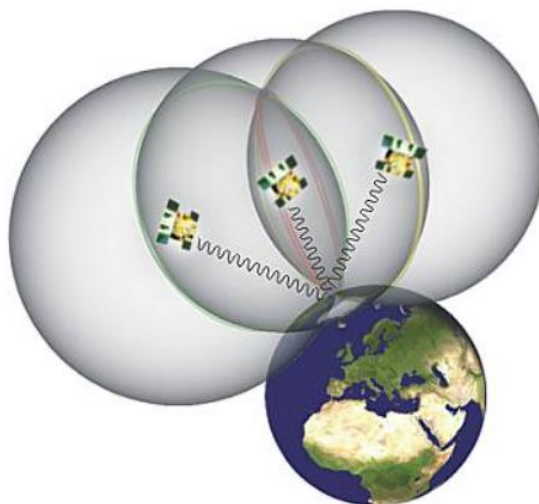
Slika 13. Princip rada MEMS žiroskopa [24]

Na slici su prikazane dvije mase iste magnitude i suprotnog smjera akceleracije. Kutna brzina kod obje mase ostaje nepromijenjena, a pod utjecajem dvaju različitih sila generira se razlika kapacitivnosti proporcionalna kutnoj brzini.

Često se koriste MEMS žiroskopi s vibrirajućim kotačem ili s kutnom vilicom. [24]

4.2. Satelitski navigacijski sustavi

Globalni položajni sustav (eng. *Global Positioning System* - GPS) je satelitski radionavigacijski sustav za određivanje položaja na Zemlji. Sastoji se od tri segmenta: svemirskog (satelita), kontrolnog (kontrolne stanice na Zemlji) i korisničkog segmenta (GPS-prijamnici). Nastao je kao dio vojne tehnologije SAD-a 1978. godine, kada su prvi GPS sateliti lansirani u svemir, a od 1980. nalazi se i u civilnoj upotrebi. GPS je najkorišteniji navigacijski sustav koji se primjenjuje na kopnu, na moru i u zraku. Princip rada GPS-a temelji se na mreži satelita (minimalno 24) koji neprestano kruže oko Zemlje i kontinuirano emitiraju kodirane radio signale koji GPS prijamnicima omogućuju određivanje prilično točnog položaja na Zemlji. Područje točnosti kreće se unutar jednoga metra, a kod skupljih sustava centimetra. Sateliti se napajaju solarnom energijom, a imaju i rezervne baterije. Gibaju se brzinom od 11 000 km/h na visini od oko 20 000 km iznad Zemljine površine i raspoređeni su tako da prijamnici u bilo kojem trenutku mogu primiti signale s najmanje četiri satelita kao što je prikazano na Slici 14. [25]



Slika 14. GPS komunikacija s četiri satelita [25]

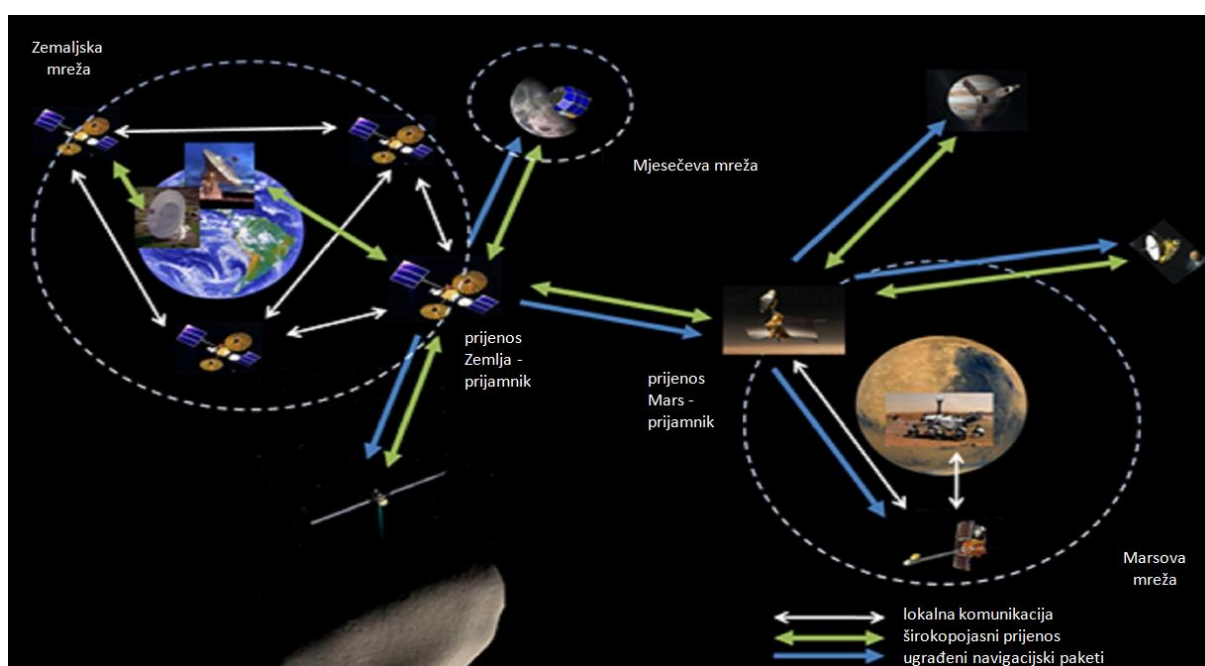
Satelite na pravoj putanji održavaju mali raketni pogoni. Mogu trajati desetak godina te se sustavno razvijaju i lansiraju novi.

Radio signali sa satelita odašilju se snagom od 20 do 50 W. Civilni GPS prijamnici primaju signale na frekvenciji od 1575,42 MHz ultra visoke frekvencije (eng. *Ultra High Frequency* – UHF). Signali koje sateliti šalju su kodirani i sadrže orbitalne i vremenske informacije koje kontrolne stanice na Zemlji ispravljaju i šalju natrag satelitima. Ispravljeni podaci se šalju prijamnicima koji ih memoriraju i ažuriraju. Iz tih podataka računa se vrijeme putovanja signala od satelita do GPS - prijamnika na Zemlji koje se množi s brzinom svjetlosti kako bi se dobila udaljenost između prijamnika i satelita. [24]

Točnost lokalizacije ovisi o: nesmetanom vidokrugu prema satelitima, atmosferskim uvjetima, sposobnosti primanja radiofrekvencija, svojstvima i osjetljivosti prijamnika, broju satelita korištenih u izračunu, poziciji satelita u odnosu na prijamnik i dr. [18] Eventualne pogreške pri određivanju položaja mogu nastati kao posljedice ionskog i troposferskog kašnjenja, višestrukog puta signala, pogrešaka sata prijamnika i orbitalnih pogrešaka.

Nepovoljne atmosferske prilike te interakcija sa zemaljskim preprekama mogu reflektirati signale, usporiti ih ili im sasvim onemogućiti prolaz. Zbog toga upotreba GPS-a na nekim lokacijama kao što su spilje, šume, tuneli, duboki kanjoni, podvodna područja, unutrašnjost zgrada i sl. može biti ograničena i nepouzdana. [25] GPS je najkorišteniji navigacijski sustav na otvorenom, ali se zbog smanjene preciznosti u zatvorenim prostorima ne koristi toliko često ili se koristi u kombinaciji s drugim navigacijskim sustavima.

Sustav autonomnog pozicioniranja svemirskih letjelica (eng. *Multi-spacecraft Autonomous Positioning System* - MAPS) je mrežni satelitski navigacijski protokol koji je namijenjen za svemirsku primjenu, ali je primjenjiv i u zrakoplovstvu, bespilotnim letjelicama, transportnim vozilima te u robotici. Razvijen je u NASA-inom centru za svemirske letove *Marshall*. MAPS koristi pakete za prijenos podataka u koje su ugrađeni specifični podaci te ih kombinira s vremenima prijensa i prijema za samostalno određivanje položaja. MAPS pomoću izravne komunikacije među strojevima (eng. *Machine-to-machine* - M2M), budući da sva sredstva unutar mreže razmjenjuju podatke s drugim korisnicima, omogućuje autonomno decentralizirano pozicioniranje. Povećanjem broja sudionika u razmjeni podataka poboljšava se učinkovitost i preciznost navigacije. [26] Komunikacija u MAPS protokolu prikazana je na Slici 15.



Slika 15. MAPS protokol [26]

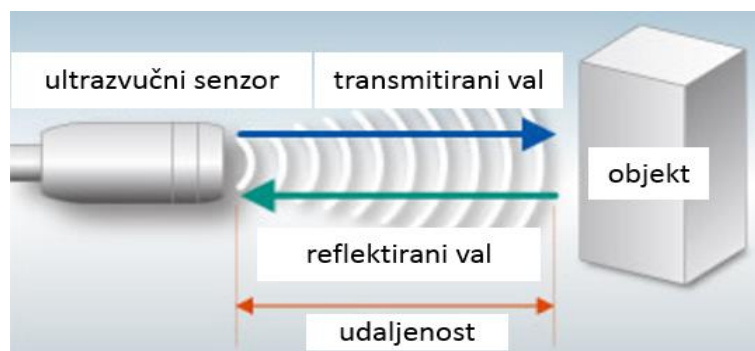
Primjena MAPS protokola zbog implementiranih podatkovnih paketa i dobre komunikacije s drugim uređajima olakšava navigaciju, ne zahtijeva vanjsku infrastrukturu te je manje ovisna o Zemaljskim sustavima i operaterima. Također omogućava autonomnu navigaciju na područjima gdje nije dostupan GPS. [26]

4.3. Navigacija pomoću senzora

Najčešće korišteni senzori za navigaciju su:

- ultrazvučni senzori
- LiDAR
- UWB senzori
- vizijski senzori (kamera).

Ultrazvučni senzori rade na principu akustičnih valova pomoću kojih se odaslani signal reflektira i vraća. Ultrazvučni valovi su valovi kojima je frekvencija iznad 20 kHz koje ljudsko uho ne čuje. Na temelju brzine širenja ultrazvuka i izmjerenog vremena u kojem ultrazvučni valovi putuju do promatranog objekta i nazad određuje se udaljenost između senzora i objekta, kao što je shematski prikazano na Slici 16. [27]



Slika 16. Princip rada ultrazvučnog senzora [20]

Budući da se mjeri vrijeme od trenutka emitiranja ultrazvučnog vala do njegova povratka, dakle vrijeme njegova kretanja u oba smjera, dobivena vrijednost mora se podijeliti s dva.

Udaljenost između ultrazvučnog senzora i objekta (L_0) može se izraziti formulom :

$$L_0 = \frac{vt \cos \theta}{2} \quad [27]$$

gdje je: v - brzina ultrazvučnih valova,

t - vrijeme putovanja emitiranih valova od senzora do objekta i natrag,

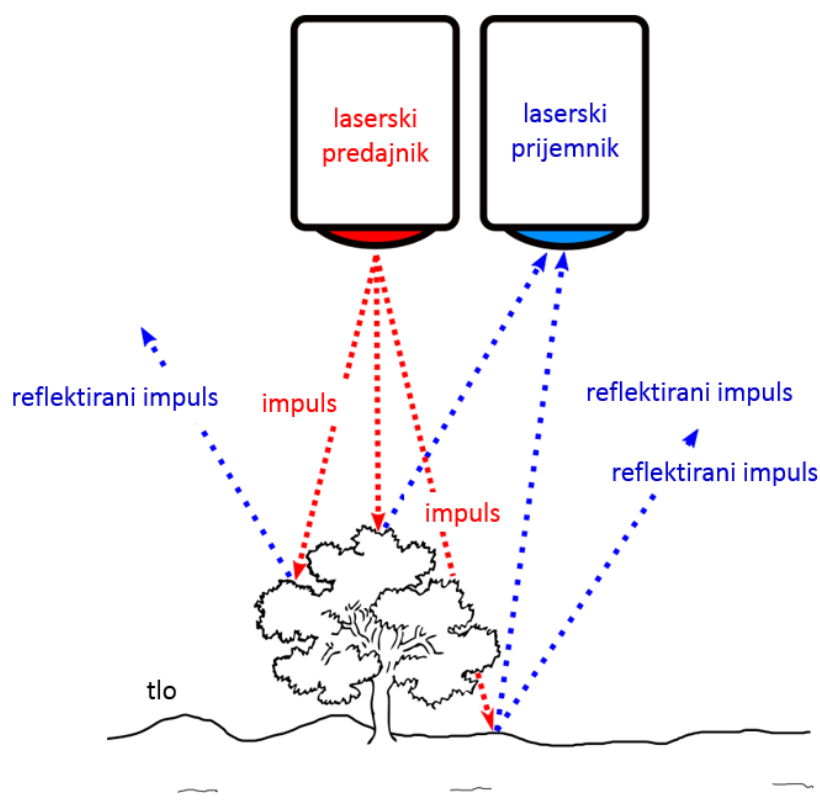
θ - kut.

