

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

Mladi raziskovalci za razvoj Šaleške doline

RAZISKOVALNA NALOGA
AVTONOMEN DRON ZA DOSTAVO HRANE
Tematsko področje: Tehnika

Avtor:
Dejan Mežnarc, 2. letnik – Tehnik mehatronike

Mentorja:
Uroš Remenih, inž.
Samo Železnik

Velenje, februar 2020

Raziskovalna naloga je bila opravljena na ŠCV Velenje, Elektro in računalniški šoli, 2020.

Mentorja: Uroš Remenih, inž.,

Samo Železnik, inž.

Datum predstavitve: marec 2020

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠC Velenje, šolsko leto 2019/2020

KG avtonomno vozilo / dron / regulacije / dostava hrane

AV MEŽNARC, Dejan

SA REMENIH, Uroš / ŽELEZNIK, Samo

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

ZA ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola

LI 2020

IN AVTONOMEN DRON ZA DOSTAVO HRANE

TD Raziskovalna naloga

IJ SL

JI sl/en

AI: Cilj raziskovalne naloge je ugotoviti, ali je uporaba lastno izdelanega drona primerna za dostavo hrane na dom. V sklopu naloge želim ugotoviti, ali je dron na različnih terenih časovno in ekonomsko konkurenčen dostavi hrane z avtomobilom. Za te potrebe in zaradi cenovnih ter razširitvenih vidikov se odločim izdelati dron v lastni izvedbi. S praktičnimi poskusi ugotovim nosilnost in čas dostave za opredeljena načina dostave na določene lokacije. Stroške ocenim s pomočjo raziskave na internetu. V nalogi ugotovim, da lahko dron brez težav dvigne eno porcijo hrane (okoli 400 gramov), da je doseg drona odvisen od mase porcije hrane in da je v nekaterih okoljih dron hitrejši od osebnega vozila in mu cenovno konkurenčen.

KEYWORD DOCUMENTATION

ND ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, 2019

CX autonomous viachle / drone / regulation / food delivery

AU MEŽNARC, Dejan

AA REMENIH, Uroš / ŽELEZNIK, Samo

PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

PB ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, 2019

PY 2020

TI **AUTONOMOUS DRONE FOR FOOD DELIVERY**

TR Research work

LA SL

AL sl/en

AB The objective of the research paper is to determine whether the use of a self-made drone is suitable for the delivery of food to the home. In the context of the paper, I want to find out if the drone on different terrains is timely and economically competitive with food delivery by car. For these needs, and because of the price and future scaling aspects, I decide to make the drone myself. With practical experiments, I find out the carrying capacity and delivery times for defined delivery methods to specific locations. I estimate the costs through research on the Internet. I find out that the drone can easily lift one food portion (about 400 grams), that the reach of the drone depends on the weight of the food portion, and that in urban areas the drone is faster and more price competitive than a personal vehicle.

ZAHVALA

Zahvaljujem se Sonji Lubej, prof., za lektoriranje raziskovalne naloge.

KAZALO

KAZALO SLIK.....	VIII
KAZALO TABEL.....	IX
KAZALO GRAFIKONOV	IX
1 Uvod	1
1.1 Ideja naloge.....	1
1.2 Hipoteze	1
2 Teoretični del.....	2
2.1 Vrste dronov	2
2.2 Raziskava trga.....	4
2.2.1 Kaj ponuja trg	4
2.2.2 Cene, doomet in nosilnost	4
2.2.3 Problem dograjevanja lastnih funkcij	4
2.3 Teoretične osnove krmiljenja drona.....	5
2.3.1 Osi vrtenja	5
2.3.2 Idealna lega drona.....	5
2.3.3 Kontroliranje nagiba, naklona in odklona	5
2.3.4 PID-zanka	6
2.3.5 Premikanje drona po prostoru.....	8
2.3.6 Pravni vidik	10
3 Praktični del.....	11
3.1 Izdelava lastnega drona.....	11
3.1.1 Idejna zasnova	11
3.1.2 Določitev modelov komponent in nakup.....	12
3.1.3 Izdelava ogrodja	15
3.1.4 Izdelava tiskanega vezja	15