Zbog vrlo jednostavnog principa mjerenja, lagane konstrukcije i pristupačne cijene ultrazvučni senzori se vrlo često koriste. [27]

Za autonomnu navigaciju bespilotnih letjelica ultrazvučni senzori se najčešće koriste za detekciju prepreka i izbjegavanje sudara gdje se kombiniraju podaci prikupljeni ultrazvučnim sensorima te podaci IMU-a. Istraživanja su pokazala da ovi senzori imaju ograničeno područje primjene, točnost koja nije zadovoljavajuća na većim udaljenostima i koja ovisi o kutu upada i površini o koju se val odbija te da su moguće pogreške apsorpcije i refleksije. Zbog toga se koriste u kombinaciji s drugim navigacijskim sustavima i sensorima. [28]

Senzor svjetlosnog zamjećivanja i klasifikacije (eng. *Light Detection and Ranging* - LiDAR) pomoću laserskog snopa zraka, mjerenjem vremena između emitiranog i reflektiranog impulsa, određuje udaljenost od promatranog objekta. [29]

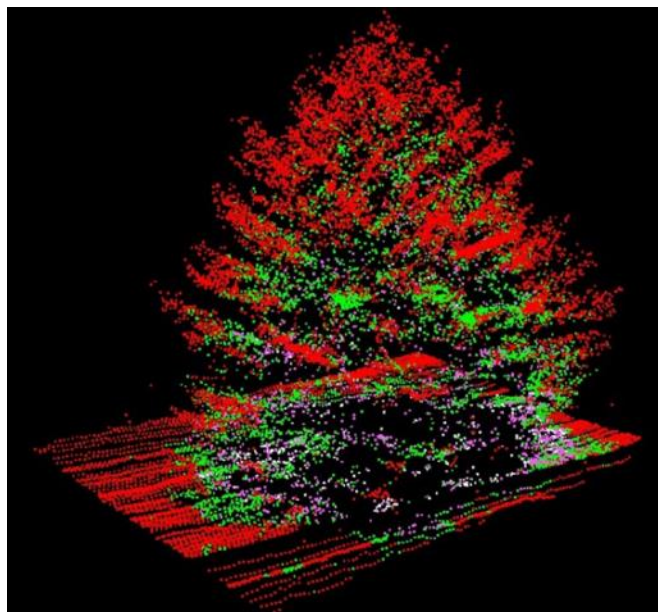
Princip rada LiDAR senzora prikazan je na Slici 17.



Slika 17. Princip rada LiDAR senzora [29]

Emitirani laserski impuls ima onoliko povrata koliko ima reflektirajućih površina na koje naiđe. Povećanjem udaljenosti objekta od senzora intenzitet laserskog impulsa eksponencijalno se smanjuje.

Svaki emitirani impuls putujući prema ciljanom objektu nailazi na više reflektirajućih površina te ovisno o njima ima i višestruki broj povrata. Najznačajniji je prvi povrat koji se reflektira od najbliže i najviše točke u promatranj okolini i njime se kod većine LiDAR sustava zabilježe vrijednosti za najveći broj potrebnih točaka što je vidljivo i iz slike 18. [30]



Slika 18. Objekt zabilježen laserskim impulsima [30]

Crvenom bojom su prikazane točke prikupljene prvim povratom, zelenom bojom točke prikupljene drugim povratom, ružičastom bojom sve točke prikupljene između drugog i posljednjeg povrata, a bijelom bojom točke prikupljene posljednjim povratom.

Svakim sljedećim povratom impulsa broj korisnih podataka značajno se smanjuje, tako da sposobnost velikog broja višestrukih povrata ne predstavlja neku prednost budući da se i težina senzora povećava, osim u područjima prekrivenim šumom ili drugom vegetacijom gdje različiti povrati prodirući kroz vegetaciju mogu zabilježiti precizna mjerenja između gustih točaka (npr. krošnje drveća).

Izračun mjernih podataka vrši se obradom točaka u sekundi (eng. *Points per Second* - PPS) gdje se množe vertikalne točke (broj laserskih zraka), horizontalne točke (horizontalno vidno polje dijeljeno s horizontalnom vidnom razlučivosti) i broj slika u sekundi (frekvencija pojavljivanja kadrova). [30]

Kod navigacije dronova LiDAR senzori omogućuju kontroliranje udaljenosti između drona i objekata s frontalne te s dvije bočne strane. Podaci se prikupljaju u rasponu od više stupnjeva

širine u jednome smjeru budući da na točnost prikupljenih podataka utječu i smetnje i vrsta površine. U zatvorenim prostorima se, osim za detekciju prepreka, frontalni nadzor koristi i za prepoznavanje granice prostora te se pokreće odgovarajuća reakcija (slijetanje, lebdenje ili skretanje). [31]

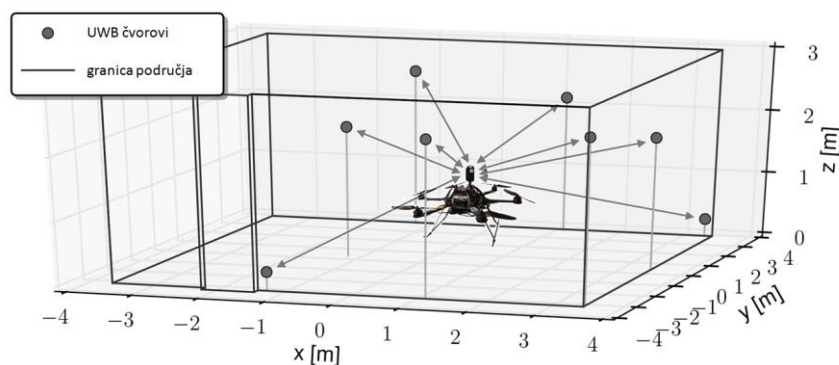
Pri navigaciji dronova LiDAR ima brojne prednosti u odnosu na neka druga sredstva navigacije. Kao prednost može se istaknuti:

- visoka preciznost izvršenog mjerenja (LiDAR spada među najtočnije uređaje za mjerenje udaljenosti)
- neovisnost o svjetlosnim uvjetima u okolini (mogućnost rada u slabo osvijetljenom i neosvijetljenom prostoru, danju i noću)
- mogućnost vrlo brzih dobivanja točnih podataka
- mogućnost prodiranja impulsa i skeniranja kroz vegetaciju
- visoka kvaliteta prikupljenih podataka.

Budući da LiDAR sam ne daje sve potrebne informacije, također se koristi u kombinaciji s IMU-om, GPS-om ili drugim navigacijskim sredstvima. [30]

Ultraširokopolasna (eng. *Ultra-Wideband* - UWB) navigacija radi na principu radio tehnologije pri čemu UWB radio moduli emitiraju UWB impulse te procjenjuju intermodularnu udaljenost na temelju izmjerenog vremena prijenosa i prijema UWB impulsa. UWB impulsi se mogu prenositi između 3 GHz i 5 GHz, a radiofrekvencijska širina pojasa im se kreće od 500 MHz do 1,4 GHz. Zahvaljujući povećanoj širini pojasa izbjegava se ometanje signala drugih radiofrekvencija kao što su WiFi signali ili signali daljinskih upravljača. [32]

Za UWB navigaciju nužno je instalirati UWB čvorove na poznate pozicije kao što je prikazano na Slici 19.



Slika 19. UWB fiksni čvorovi [33]

UWB modul instaliran na uređaju kontinuirano komunicira s čvorovima kako bi odredio udaljenost. Potom se dobiveni podaci kalibriraju, analiziraju se rubna područja za detekciju odstupanja te se podaci implementiraju u lokalizacijski algoritam kako bi se dobila precizna procjena položaja. Za određivanje položaja pokretnog čvora simultano se prikupljaju mjerenja u odnosu na više fiksnih čvorova metodom trilateracije koja pokreće algoritam. Podaci se također obrađuju proširenim Kalmanovim filterom (eng. *Extended Kalman Filter* - EKF).

UWB navigacija ostvaruje visoku preciznost uz pogrešku u rangu nekoliko centimetara, nije osjetljiva na efekte pojave prostiranja signala po više putova (eng. *multipath* efekt) i efekt nedostatka optičke vidljivosti između UWB modula i fiksnih čvorova (eng. *nonline-of-sight* - NLOS). [34]

4.4. Navigacija pomoću kamere

Vizijska odometrija je proces određivanja položaja i orijentacije robota analizom povezane slike s kamere gdje se procjenjuje kretanje praćenjem promjena na sekvencijalnim slikama koje su snimljene vizijskim sustavom. Vizijska odometrija postupno (inkrementalno) procjenjuje kretanje robota praćenjem pozicije za pozicijom.

Prednost vizijske odometrije u odnosu na IMU i LiDAR senzore je cijena, budući da su troškovi kamera puno niži.

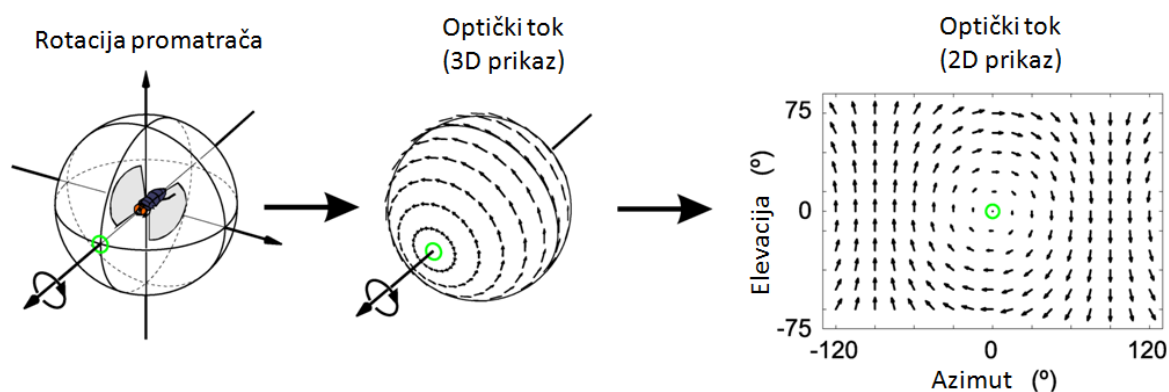
Osnovna podjela vizijske odometrije je na monokularnu i stereo vizijsku odometriju.

Kod monokularne vizijske odometrije karakteristične točke se promatraju u najmanje tri različita okvira (inicijalno promatranje značajki u prvom okviru, ponovno promatranje i triangulacija u 3D točke u drugom okviru i izračun transformacija u trećem okviru). Osnovni problem monokularne vizijske odometrije je problem dvosmislenosti razmjera jer se transformacija (translacija i rotacija) između prva dva uzastopna okvira ne može u potpunosti odrediti zato što razmjer nije poznat i obično se postavlja na unaprijed definiranu vrijednost. Razmjeri rekonstruiranih 3D točaka i pratećih transformacija vezani su na početni, unaprijed definirani, razmjer između prva dva okvira. Stoga su potrebni dodatni podaci o 3D strukturi ili početna transformacija.

U stereo vizijskoj odometriji, podaci se rekonstruiraju triangulacijom istodobno promatrajući značajke na lijevoj i desnoj slici koje su prostorno razmaknute na poznatu udaljenost. Kretanje se procjenjuje promatranjem značajki u dva uzastopna okvira. Monokularna i stereo

vizijska odometrija dalje se dijeli na metodu podudaranja značajki u nizu okvira, metodu praćenja značajki u susjednim okvirima i metodu optičkoga toka. [35]

Optički tok (eng. *Optical Flow Navigation*) je tehnika koja se koristi za određivanje kretanja površina predmeta u odnosu na promatrača. Kukci i druge leteće životinje kretanje detektiraju na vrlo sličnom principu te tako procjenjuju brzinu i visinu. Osnova obrada sekvenci slika započinje pronalaskom vektorskog polja koje opisuje kako se mijenja slika s vremenom. [36] Na Slici 20. prikazan je vektorski 2D prikaz optičkog toka.

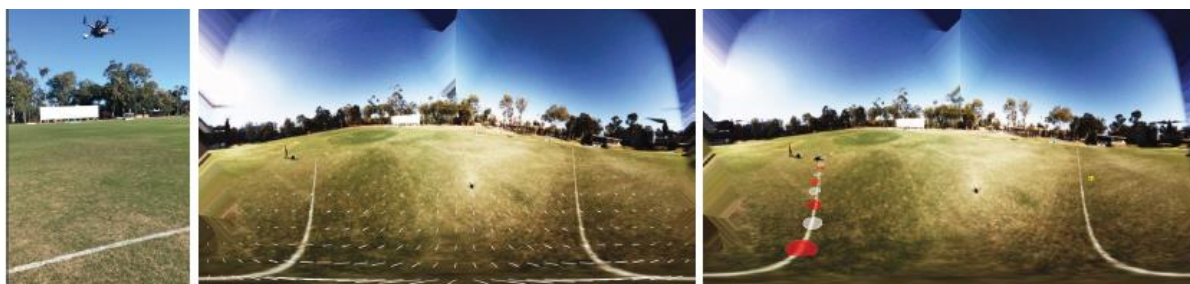


Slika 20. Optički tok [36]

Optički tok generira vektore brzine koji odgovaraju točkama objekta u pokretu. Analizom polja može se vidjeti smjer kretanja odgovarajućih točaka i iznos brzine.

Navigacija optičkim tokom koristi kameru kao glavnu komponentu. Kamera snima sliku te ju zatim šalje u procesor. Procesor zatim uspoređuje snimljenu sliku s referentnom slikom koja je postavljena kao ulazni podatak. [36]

Na Slici 21. prikazan je optički tok i putanja na stvarnoj snimci bespilotne letjelice.



Slika 21. Stvarni prikaz optičkog toka [37]

Prikazan je dron u letu, optički tok nastao translacijom drona i putanja leta.

Kako bi se osiguralo da se optičkim tokom registriraju stvarna kretanja pretpostavlja se:

- da nema okluzije, odnosno da jedan objekt ne blokira drugi
- da je svjetlost značajki slike konstantna cijelo vrijeme
- da su značajke slike stabilne i ne mijenjaju se.

Pomoću optičkog toka izračunava se aproksimacija polja kretanja iz niza slika prikupljenih u različitom vremenu. Kako bi se pronašlo vektorsko kretanje slike u ravnini 3D slike se projiciraju na 2D ravnine, a odgovarajući 2D vektori se ekstrahiraju i analiziraju. [38]

4.4.1. *Simultana lokalizacija i mapiranje*

Simultana lokalizacija i mapiranje (eng. *Simultaneous Localization and Mapping* – SLAM) je tehnologija koja istovremeno stvara kartu nepoznatog okruženja i izvodi lokalizaciju. Razvoj SLAM tehnologije je jedan od značajnijih napredaka u robotici u novije vrijeme. Prvi začeci tehnologije nastali su krajem 80-ih godina prošloga stoljeća. U jednom od prvih važnijih radova prezentirana je tehnologija mapiranja pomoću orijentira, ali konvergentno ponašanje grešaka karata nije uzeto u obzir te je izračun bio vrlo kompleksan. U konačnici se došlo do zaključka da se problem istovremenog mapiranja i lokalizacije ponaša konvergentno te da se porastom korelacija između orijentira dobiva kvalitetnije rješenje, suprotno prethodnom mišljenju gdje su se korelacije nastojale minimizirati. Konačna struktura i sam akronim SLAM prezentirani su na simpoziju 1995. godine. [39]

SLAM problem je problem kreiranja karte okruženja uz istovremeno određivanje položaja robota u odnosu na tu kartu uzevši u obzir šumove podataka.

Matematička osnova SLAM problema bazira se na teoriji vjerojatnosti.

Osnovni niz pozicija, odnosno put robota dan je izrazom:

$$X_T = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_T\} \quad [40]$$

gdje je x_t pozicija robota, najčešće trodimenzionalni vektor (2D koordinate u ravnini i jedna rotacija), x_0 početna pozicija koja se koristi kao referentna točka za algoritam procjene, t označava vrijeme, a T krajnje vrijeme koje može ići sve do beskonačnosti.

Relativno kretanje robota, odnosno kretanje između dvije uzastopne pozicije gdje su podaci prikupljeni odometrijom dano je izrazom:

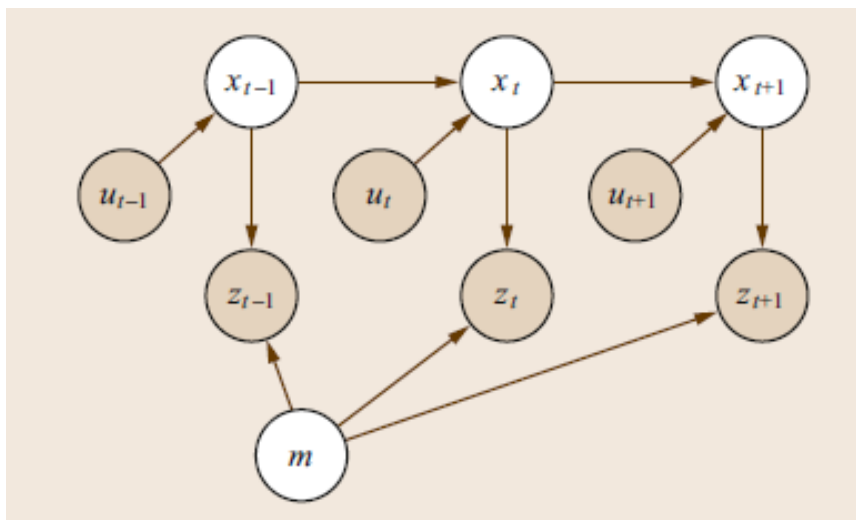
$$U_T = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_T\} \quad [40]$$

gdje u_T označava odometriju koja karakterizira kretanje između vremena $t - 1$ i vremena t . Budući da odometrijska mjerenja pokazuju značajne šumove i da tehnike integracije puta nisu točne, U_T nije dovoljan za određivanje točnih pozicija od početne pozicije x_0 .

Stvarna karta okruženja označava se s m . Robot putem senzora osjeti objekte u okruženju, a m označava njihovu poziciju. Mjerenjima se uspostavljaju informacije između značajki sadržanih u m i pozicije robota x_t . Ako se pretpostavi da robot uzima točno jedno mjerenje u svakom trenutku, slijed mjerenja prikazuje se kao

$$Z_T = \{z_0, z_1, z_2, \dots, z_T\} \quad [40]$$

Na Slici 22. prikazane su sve navedene varijable, njihov slijed i međusobne ovisnosti.



Slika 22. Grafički prikaz SLAM problema [40]

Strelice prikazuju međusobne uzročne veze, a zatamnjeni krugovi prikazuju podatke koje robot direktno vidi. Varijable koje nisu direktno vidljive nastoje se dobiti pomoću SLAM tehnologije, odnosno nastoji se pomoću odometrije i mjernih podataka dobiti model stvarne karte okruženja m i niz pozicija robota X_T .

Postoje dva osnovna oblika SLAM problema:

- puni SLAM problem (eng. *full SLAM*)
- *online* SLAM problem.

Puni SLAM problem uključuje procjenu sljedeće pozicije prateći cijeli put robota zajedno s

kartom, dakle procjenjuju se svi podaci u isto vrijeme. Puni SLAM problem je definiran izrazom:

$$p(X_T, m | Z_T, U_T) \quad [40]$$

Ovdje je problem izračun vjerojatnosti podataka X_T i m .

Kod *online* SLAM problema nastoji se odrediti trenutna pozicija robota umjesto cijeloga puta.

Online SLAM problem je definiran izrazom:

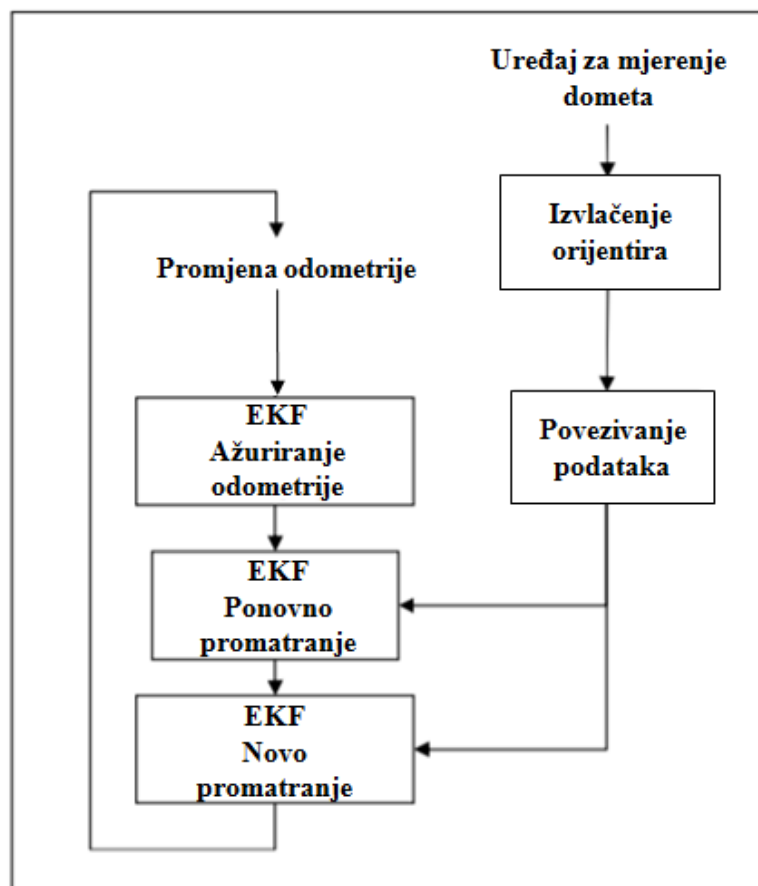
$$p(x_t, m | Z_t, U_t) \quad [40]$$

Ovakvi algoritmi se često nazivaju filterima i odjednom se obrađuje jedan tip podataka. Za rješavanje SLAM problema potrebno je još imati i dva dodatna modela: matematički model koji povezuje odometrijska mjerenja u_t s pozicijama robota x_{t-1} i x_t te model koji povezuje mjerenja z_t s okruženjem m i pozicijom robota x_t . [40]

Postoje tri osnovna tipa SLAM tehnologije na kojima se baziraju svi ostali. To su EKF-SLAM gdje se vrše ažuriranja pomoću proširenog Kalmanovog filtera, zatim SLAM baziran na filterima čestica i GRAPH SLAM koji se bazira na grafičkom prikazu.

EKF-SLAM je najstariji i jedan je od najutjecajnijih SLAM algoritama. Karta okruženja se bazira na značajkama, odnosno koriste se orijentiri čiji broj nije prevelik zbog kompleksnosti izračuna. Za procjenu pozicije i značajki iz okruženja koriste se vektori pojedinačnog stanja uz pridruženu matricu kovarijance grešaka koja predstavlja nesigurnost u procjenama između pozicije robota i značajki okruženja. Uočavanjem novih značajki širi se vektor stanja te veličina matrice kovarijance grešaka raste kvadratno, što je jedan od glavnih problema EKF-SLAM-a. Kretanjem robota vektor stanja sustava i matrica kovarijance se ažuriraju pomoću proširenog Kalmanovog filtera. [40]

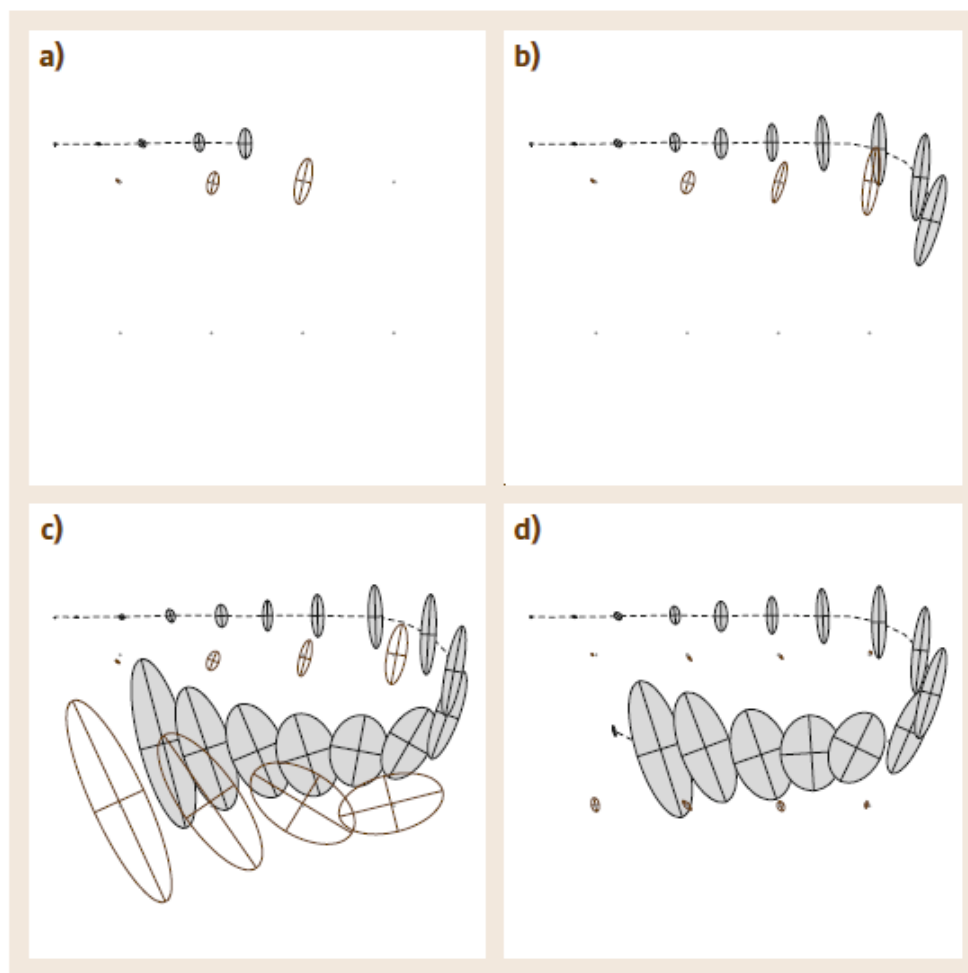
Blok dijagram EKF-SLAM algoritma prikazan je na Slici 23.



Slika 23. EKF-SLAM blok dijagram [41]

Trenutna pozicija robota određuje se pomoću odometrije koja često ima greške očitavanja te pomoću vanjskog senzora za mjerenje dometa (npr. LiDAR) koji pomaže u točnijem pozicioniranju. Iz okruženja se izdvajaju značajke koje nazivamo orijentirima. Prošireni Kalmanov filter ažurira podatke o poziciji robota ovisno o značajkama iz okruženja. Kretanjem robota dolazi do promjene orijentira te se nova pozicija ažurira u EKF-u pomoću ažuriranja odometrije. Orijetiri se zatim izdvajaju iz okruženja nove pozicije i novi podaci orijentira se povezuju s prethodno promatranim. Orijetiri čija je pozicija već ranije promatrana te se kretanjem promijenila koriste se za ažuriranje položaja robota u EKF-u, a orijetiri koji su prvi put zabilježeni dodaju se u EKF. [41]

Grafički prikaz primjene EKF-a na online SLAM prikazan je na Slici 24.