3.1.5	Pritrditev motorjev in elektronike.....	16
3.1.6	Programiranje	17
3.1.7	Testiranje ene osi	18
3.1.8	Daljinec.....	18
3.1.9	Težave in rešitve med izdelavo	19
3.2	Test potiska motorja.....	20
3.3	Merjenje časa dostave	20
3.3.1	Določitev ciljev	20
4	Rezultati.....	22
4.1	Dron lahko dvigne eno porcijo hrane.....	22
4.2	Dron je hitrejši od osebnega vozila.....	23
4.3	Dostava s popolnoma avtonomnim dronom je cenejša.....	24
4.3.1	Cena dostave z dronom.....	24
4.3.2	Cena dostave z avtomobilom.....	24
4.3.3	Primerjava cen	25
5	Razprava	26
5.1	Pravni vidik.....	26
5.2	Primerjava s osebnim vozilom.....	26
5.3	Nadaljnje delo in izboljšave.....	27
5.4	Zaključek	27
6	Viri in literatura	28
7	Priloge.....	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Bikofter [12]	2
Slika 2: Istoosni bikofter [13]	2
Slika 3: Trikofter v obliki [11]	2
Slika 4: Kvadrokofter [11]	3
Slika 5: Heksakofter [11]	3
Slika 6: Eulerjevi koti (roll, pitch, yaw) pri letalu [8]	5
Slika 7: Vrtenje propelerjev pri kvadrokofterju [8]	5
Slika 8: Motorji in osi vrtenja drona [14]	6
Slika 9: Matematična enačba za PID-regulacijo [15]	7
Slika 10: Deljenje sile propelerjev	8
Slika 11: Azimut	9
Slika 12: Izbrani ESC [17]	12
Slika 13: MPU9250 [18]	13
Slika 14: Node MCU (ESP8266) [19]	13
Slika 15: Skica odreza aluminijastih cevi za ohišje drona	15
Slika 16: Izdelava vezja z rezkalnikom	15
Slika 17: Pritrjen motor	16
Slika 18: Mehansko sestavljen dron	16
Slika 19: Dron med kalibracijo PID-zanke	17
Slika 20: Naprava za test stabilizacije ene osi	18
Slika 21: Zemljevid ciljev in izhodišča (Google Maps)	21

KAZALO TABEL

Tabela 1: Prikaz različnih konfiguracij dronov	2
Tabela 2: Cene dronov v razredu do 2000 €.....	4
Tabela 3: Cene posameznih delov drona.....	14
Tabela 4: Vzgon v odvisnosti od hitrosti motorja	22

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Potreben čas drona in avtomobila za dostavo na cilj	23
---	----

1 Uvod

Z droni so se včasih "igrali" le modelarji. V zadnji letih se uporabljajo na vedno več področjih, kot so video produkcija, vojska, kmetijstvo, virtualni ognjemeti... Prepričan sem, da se bosta v prihodnosti avtonomnost in spekter uporabe dronov znatno povečala.

1.1 Ideja naloge

Trenutno je najpogostejša rešitev za dostavo hrane na dom osebno vozilo. Zaradi zapiranja centrov v mestih, gneče v prometu in težav s parkiranjem se je v mestih začela pojavljati dostava s kolesom.

Moja ideja je, da bi dostavljalce hrane in vozila zamenjali z avtonomnim dronom. S tem bi omogočili hitrejšo in cenejšo dostavo.

1.2 Hipoteze

V sklopu naloge sem postavil tri hipoteze.




- a) Dron lahko dvigne eno porcijo hrane.
- b) Dron je hitrejši od osebnega avtomobila.
- c) Dostava s popolnoma avtonomnim dronom je cenejša.