Slika 24. Grafički prikaz primjene EKF-a na online SLAM [40]

Putanja robota prikazana je isprekidanom crtom, a njezine procjene vlastite pozicije su zasjenjene elipse. Prepoznate značajke nepoznate lokacije prikazane su kao točkice, a procjene njihove pozicije su prikazane kao bijele elipse. U slikama (a – c) neizvjesnost pozicije robota raste, kao i neizvjesnost pozicije orijentira. Pod (d) robot ponovno registrira prvi ishodišni orijentir pa se smanjuje neizvjesnost pozicije svih orijentira i trenutne pozicije robota. To proizlazi iz korelacija koje se izražavaju u matrici kovarijance. Pri dobivanju novih informacija o poziciji robota, informacije se šire i na prethodno promatrane orijentire. [40]

Povezivanje podataka je veliki problem kod implementacije SLAM-a. Budući da se nova mjerenja povezuju s postojećim orijentirima na karti, pogreške nakon povezivanja se ne mogu lako ispraviti te može doći do velike pogreške algoritma. Uz to, veliki problem predstavlja i "zatvaranje petlje" gdje kod ponovnog promatranja postojećeg orijentira nakon kretanja robota postoji velika doza nesigurnosti jer se isti orijentiri iz različitih smjerova mogu doimati

različito. EKF-SLAM koristi linearne modele za nelinearne modele kretanja i promatranja, a nelinearnost je također veliki problem i dovodi do pogrešaka. [39]

SLAM baziran na filterima čestica ili brzi SLAM (eng. *Fast SLAM*) integrira filtere za čestice i prošireni Kalmanov filter. *Fast SLAM* iskorištava strukturno svojstvo SLAM problema da korelacije u nesigurnostima među različitim značajkama karte nastaju samo zbog nesigurnosti pozicije robota. Ako robot ima definiran točan put, pogreške procjene značajki su neovisne jedna o drugoj. Ovo omogućuje definiranje faktorskog prikaza sljedeće pozicije te se takav faktorski prikaz implementira koristeći filtere za čestice kako bi se procijenila putanja robota.

Pogreške na karti su neovisne, stoga se problem mapiranja može podijeliti u zasebne probleme. EKF-om se procjenjuju pozicije značajki. *Fast SLAM* nudi računske prednosti u odnosu na obični EKF-SLAM. Ključna prednost *Fast SLAM*-a je činjenica da se mogu donositi odluke o pridruživanju podataka na bazi pojedinačnih čestica pa se koristi više povezanih podataka umjesto korištenja najvjerojatnijeg skupa podataka. Još jedna prednost *Fast SLAM*-a u odnosu na EKF-SLAM je ta da se filteri za čestice mogu nositi s nelinearnim modelima kretanja robota, dok se u EKF-SLAM-u takvi modeli aproksimiraju linearnim funkcijama. [42]

Osnovni princip grafičkog SLAM-a (eng. *Graph SLAM*) je prikaz orijentira i pozicija robota kao čvorova grafa. Uzastopni parovi pozicija x_{t-1} i x_t povezani su informacijama prenesenim odometrijskim očitanjem u_t . Poveznice postoje između čvorova koji odgovaraju pozicijama x_t i orijentirima m_i , pod pretpostavkom da je u vremenu t robot zabilježio orijentir i .

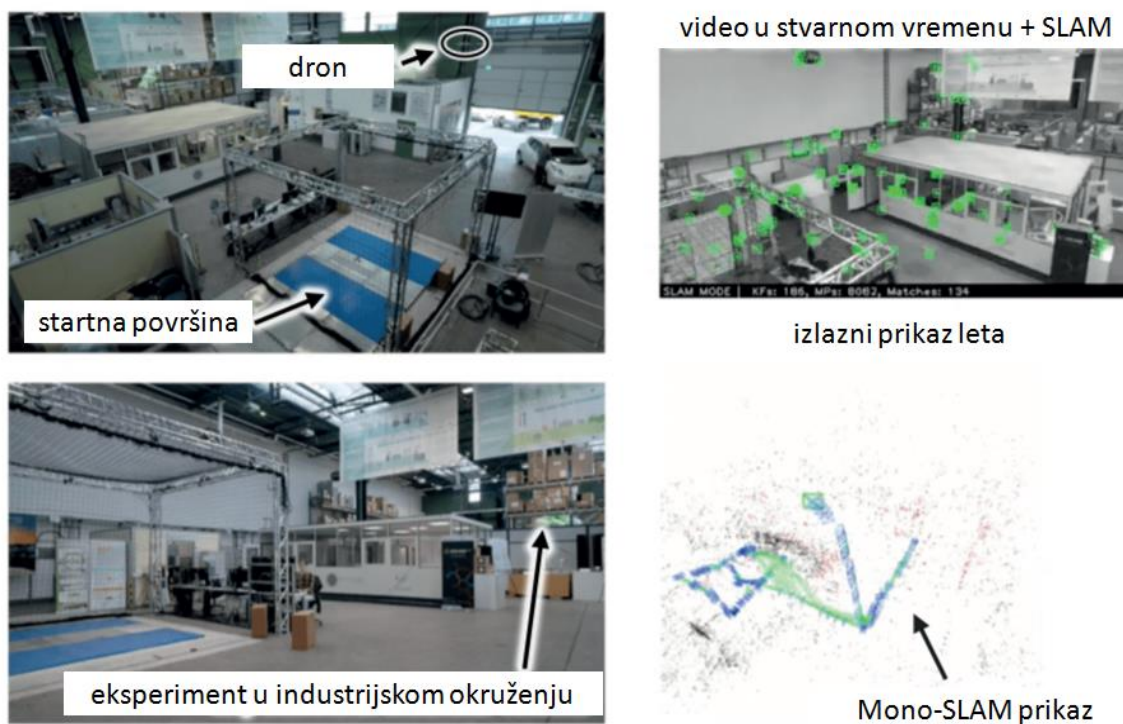
Ograničavajući faktor EKF-SLAM-a je kvadratičnost matrice kovarijance, dok u grafičkom obliku takvo ograničenje ne postoji. Vrijeme ažuriranja grafa je konstantno. Prednost grafičke metode nad EKF metodom je sposobnost stalne relinearizacije funkcije pogrešaka što dovodi do boljih rezultata, ali izvođenje optimizacije može biti skupo. [40]

Vizualni SLAM stvara karte i prati poziciju robota u punih šest stupnjeva slobode (eng. *6 Degrees of Freedom* - 6-DOF) koristeći podatke iz kamere ili RGB-D (*Kinect*) senzora. Teškoće korištenja monokularnih, stereo ili RGB-D kamera su udruživanje podataka i računaska učinkovitost. Ključni izazov je robusnost budući da je zbog kretanja kamere teže procijeniti stanje. Rani pristupi temeljili su se na EKF-u, ali nisu računali punu kovarijancu za pozicije značajki i putanje kamere čime se gubila konzistentnost. Vizualni SLAM usko je povezan s problemom strukture iz kretanja (eng. *structure from motion* - SFM) u računalnom

vidu. SFM se prvenstveno bavi *offline* serijskom obradom, a SLAM-om se nastoji pronaći rješenje za *online* rad koje bi bilo prikladno za interakciju robota ili korisnika s okolinom u zatvorenoj petlji.

Početni problem monokularnog SLAM-a bila je inicijalizacija točaka koje su udaljene od kamere zbog značajki koje proizlaze iz loših dubinskih informacija što je prevladano uvođenjem inverzne dubinske parametrizacije. [40]

Jedan prikaz eksperimentalnog mapiranja SLAM tehnologijom dan je na Slici 25.



Slika 25. Mono-SLAM prikaz [43]

Iz slike je vidljiv eksperimentalni postav industrijskog okruženja, izlazni prikaz leta gdje su vidljivi orijentiri te konačni Mono-SLAM prikaz. Prekretnica u stvaranju robusnih vizualnih SLAM sustava je Paralelno praćenje i mapiranje (eng. *Parallel Tracking and Mapping - PTAM*) gdje se zadaci mapiranja i lokalizacije ključnih kadrova razdvajaju u paralelne niti čime se poboljšava robusnost, *online* obrada i smanjuje se složenost.

Posljednjih godina koriste se RGB-D (*Kinect*) senzori čime se dobiva kombinacija izravnih mjerenja s gustim vizualnim slikama što značajno poboljšava mapiranje i navigaciju u zatvorenim prostorima. [40]

Osim navedenih izvedbi SLAM tehnologije, značajni su i:

- ORB-SLAM
- izravni monokularni SLAM velikih razmjera (eng. *Large-Scale Direct Monocular SLAM* - LSD-SLAM)
- SLAM konvolucijskih neuronskih mreža (eng. *Convolutional Neural Network SLAM* - CNN-SLAM).

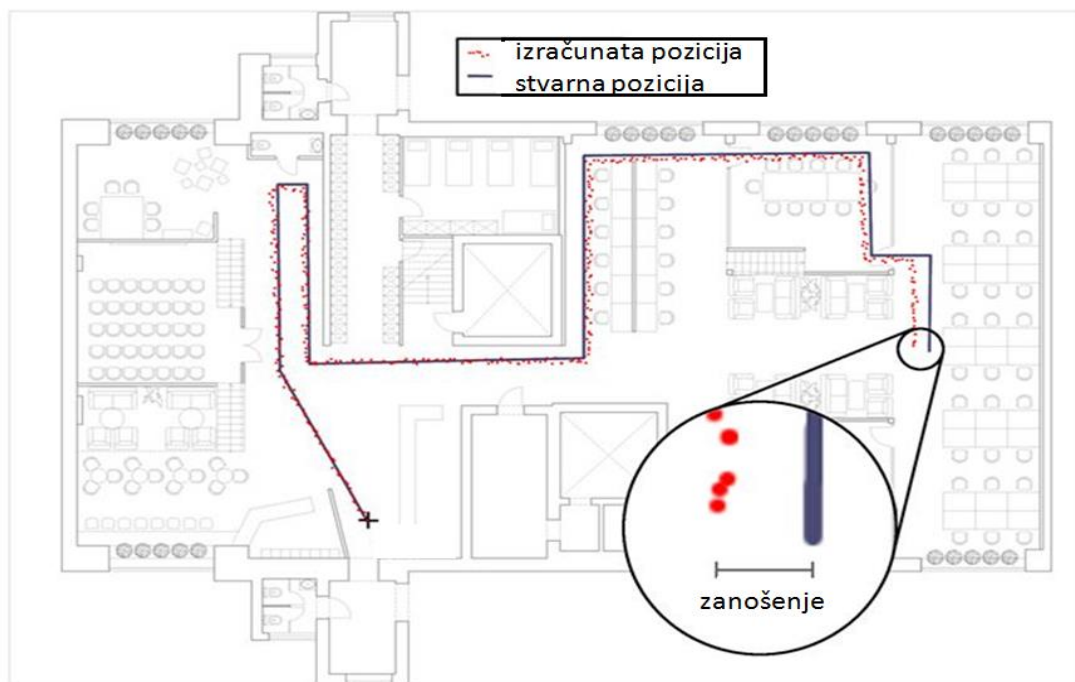
Jedan od jedinstvenih vizualnih SLAM tehnologija je i *Dragonfly* koji omogućava 3D navigaciju u stvarnom vremenu, bez kašnjenja, pri čemu mu je dovoljna samo kamera. Koristi tehnologiju simultane lokalizacije i mapiranja analizirajući u stvarnom vremenu video s ugrađene kamere pomoću SLAM algoritama. Nema hardverske infrastrukture (prijemnika, antene i sl.) niti su mu potrebni bilo kakvi drugi vanjski senzori, što ga čini izuzetno fleksibilnim i jeftinijim u odnosu na neke druge tehnologije. Može se koristiti u otvorenom i u zatvorenom prostoru za precizno pozicioniranje (do 5 cm) viličara, robota, automatiziranih vozila i dronova.

Dragonfly SLAM podatke o lokalizaciji pruža u šest stupnjeva slobode (6-DOF), dakle tri translacije (x, y, z) te tri osi rotacije: os valjanja (eng. *roll*), os propinjanja (eng. *pitch*) i os skretanja (eng. *yaw*), kao i u obliku Svjetskog geodetskog sustava (eng. *World Geodetic System 1984* - WGS-84), odnosno daje podatke o zemljopisnoj širini, dužini i nadmorskoj visini od tla.

Može se pokretati na uređaju, na udaljenom poslužitelju, u oblaku ili izvan mreže. Omogućava razmjenjivanje karata i podataka među korisnicima te pruža mogućnost istovremenog korištenja većem broju dronova. Također se može izravno integrirati u robote i uređaje koji koriste fleksibilnu razvojnu cjelinu otvorenog koda za upravljanje radnjama, zadacima i pokretima (eng. *Robot Operating System* - ROS). Može raditi s monokularnim ili stereo kamerama.

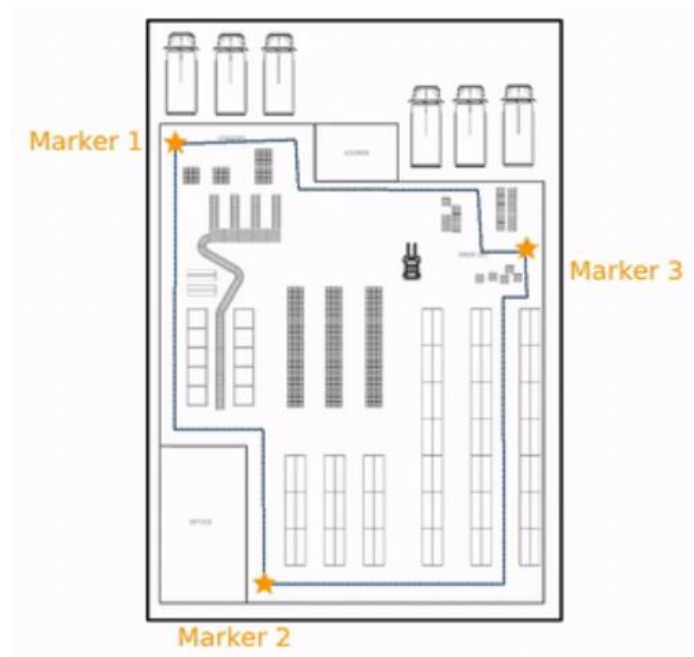
Iako je točnost ove tehnologije vrlo velika, i *Dragonfly* ima problem zanošenja.

Samo zanošenje se odnosi na prostore gdje se mapiranje vrši prvi put, a odstupanja unutar već poznatih okruženja su razlika nakupljenih grešaka koje se ispravljaju zatvaranjem petlje i stvarne vrijednosti. [44] Na Slici 26. prikazana je karta iz koje je vidljivo odstupanje između stvarne i izračunate putanje drona.



Slika 26. Odstupanje između stvarne i izračunate putanje drona [44]

Zanošenje i pogreške sustava automatski se ispravljaju zatvaranjem petlje tako da se svakim ponovnim mapiranjem istog područja karta ispravlja te se povećava sveukupna točnost sustava. [44] Postupak zatvaranje petlje prikazan je na Slici 27.



Slika 27. Zatvaranje petlje [44]

Postupak mapiranja u zatvorenom prostoru kreće u jednom kutu okruženja (marker 1) koji je ujedno i kut karte. Zatim se prati kretanje drona do drugog kraja okruženja i na tom mjestu se postavlja marker 2. Na sljedećem mjestu postavlja se marker 3 te se petlja zatvara povratkom na startnu poziciju (marker 1). [44]

Linearna točnost ovisi o preciznosti triangulacije poznatih značajki i o [44]:

- kvaliteti kamera
- osvjetljenju okoline
- referencama stvarnoga okruženja
- dimenzijama karte
- kalibraciji kamera.

5. EKSPERIMENTALNI PRIMJER

Vizualna kontrola trupa zrakoplova u procesu konvencionalnog održavanja zrakoplova je tehnički zahtjevan, dugotrajan i skup postupak. Za pregled zrakoplova nužno je osigurati čeličnu konstrukciju oko cijelog trupa kako bi radnici mogli izvršiti kontrolni pregled. Osim logističke i tehničke zahtjevnosti, ovakav način je izuzetno ovisan o ljudskom faktoru, a samo jedan propust može dovesti do kobnog ishoda. Kako bi se ovaj proces održavanja olakšao, ubrzao te učinio sigurnijim i jeftinijim, konstantno se nastoje pronaći nova rješenja. Jedno moguće rješenje je i vizualna inspekcija pomoću dronova, koja je primijenjena u ovom radu.

5.1. Opis eksperimentalnog postava

Za eksperiment je korišten dron *Tello* proizvođača *Ryze Robotics* i softverski sustav *Matlab*. Eksperiment se odvijao u Laboratoriju za održavanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Zbog trenutne epidemiološke situacije eksperiment nije bilo moguće provesti u zrakoplovnoj tvrtki.

Dron *Tello* (prikazan na Slici 28.) je kvadrokopter dimenzija 98 x 92,5 x 41 mm. Ima ugrađen vizijski sustav, daljinomjer, barometar i LED indikator stanja. Upravljanje je moguće putem Wi-Fi mreže, mobilnom aplikacijom ili pomoću računala. Napaja se odvojitivim baterijama, a maksimalno trajanje leta mu iznosi 13 minuta. [45]



Slika 28. Dron *Tello* u letu

Ostale tehničke specifikacije drona *Tello* prikazane su u Tablici 3.

Tablica 3. Tehničke specifikacije drona *Tello* [45]

Težina (uključujući štitnike propelera)	87 g
Maksimalna brzina	8 m/s
Maksimalna duljina leta	100 m
Maksimalna visina leta	30 m
Temperaturni operativni raspon	0° do 40 °C
Frekvencijski operativni raspon	2.4 do 2.4835 GHz
Kamera	
Maksimalna veličina slike	2592 x 1936
Način snimanja videa	HD: 1280 x 720 30p
Video Format	MP4
Baterija	
Kapacitet	1100 mAh
Napon	3,8 V
Tip baterije	LiPo
Maksimalna snaga punjenja	10 W

Elementi eksperimenta prikazani su shemom na Slici 29.



Slika 29. Elementi eksperimenta

Objekt snimanja bile su fotografije dijelova zrakoplova preuzete s interneta [46] na koje su naknadno ucrtane greške. Fotografije „oštećenja“ prikazane su na Slici 30.



Slika 30. Fotografije oštećenja

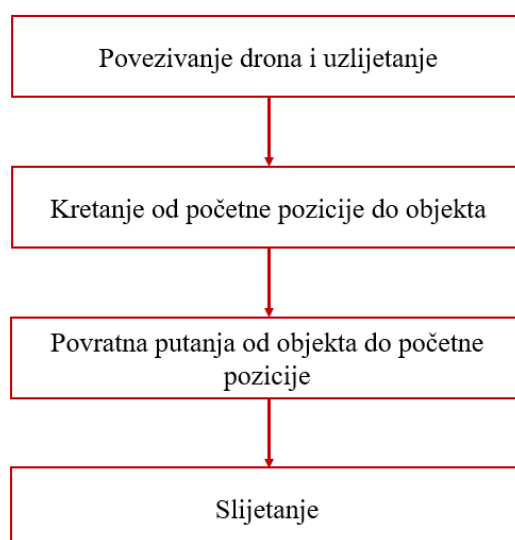
Na slici je vidljivo da su crnom bojom ucrtana „oštećenja“.

5.2. Navigacija drona i fotografiranje oštećenja

Dron se s početne pozicije pomoću *Matlab* koda navigirao do ploče na kojoj su bile zalijepljene fotografije dijelova trupa aviona koje su predstavljale objekt pregleda. Dron ih je trebao izbliza snimiti i poslati fotografije na prijenosno računalo te se istom putanjom vratiti nazad na početnu poziciju.

Ispitivanje se vršilo nekoliko desetaka puta s raznim koordinatama, a mjerenje udaljenosti vršilo se laserskim i običnim metrom.

Blok dijagram opisane putanje prikazan je na Slici 31., a kod putanje prikazan je u Prilogu II.



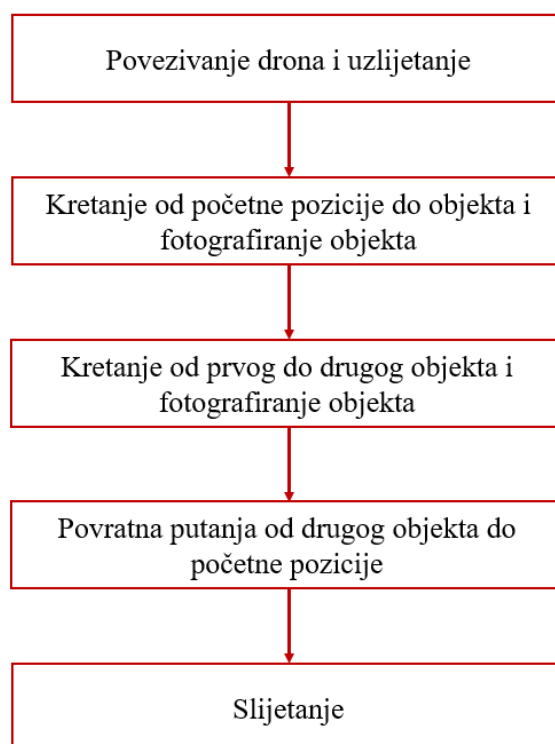
Slika 31. Blok dijagram putanje ispitivanja preciznosti

Ispitivanjem je utvrđeno da dron *Tello*, za ovu primjenu, nema dovoljno dobru preciznost i ponovljivost. Iako se dronom upravljalo pomoću programa *Matlab* u kojem se udaljenosti mogu točno odrediti, dron nije uvijek potpuno precizno izvršavao zadane naredbe, odnosno nije točno postizao zadane koordinate do kojih je trebao doći. Kako bi se smanjila mogućnost pogreške svako gibanje vršilo se pojedinačno po jednoj koordinatnoj osi, nakon svakog gibanja zadana je pauza za stabilizaciju te se gibanje vršilo najmanjom mogućom brzinom od 1 m/s. Jedan od ograničavajućih faktora je i to što je najmanja udaljenost koja se može zadati 0,2 m. Samo zanošenje nije konstantnog iznosa te nije bilo moguće odrediti točan iznos pogreške ni nakon niza ispitivanja.

S obzirom na to da zanošenje nije konstantnog iznosa, sama ponovljivost također nije dovoljno dobra za ovu primjenu. Jednakim zadanim parametrima, u jednakim uvjetima nisu dobivani jednaki rezultati.

Premda dron *Tello* nije namijenjen za profesionalnu primjenu, relativno uspješno je snimio fotografije i poslao ih na prijenosno računalo te je detekcija razlika u *Matlab*-u bila moguća.

Dron je pomoću vlastite kamere obavio vizualni pregled objekta. Blok dijagram kretanja drona prikazan je na Slici 32., a kod se nalazi u Prilogu III.

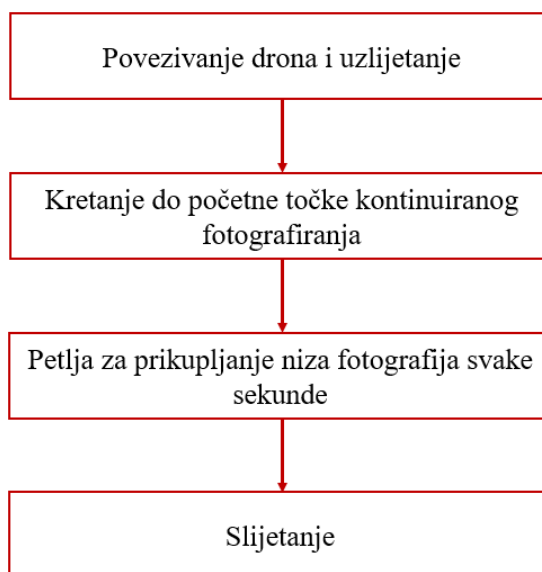


Slika 32. Kretanje drona od početne pozicije do objekata

Prema naredbama u *Matlab*-u dron se povezao i uzletio, zatim je stigao od početne pozicije do prvog objekta (fotografija prije oštećenja), fotografirao prvi objekt, otišao do drugog objekta (fotografija nakon oštećenja), fotografirao drugi objekt te se povratnom putanjom vratio do početne pozicije i sletio.

Zbog akumulacije grešaka zanošenja, navedeni kod se radi prikupljanja preciznijih snimki vršio u dva koraka. Prvo je snimljen jedan objekt (fotografija „prije oštećenja“) te se dron vratio na početnu poziciju. U drugom koraku je obavljen vizualni pregled objekta nakon oštećenja.

Osim vizualnog pregleda na točno određenoj poziciji, u stvarnoj primjeni moguće je i kontinuirano slanje podataka na računalo kao što prikazuje blok dijagram na Slici 33.

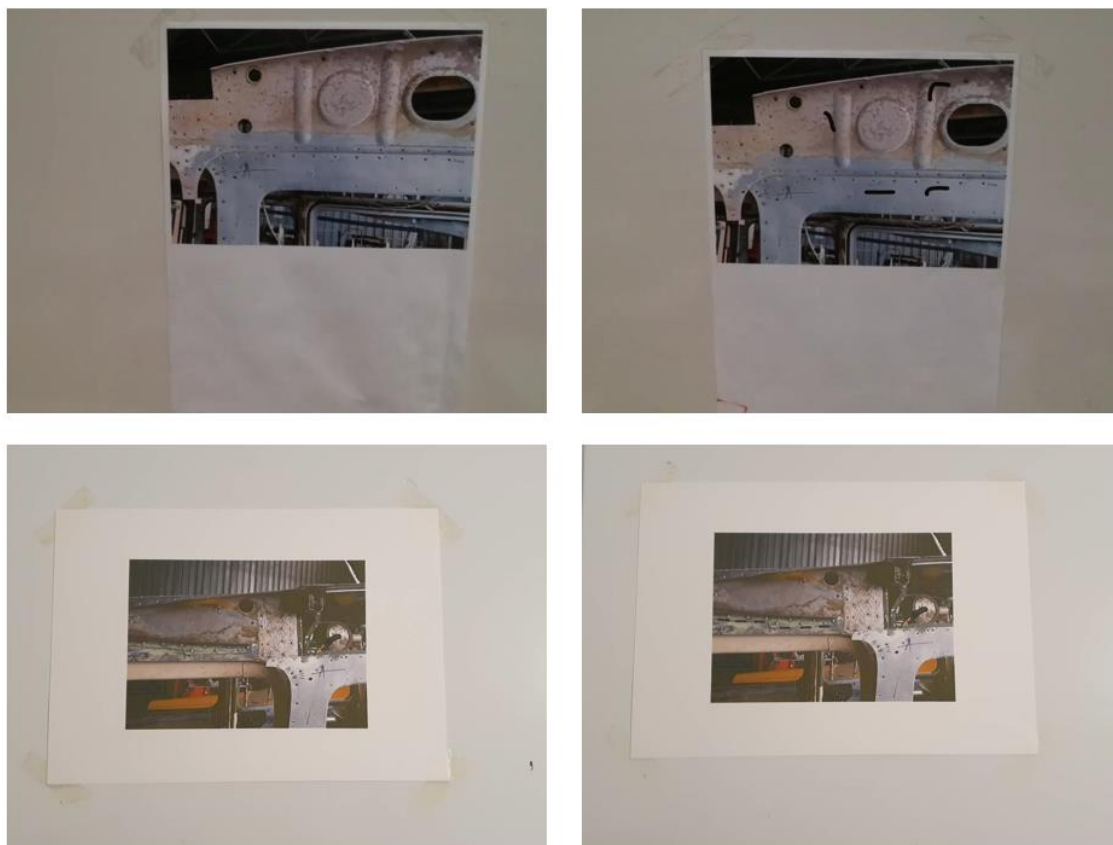


Slika 33. Kontinuirano fotografiranje

Dron je svaku sekundu kontinuirano snimao fotografije te ih spremao na prijenosno računalo. U ovom primjeru je snimljeno pet fotografija ($i = 5$). Kod je prikazan u Prilogu IV.