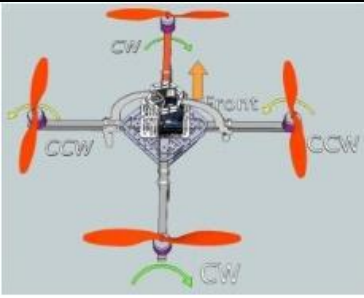

2 Teoretični del

2.1 Vrste dronov

Obstaja več različnih konfiguracij drona. Spodnja tabela prikazuje vse možnosti.

Tabela 1: Prikaz različnih konfiguracij dronov

Bikopter	2 motorja	Najcenejši; zapleteno krmilje – potrebna sta dva aktuatorja za stabilizacijo; majhna nosilnost.	 <i>Slika 1: Bikopter [12]</i>
Istoosni bi-kopter	2 motorja	Najcenejši; zapleteno krmilje – potrebna sta dva aktuatorja za stabilizacijo; majhna nosilnost.	 <i>Slika 2: Istoosni bikopter [13]</i>
Trikopter	3 motorji	Težka stabilizacija po Y-osi (yaw); manjša nosilnost.	 <i>Slika 3: Trikotper v obliki [11]</i>

Kvadro- kopter	4 motorji	Simetrično ogrodje; dražji; enostaven za krmiljenje.	 <p>Slika 4: Kvadrokopter [11]</p>
Hexa- kopter	6 motorjev	Drag; velika nosilnost; bolj zapleteno krmilje.	 <p>Slika 5: Heksakopter [11]</p>

Povzeto po [9] in [11].

2.2 Raziskava trga

2.2.1 KAJ PONUJA TRG

Na trgu že obstajajo droni, ki uporabljajo GPS. Večina ga uporablja, da se lahko vrne na mesto vzleta. Nekateri droni že omogočajo nastavitve točk oziroma načrtovanje poti, vendar niso povezani na internet. Prav tako na trgu nisem našel nobenega drona, ki bi za natančnejše določanje lokacije uporabljal WiFi-omrežja (Google location services).

2.2.2 CENE, DOMET IN NOSILNOST

V spodnji tabeli so prikazane cene dronov z nosilnostjo in dosegom. V zadnjem stolpcu je prikazano, kakšna je cena drona, ki lahko prenese en kilogram težak tovor en kilometer daleč.

ime	nosilnost	maksimalen doseg	cena	€ / (km*kg)
DIJ Mavic 2 Pro	900 g	18,00 km	1750,00 €	108,02
Yuneec Tornado H920	1600 g	10,00 km	1800,00 €	112,50
3DR IRIS+	400 g	15,50 km	900,00 €	145,16
3DR solo	200 g	16,00 km	600,00 €	187,50
GoPro Karma	100 g	10,00 km	420,00 €	420,00

Tabela 2: Cene dronov v razredu do 2000 €

Cene dronov sem poiskal na Amazonu.

2.2.3 PROBLEM DOGRAJEVANJA LASTNIH FUNKCIJ

Pri nakupu drona obstaja še dodaten problem. Večina proizvajalcev na trgu ne ponuja SDK-ja oziroma možnosti lastnega prilagajanja drona z dodatnim razvojem in dodajanjem funkcij. V svoji manjši raziskavi sem ugotovil, da to možnost ponuja samo dron DJI, vendar samo na modelih, ki presegajo ceno 5000 €.

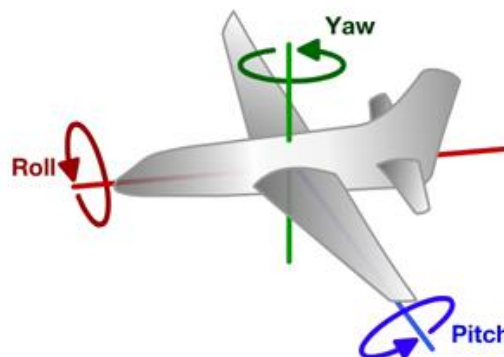
Zaradi navedenega problema in cenovnih vidikov sem se odločil za izdelavo lastnega drona.