Budući da nije bilo moguće eksperiment provesti na stvarnom zrakoplovu, korištene su fotografije nekih dijelova trupa na kojima su ručno ucrtane određene greške.

Parovi fotografija prikazani su na Slici 34.



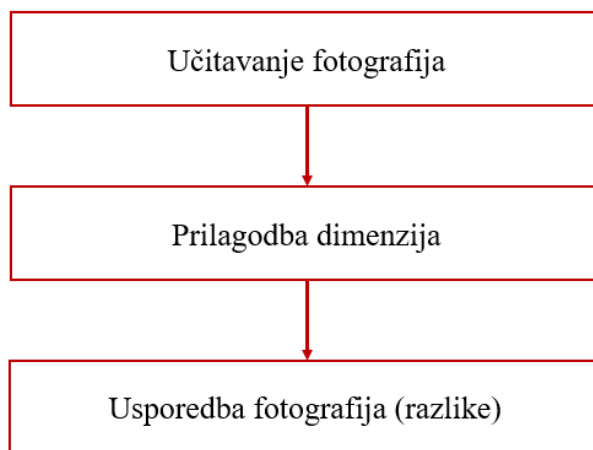
Slika 34. Fotografije prije i nakon greške

Iz slika je odmah vidljiv prethodno opisan pomak zbog netočnosti postizanja zadanih koordinata.

5.3. Računalno prepoznavanje oštećenja

Prikupljene fotografije trebaju se analizirati u programu *Matlab* kako bi se ustanovilo postoji li razlika između fotografije snimljene prije (bez oštećenja) i nakon oštećenja. Njihovom usporedbom trebaju se detektirati sve razlike na fotografijama te se na temelju rezultata analizirati eventualna oštećenja. Prvi način računalnog prepoznavanja oštećenja je izravnim preklapanjem fotografija prije i nakon oštećenja.

Pomoću koda u Prilogu V., moguća je detekcija razlika dvije fotografije. Blok dijagram usporedbe fotografija preklapanjem prikazan je na Slici 35.



Slika 35. Usporedba fotografija preklapanjem

Pomoću navedenog koda nije bilo moguće postići zadovoljavajuće rezultate. Iako su udaljenosti mjerenja - koordinate x (udaljenost startne pozicije i objekta) i z (visina letenja drona) bile potpuno jednake, dron nije precizno pratio zadanu putanju te je prilikom svakog pokušaja imao različito zanošenje. S obzirom na to da je ova usporedba provedena direktnim preklapanjem, a dimenzijska odstupanja nisu zanemariva, usporedbom fotografija na ovaj način nije moguće dobiti zadovoljavajuće rezultate. Identični elementi fotografije detektirani su kao različiti zbog odstupanja, a samim time i cjelokupnog pomaka na fotografijama.

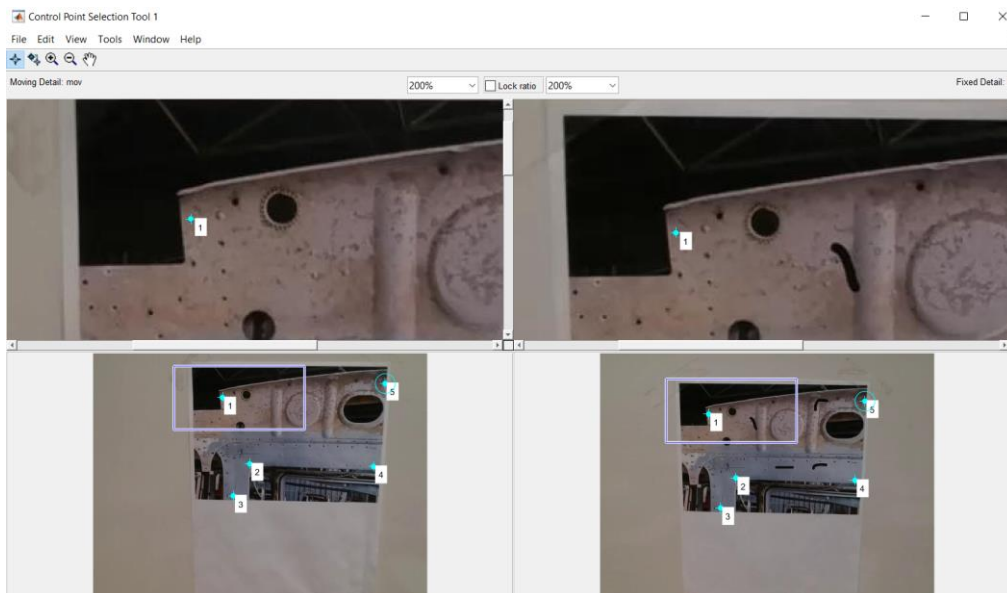
Budući da preklapanjem nije postignut željeni rezultat, provedena je usporedba fotografija pomoću fiksnih točaka, a blok dijagram postupka je prikazan na Slici 36. Kod se nalazi u Prilogu VI.



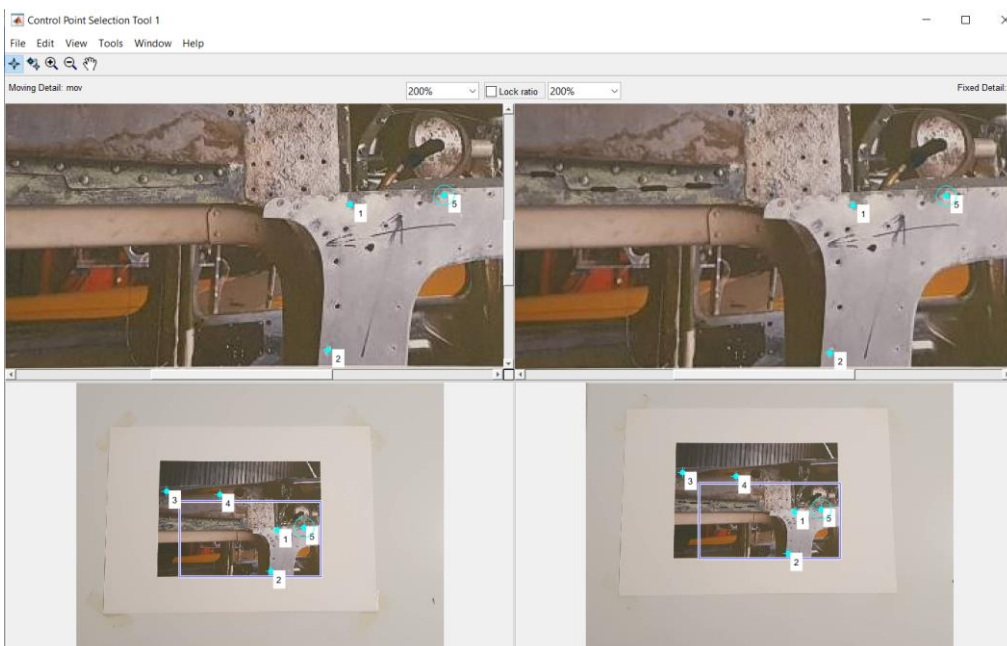
Slika 36. Blok dijagram usporedbe fotografija pomoću fiksnih točaka

Iz dijagrama je vidljivo da se nakon dohvaćanja obje fotografije (prije i nakon oštećenja) kreirala referentna fotografija te su na obje slike postavljene fiksne točke pomoću kojih se odstupanje pomaka značajno smanjuje budući da se fotografije povezuju pomoću postavljenih fiksnih točaka, a ne direktnim preklapanjem.

Pomoću fiksnih točaka ostvarena je uspješna detekcija grešaka, a povezivanje fiksnih točaka prikazano je na Slici 37.



a) prvi par



b) drugi par

Slika 37. Usporedba fotografija pomoću fiksnih točaka

Rezultati usporedbe za oba slučaja prikazani su na Slici 38.



a) prvi par



b) drugi par

Slika 38. Greške detektirane usporedbom fotografija pomoću fiksnih točaka

5.4. Analiza rezultata

Provedeno istraživanje koje je obavljeno uz minimalna financijska ulaganja pokazalo je da se vizualna kontrola oštećenja vanjskog trupa u procesu održavanja putničkih zrakoplova može izvoditi pomoću drona uz programsku podršku *Matlab*-a. Dron *Tello* je pri izvođenju eksperimenta pokazao niz problema kao što su: nedovoljna preciznost i ponovljivost, odnosno zanošenje i povremeni problemi s gubitkom komunikacije između drona i prijenosnog računala zbog interferencije signala bežičnih mreža. Unatoč tome, pomoću fotografija koje je dron snimio i poslao, u programu *Matlab* uspješno su detektirane razlike, tj. greške između ponovljenih snimki.

Dron zbog gore navedenih nedostataka nije najadekvatniji za pregled trupa zrakoplova jer se njime ne bi postigla potrebna pouzdanost i kvaliteta u obavljanju ovog zahtjevnog postupka održavanja.

Iako je primarni cilj eksperimenta bio analizirati mogućnost prikupljanja podataka, odnosno fotografiranja dijelova objekta i evaluacija točnosti, svakako bi za primjenu dronova trebalo razviti aplikacije, konvolucijske neuronske mreže (eng. *Convolutional Neural Network-CNN*) ili neko drugo softversko rješenje koje bi u fokusu imalo prepoznavanje značajki snimljenog objekta te korelaciju istih značajki na različitim fotografijama. Uz vizijski sustav, ovo rješenje bi trebalo implementirati u kombinaciji s bazom podataka o prethodnim stanjima i dodatnim informacijama o najčešćim oštećenjima.

Provedeno istraživanje pokazalo je da bi se, uz malo veća financijska ulaganja u kvalitetnije dronove, softverske nadogradnje i usavršavanja inženjera koji bi ovom metodom provodili kontrolu vanjskog oštećenja trupa zrakoplova, ovaj postupak održavanja mogao znatno unaprijediti u odnosu na konvencionalne načine koji se najčešće primjenjuju.

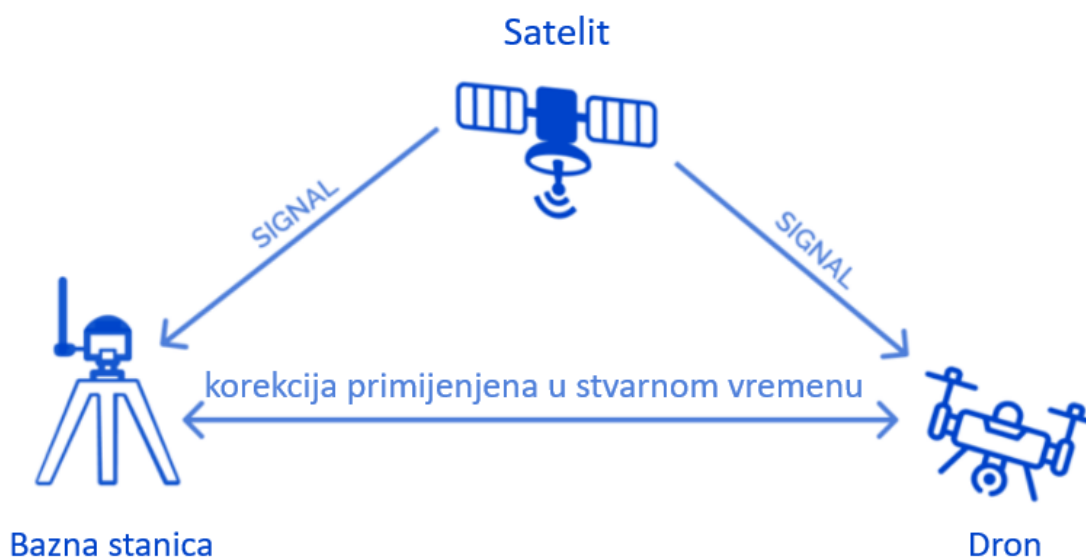
5.5. Smjernice za daljnje istraživanje

Uspješnost vizualnog pregleda zrakoplova, a time i cjelokupnog postupka održavanja značajno je ovisna o točnosti pozicioniranja drona koja je direktno vezana na same specifikacije drona, ali i mogućnost ostvarivanja i prijenosa podataka između drona, prijenosnog računala i promatranog zrakoplova. Bolje pozicioniranje ne postiže se samo korištenjem tehnološki naprednijih dronova čija je cijena visoka, nego i potpunom promjenom načina ostvarivanja komunikacije između elemenata.

Značajan napredak u tom pogledu moglo bi predstavljati RTK i PPK snimanje dronom.

Kinematika u stvarnom vremenu (eng. *Real-Time Kinematic* - RTK) je tehnika za satelitsko pozicioniranje gdje se informacije o globalnoj lokaciji primaju putem globalnog navigacijskog satelitskog sustava (eng. *Global Navigation Satellite System* - GNSS), a najčešće korišteni satelitski sustav je GPS. Točnost GPS-a, kao što je navedeno u 4. poglavlju, značajno ovisi o nesmetanom vidokrugu prema satelitima te se mogu javiti pogreške pri utvrđivanju pozicije zbog nepovoljnih atmosferskih uvjeta, kašnjenja i višestrukog puta signala. Stoga se uz GNSS prijamnik koristi i zemaljska bazna stanica postavljena na poznatu poziciju koja slanjem korekcijskog signala poboljšava točnost. Dron ima ugrađen RTK prijamnik koji prikuplja podatke sa satelita i zemaljske bazne stanice kako bi u stvarnom vremenu prilikom leta što točnije ispravio lokaciju slike.

Za prikupljanje GPS informacija i geografskih oznaka za svaku sliku snimljenu tijekom leta nužno je da je dron povezan sa zemaljskom baznom stanicom dok prikuplja podatke. [47] Shema povezivanja drona sa satelitom i baznom stanicom prikazana je na Slici 39.



Slika 39. RTK snimanje dronom [48]

Iz slike je vidljivo da je RTK prijamnik na dronu konstantno povezan s GNSS satelitom i sa zemaljskom baznom stanicom kako bi se pozicija korigirala u stvarnom vremenu.

Prednosti RTK satelitskog pozicioniranja su [49][50]:

- poboljšana točnost : RTK sustav nudi daleko bolju točnost pozicioniranja – mjerenu u centimetrima, u usporedbi samo sa satelitskim podacima

- ispravke u stvarnom vremenu: RTK automatski ispravlja pogreške
- manje zemaljskih kontrolnih točaka (eng. *Ground Control Points* - GCP): zbog postojanja bazne stanice, GCP koje se dugotrajno postavljaju nisu potrebne

Nedostaci RTK satelitskog pozicioniranja su [49][50]:

- Da bi se postigla željena točnost, RTK dron mora ostati povezan s baznom stanicom dok prikuplja podatke.
- Zbog letenja iza prepreka, tijekom okretanja ili zbog neujednačenog i slabog signala može doći do smetnji u komunikaciji između drona i bazne stanice te podaci u tom vremenu mogu biti nepouzdana dok se ponovo ne uspostavi kvalitetan signal između drona i bazne stanice.
- Budući da je potrebna stabilna veza između GNSS satelitske stanice, drona i bazne stanice, što uključuje nekoliko različitih tehnologija, veća je vjerojatnost pojave problema vezanih uz neku od njih.
- Zbog prekida konekcije može doći do gubitka podataka.
- Područje leta ograničeno je jačinom signala.
- Ispravljanje pogrešaka nakon leta smanjuje prednost u stvarnom vremenu.

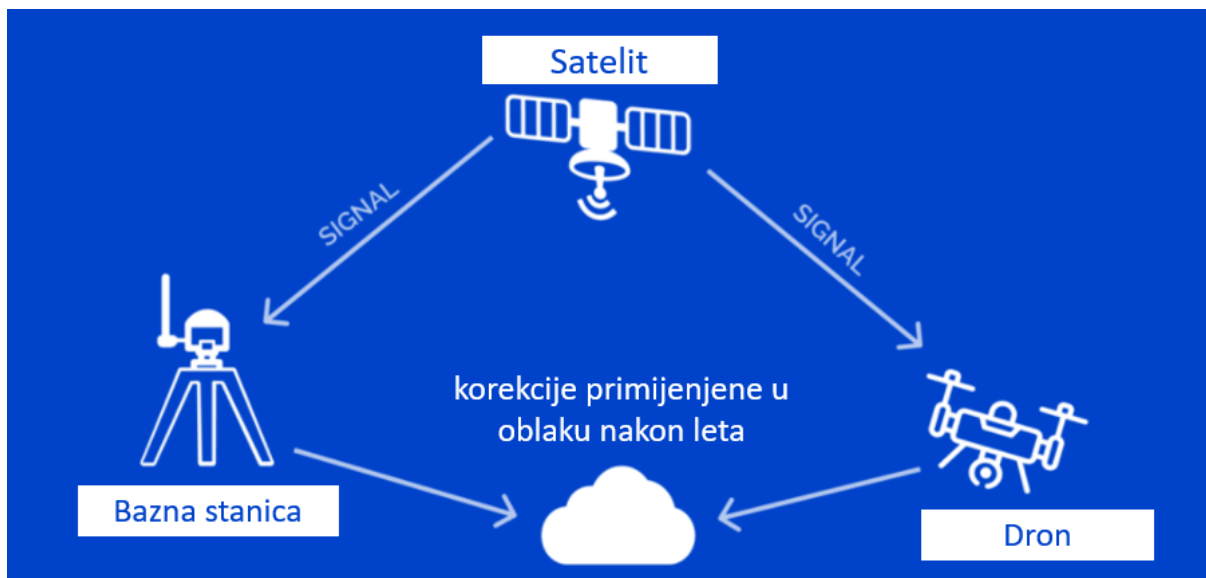
Za razliku od RTK, kinematika naknadne obrade (eng. *Post processed Kinematic* - PPK) podatke bazne stanice obrađuje, kao što i sam naziv kaže, naknadno, odnosno nakon letenja.

U PPK satelitskom pozicioniranju, dron povezuje koordinate X, Y i Z sa svakom slikom na temelju svoje ugrađene GPS jedinice. Bazna jedinica također bilježi informacije o lokaciji, ali s puno većom preciznošću.

Dvije jedinice rade odvojeno tijekom leta, tako da se aktivna veza između drona i zemaljske baze za prikupljanje podataka ne mora održavati.

Nakon završetka leta, dva seta GPS podataka međusobno se uparuju pomoću vremenskih oznaka slike. Ugrađeni GPS podaci drona ispravljaju se točnijom baznom jedinicom, dajući precizne geografske oznake za slikovne podatke. [49]

Shema povezivanja drona, satelita i bazne stanice prikazana je na Slici 40.



Slika 40. PPK snimanje dronom [48]

Prednosti PPK su [49][50]:

- GNSS bazna stanica ne mora biti povezana sa zemaljskom stanicom drona.
- Postavljanje je puno jednostavnije.
- Uklanja potrebu za GCP-ovima.
- U usporedbi s RTK i GCP ostvaruje se veća ušteda vremena jer je manje vremena potrebno za pripremu.
- PPK je pouzdaniji od RTK-a jer ne ovisi o jačini signala.
- Omogućena je veća fleksibilnost tijekom leta.

Nedostaci PPK [50]:

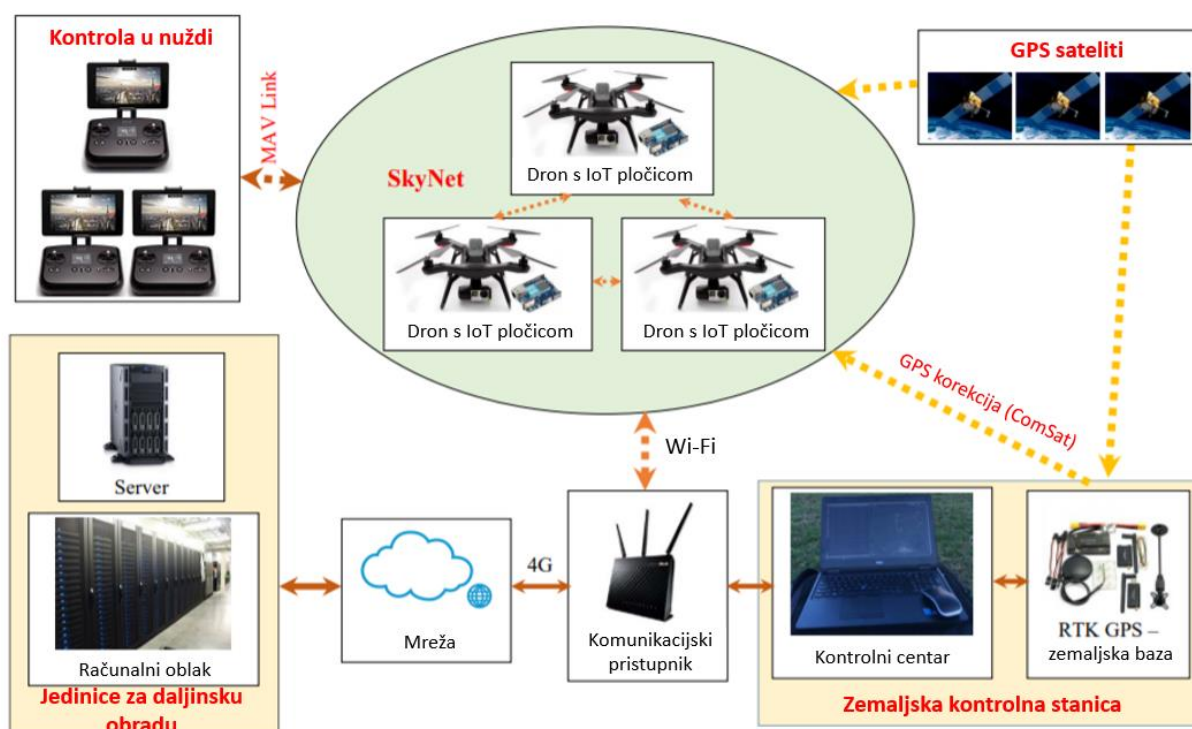
- Korekcija podataka se događa tek nakon leta.
- Tehnologija je nova pa nije u potpunosti usavršena.

Premda bi se RTK obrada podataka trebala odvijati brže jer se podaci ispravljaju u stvarnom vremenu, zbog veza o kojima ovaj postupak ovisi, to često nije tako. Događa se da veze oslabe ili se prekinu pa se puno vremena izgubi za njihovu ponovnu uspostavu. Nasuprot tome, PPK treba dodatno vrijeme za obradu podataka, ali je ono daleko manje od vremena potrebnog za ponovnu uspostavu veze u slučaju RTK.

Jedna od mogućnosti primjene tehnologije dronova pri površinskom pregledu vanjskih dijelova zrakoplova je i koordinacija većeg broja dronova u specifičnim formacijama koji bi istovremeno vršili pregled objekta. Komunikacijska platforma za prijenos podataka pri

ovakvom obliku održavanja temeljila bi se na internetu stvari (eng. *Internet of Things* - IoT) gdje bi komunikacijske veze s IoT bile ugrađene u svaki dron, a prikupljeni podaci bi se u stvarnom vremenu prenosili na računalo. Koordinacijom dronova u skupini postigla bi se daleko veća vremenska učinkovitost jer bi svi uključeni dronovi imali kodiranu svoju putanju po kojoj bi vršili pregled određenog dijela površine zrakoplova, a rezultati njihovih pregleda bi se sumirali. Da bi se takvo obavljanje vizualnog pregleda objekta kao što je zrakoplov moglo učinkovito izvoditi, potrebno je vrlo precizno planirati i sinkronizirati putanju i obradu podataka svakog pojedinog drona i svih njih međusobno. Za to je potrebna homogena komunikacijska platforma koja bi omogućila integriranje svih komponenti kontrolnog sustava i njihovu suradnju u stvarnom vremenu. [51]

Shema strukture prijenosa podataka prikazana je na Slici 41.



Slika 41. Struktura prijenosa podataka [51]

Svaka IoT pločica koja je ugrađena u dron uključuje mikrokontroler i procesor pomoću kojeg se povezuje na Wi-Fi mrežu te putem instaliranog Linux sustava obrađuje podatke. Mikrokontroler omogućuje uređajima rad s drugim hardverskim sučeljima. Tako funkcioniraju kao pametni uređaji. [51]

6. ZAKLJUČAK

Razvojem moderne tehnologije i Industrije 4.0 sve se više upotrebljavaju pametni sustavi kojima se različiti procesi u proizvodnji i održavanju nastoje ubrzati i pojednostiniti.

Danas se sve češće koriste dronovi koji su sposobni obavljati vrlo široki spektar različitih zadataka iz područja transporta, snimanja, mapiranja i prikupljanja podataka iz zraka. Pokazali su se kao izuzetan alat za vizualni pregled, posebno nepristupačnih terena, poljoprivrednih zemljišta, gradilišta, velikih postrojenja, skladišta i drugih objekata. Budući da se njima upravlja na daljinu, mogu se primijeniti tamo gdje bi za ljude moglo biti opasno ili štetno za zdravlje. Usavršavanjem navigacijske tehnologije i njenom implementacijom u koncept samodostatnih dronova s umjetnom inteligencijom, očekuje se da će dronovi sve više izvršavati zahtjevne zadatke radnika na održavanju.

Sukladno tome, nove tehnologije nastoje se implementirati i u sustav održavanja zrakoplova kod kojeg pojedine postupke održavanja, kao što je vizualni pregled trupa zrakoplova, još uvijek najčešće izvode educirani stručnjaci održavanja bez velike primjene napredne tehnologije. Taj postupak održavanja izuzetno je mukotrpan, zahtjevan i dugotrajan te stavlja veliki psihološki pritisak na ljude koji ga provode, budući da i najmanji propust može imati za posljedicu ozbiljnija oštećenja koja mogu dovesti do pada zrakoplova i gubitka ljudskih života. Zbog toga se očekuje da bi u budućnosti dio njihovog posla, posebno u vizualnom pregledu trupa zrakoplova, mogli preuzeti dronovi te time značajno unaprijediti sveukupno održavanje zrakoplova.

U ovom radu se kroz provedeni eksperiment simulirao vizualni pregled trupa zrakoplova pomoću drona *Tello*, prijenosnog računala, fotografija koje su predstavljale objekt pregleda i programa *Matlab*.

Budući da su se pri izvođenju eksperimenta pokazali problemi preciznosti i ponovljivosti drona te povremeni prekidi komunikacije između drona i računala zbog interferencije signala bežičnih mreža, oštećenja nisu uspješno detektirana direktnom metodom. Oštećenja su uspješno detektirana usporedbom fotografija pomoću fiksnih točaka.

Zaključeno je da se dronovi mogu koristiti za vizualni pregled trupa zrakoplova i da bi ovaj model vizualnog pregleda trebalo nastaviti razvijati.

Za daljnji razvoj preporučuje se primjena RTK tehnologije za rješavanje problema netočnosti pozicioniranja drona i prepoznavanje oštećenja primjenom konvolucijskih neuronskih mreža.

LITERATURA

- [1] Varaprasada Rao, M., Chaitanya, M., Vidhu, K. Aircraft Servicing, Maintenance, Repair & Overhaul – the changed Scenarios through Outsourcing: IJREAS; 2017., p. 249-270.
- [2] Samaranayake, P. Current Practices and Problem Areas in Aircraft Maintenance Planning and Scheduling – Interfaced/Integrated System Perspective: Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2006
- [3] Hobbs, A. Aircraft Maintenance and Inspection: https://www.researchgate.net/publication/352667177_AIRCRAFT_MAINTENANCE_AND_INSPECTION, Pristupljeno: 7. listopada 2021.
- [4] Aircraft Maintenance Checks: <https://www.aircraftengineer.info/aircraft-maintenance-checks/#gsc.tab=0>, Pristupljeno: 7. listopada 2021.
- [5] Albakkoush, S., Pagone, E., Salonitis, K. Scheduling Challenges within Maintenance Repair and Overhaul Operations in the Civil Aviation Sector: 9th International Conference on Through-life Engineering Service; 2020.
- [6] Papa, U., Ponte, S. Preliminary Design of an Unmanned Aircraft System for Aircraft General Visual Inspection. In MDPI – Electronics; 2018.
- [7] Repairs on high: engineering innovation in aircraft maintenance: <https://www.theengineer.co.uk/repairs-on-high-engineering-innovation-in-aircraft-maintenance/>, Pristupljeno: 10. listopada 2021.
- [8] Aircraft Lightning Strike Inspection: <https://mainblades.com/lightning-strike-inspection/>, Pristupljeno: 12. listopada 2021.
- [9] Airbus - Hangar of the future: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/12/Hangar-of-the-future.html>, Pristupljeno: 13. listopada 2021.
- [10] Future-Watch, China's Drone Ecosystem Update: <https://www.slideshare.net/futurewatch/future-watch-chinas-drone-ecosystem-update>, Pristupljeno: 13. listopada 2021.
- [11] Future PLC, Drones – The Complete Manual. 10th ed.; 2021.
- [12] Commercial Drones are Taking Off: <https://earlymetrics.com/trailblazer-qa-delairs-on-new-drone-data-solutions/>, Pristupljeno: 14. listopada 2021.

- [13] Erceg, A., Činčurak Erceg, B., Vasilj, A. Unmanned Aircraft Systems in Logistics – Legal Regulation and Worldwide Examples Toward Use in Croatia. Proceedings of the 17th International Scientific Conference - Business Logistics in Modern Management: Osijek, 2017.
- [14] Sturm, J. Autonomous Navigation for Flying Robots: https://jsturm.de/publications/data/lecture_1_part_3.pdf, Pristupljeno: 15. listopada 2021.
- [15] Flying principle of quad rotor: <https://www.semanticscholar.org/paper/Precision-aquaculture-drone-algorithm-for-delivery-Reshma-Kumar/f03b03acc167a17bc3becd85b89c3b19cfbe0d85>, Pristupljeno: 16. listopada 2021.
- [16] Tello, User Manual v1.4, 2018.: <https://dl-cdn.ryzero.com/downloads/Tello/Tello%20User%20Manual%20v1.4.pdf>, Pristupljeno: 18. listopada 2021.
- [17] Drone Components And What They Do: <https://grinddrone.com/drone-features/drone-components>, Pristupljeno: 18. listopada 2021.
- [18] Dudek G., Jenkin, M. Inertial Sensors, GPS, and Odometry. In Handbook of Robotics, Springer; 2008., p. 477-490.
- [19] Stepanić, J. Zrakoplovni instrumenti za navigaciju. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [20] Sturm, J. Autonomous Navigation for Flying Robots: https://jsturm.de/publications/data/lecture_3_part_2.pdf, Pristupljeno: 19. listopada 2021.
- [21] Gyroscope components and gyroscopic precession: https://www.researchgate.net/figure/Gyroscope-components-and-gyroscopic-precession_fig1_335420126, Pristupljeno: 19. listopada 2021.
- [22] Gabriel, K., Jarvis, J., Trimmer, W. Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics: Report of the Workshop on Microelectromechanical System Research
- [23] Dadafshar, M. Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing, and Applications: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5830.pdf>, Pristupljeno: 20. listopada 2021.

- [24] Quan, Q. Sensor Calibration and Measurement Model. In Introduction to Multicopter Design and Control, 2017., p. 147-172.
- [25] Lapaine, M., Lapaine, M., Tutić, D.: https://www.kartografija.hr/old_hkd/obrazovanje/prirucnici/gpspoc/gpspoc.htm, Pristupljeno 21. listopada 2021.
- [26] NASA, Autonomous Positioning and Navigation Network
- [27] Fraden, J. Ultrasonic Sensors. In Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications, Springer; p. 286-289.
- [28] Gageik, N., Müller, T., Montenegro, S. Obstacle Detection and Collision Avoidance using Ultrasonic Distance Sensors for an Autonomous Quadcopter
- [29] The drone LiDAR operation principle: <https://www.onyxscan-lidar.com/the-drone-lidar-operation-principle/>, Pristupljeno: 21. listopada 2021.
- [30] LiDAR Sensors, Simplified: Part 1 - LiDAR System Point Density, Returns and Beam Divergence: <https://geodetics.com/lidar-sensors-simplified/>, Pristupljeno: 21. listopada 2021.
- [31] Galtarossa, L., Navilli, L. F., Chiaberge, M. Visual-Inertial Indoor Navigation Systems and Algorithms for UAV Inspection Vehicles: IntechOpen; 2019.
- [32] Macoir, N., Bauwens, J., Van Herbruggen, B., Rossey, J., Hoebeke, J., De Poorter, E. UWB Localization with Battery-Powered Wireless Backbone for Drone-Based Inventory Management: MDPI – Sensors; 2018.
- [33] Design of an UWB Indoor-Positioning System: <https://www.kn.e-technik.tu-dortmund.de/.cni-bibliography/cnidoc/Tiemann2015.pdf>, Pristupljeno: 22. listopada 2021.
- [34] Guo, K., Qiu, Z., Miao, C., Zaini, A. H., Chen, C., Meng, W., Xie, L. Ultra-Wideband-Based Localization for Quadcopter Navigation: https://www.researchgate.net/publication/295099834_Ultra-Wideband-Based_Localization_for_Quadcopter_Navigation, Pristupljeno: 22. listopada 2021.
- [35] Yousif, K., Bab-Hadiashar, A., Hoseinnezhad, R. An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics: Springer; 2015., p. 289-311.
- [36] Aasish, C., Ranjitha, E., Razeen Ridhwan, U., Bharath Raj, S., Angelin Jemi, L. Navigation of UAV without GPS. In International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems; 2015.

- [37] Strydom, R., Thurrowgood, S., Srinivasan, M. V. Visual Odometry: Autonomous UAV Navigation using Optic Flow and Stereo. In Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation; 2014.
- [38] Adu-Boahen, N., Hayfron-Acquah, J. B., Panford, J. K. Optical Flow For Robot Navigation. In International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS); 2017.
- [39] Durrant-Whyte, H., Bailey, T. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I - The Essential Algorithms. In IEEE; 2006., p. 99-110.
- [40] Stachniss, C., Leonard, J. J., Thrun, S. Simultaneous Localization and Mapping. In Handbook of Robotics: Springer; 2016, p. 1153-1175.
- [41] Riisgaard, S., Blas, M. R. SLAM for Dummies - A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/119149/16-412j-spring-2005/contents/projects/1aslam_blas_repo.pdf, Pristupljeno: 25. listopada 2021.
- [42] Thrun, S., Montemerlo, M., Koller, D., Wegbreit, B., Nieto, J., Nebot, E. FastSLAM: An Efficient Solution to the Simultaneous Localization And Mapping Problem with Unknown Data Association. In Journal of Machine Learning Research; 2004.
- [43] Tiemann, J., Ramsey, A., Wietfeld, C. Enhanced UAV Indoor Navigation through SLAM-Augmented UWB Localization. In IEEE; 2015.
- [44] Dragonfly: <https://dragonflycv.com/>, Pristupljeno: 26. listopada 2021.
- [45] Tello: <https://www.ryzerobotics.com/tello/specs>, Pristupljeno: 27. listopada 2021.
- [46] Slike: <https://roeschaviation.co.za/corrosion-treatment/>, Pristupljeno: 9. listopada 2021.
- [47] Why RTK Hardware is Here to Stay: <https://enterprise-insights.dji.com/blog/rtk-real-time-kinematics>; Pristupljeno: 11. studeni 2021.
- [48] PPK vs RTK: <https://landsurveyorsunited.com/photo/ppk-vs-rtk>, Pristupljeno: 11. studeni 2021.
- [49] What's the difference between PPK and RTK drones, and which one is better?: <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones/>, Pristupljeno: 11. studeni 2021.
- [50] GCPs vs RTK vs PPK: When to Use What and Why: <https://www.sensefly.com/blog/gcps-rtk-ppk-when-what-why/>, Pristupljeno: 12. studeni 2021.
- [51] Hoang, V. T., Phung, M. D., Dinh, T. H., Ha, Q. P. System Architecture for Real-Time Surface Inspection Using Multiple UAVs. In IEEE ; 2020.

PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Putanja ispitivanja preciznosti
- III. Kretanje drona od početne pozicije do objekata
- IV. Kontinuirano fotografiranje
- V. Usporedba fotografija preklapanjem
- VI. Usporedba fotografija pomoću fiksnih točaka

Prilog II.

Putanja ispitivanja preciznosti

```
clc
clear all;
%% Povezivanje drona
droneObj = ryze();
cameraObj = camera(droneObj);
%% Kretanje drona od početne pozicije do objekta
takeoff(droneObj);
preview(cameraObj);
move(droneObj, [0 0 -1.1], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [1.8 0 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [0 -0.4 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
%% Povratna putanja
move(droneObj, [0 0 1.1], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [-1.8 0 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [0 0.4 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
land(droneObj);
```

Prilog III.

Kretanje drona od početne pozicije do objekata

```
clc
clear all;
%% Povezivanje drona
droneObj = ryze();
cameraObj = camera(droneObj);
%% Kretanje drona od početne pozicije do objekta
takeoff(droneObj);
preview(cameraObj);
move(droneObj, [0 0 -1.1], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [1.8 0 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [0 -0.4 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
frame = snapshot(cameraObj);
imshow(frame)
imwrite(frame, 'C:\Users\M\Desktop\Slika1.jpg');
%% Kretanje od prvog do drugog objekta
move(droneObj, [0 0.6 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
frame = snapshot(cameraObj);
imshow(frame)
imwrite(frame, 'C:\Users\M\Desktop\Slika2.jpg');
%% Povratna putanja
move(droneObj, [0 0 1.1], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [-1.8 0 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
move(droneObj, [0 -0.2 0], 'Speed', 0.1);
pause(3)
land(droneObj);
```

Prilog IV.

Kontinuirano fotografiranje

```
clc
clear all;
%% Povezivanje drona
droneObj = ryze();
cameraObj = camera(droneObj);
%% Kretanje drona
takeoff(droneObj);
preview(cameraObj);
move(droneObj,[1.5 0.4 -1.1], 'Speed',0.1); %kretanje do
početne točke kontinuiranog fotografiranja
ImageFolder = 'C:\Users\M\Documents\MATLAB_slike';
for i=1:5 % petlja za prikupljanje 5 fotografija
    img = snapshot(cameraObj);
    file_name = sprintf('Slika%d.jpg', i);% niz slika
    fullFileName = fullfile(ImageFolder, file_name);
    imwrite(img,file_name, 'jpg')
    pause(1);
    imshow(img) % prikaz slike svake sekunde
    imgName = [ImageFolder, '\Slika_', num2str(i), '.jpg'] ;
    imwrite(img, imgName);
end
land(droneObj);
```

Prilog V.

Usporedba fotografija preklapanjem

```
clc
clear all
close all
%% Učitavanje slika
x=imread('C:\Users\M\Pictures\slika35.jpg');
y=imread('C:\Users\M\Pictures\slika42.jpg');
%% Prilagodba dimenzija i rezultat
g=size(x);
y=imresize(y,[g(1),g(2)]);
figure;
imshow(x);
title('Slika bez greške');
figure;
imshow(y);
title('Slika s greškom');
figure;
imshow(x-y);
title('Razlika slika');
imwrite(x-y,'C:\Users\M\Pictures\Razlika.jpg');
```

Prilog VI.

Usporedba fotografija pomoću fiksnih točaka

```
clc;
close all;
clear all;
%% Dohvaćanje slike
a=imgetfile();
b=imgetfile();
mov=imread(a);
fix=imread(b);
h=imref2d(size(fix));
%% Kreiranje referentne slike
z=cpselect(mov,fix);
tform=fitgeotrans(movingPoints, fixedPoints, 'affine');
ref=imwarp(mov,tform,'OutputView',h);
diff=ref-fix;
%% Rezultat
figure,imshow(diff);
imwrite(diff,'C:\Users\M\Documents\Razlika.jpg');
```