2.3 Teoretične osnove krmiljenja drona

2.3.1 OSI VRTENJA

Odstopanje lege drona od izhodiščnega koordinatnega sistema lahko opišemo s tremi koti, in sicer z nagibom (angl. roll), naklonom (angl. pitch) in odklonom (angl. yaw).

Za izračun teh kotov potrebujemo triosni žiroskop, ki meri spremembo kotov skozi čas.

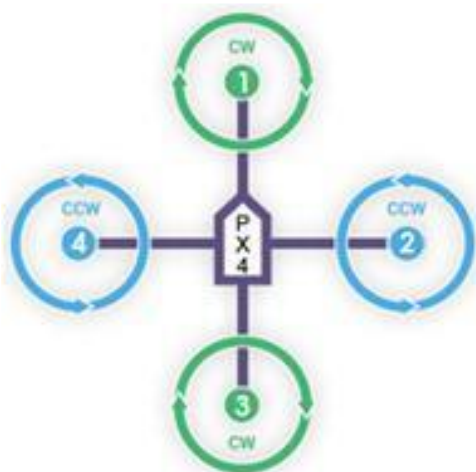


Slika 6: Eulerjevi koti (roll, pitch, yaw) pri letalu [8]

2.3.2 IDEALNA LEGA DRONA

Da dron proizvede največji vzgon in se ne premika po prostoru, mora biti v vodoravni legi (nagib = 0° in naklon = 0°). Za lažje ročno krmiljenje mora biti obrnjen v smeri našega pogleda. Pri avtonomnem krmiljenju pa mora biti obrnjen proti severu zaradi lažje navigacije po zemljevidu. Torej je odklon enak azimutu, idealen odklon pa je 0° .

2.3.3 KONTROLIRANJE NAGIBA, NAKLONA IN ODKLONA



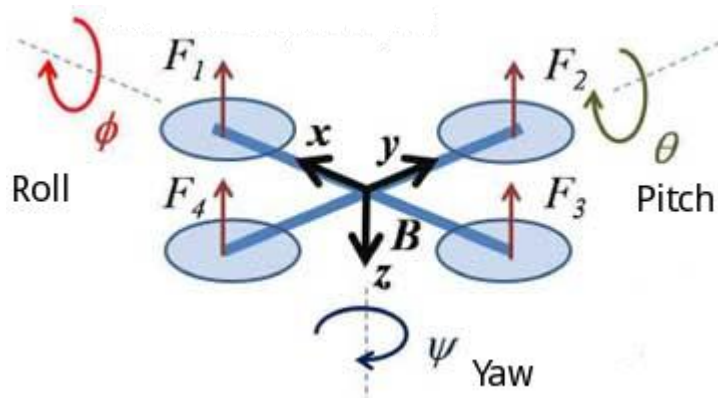
Slika 7: Vrtenje propelerjev pri kvadrokopterju [8]

Slika 7 je prikazuje skico drona iz ptičje perspektive. Zeleno obarvana propelerja se vrta v smeri urinega kazalca, modro pa nasprotno od urinega kazalca. S tem se prepreči vrtenje drona (spremembo odklona).

2.3.3.1 Kontroliranje nagiba in naklona

Da dronu spremenimo naklon (pitch) – v pozitivno smer, moramo povečati obrate motorja 1, da povečamo silo potiska propelerja – F_1 (Slika 8). Da dosežemo hitrejše vrtenje, lahko zmanjšamo obrate motorja 3 in posledično zmanjšamo vzgon F_3 .

Enako velja za nagib (roll), le da tu povečujemo F_4 in zmanjšujemo F_2 .



Slika 8: Motorji in osi vrtenja drona [14]

2.3.3.2 Kontroliranje odklona

Da dosežemo vrtenje drona po osi Z (odklon), povečamo hitrost nasproti ležečih motorjev (npr. motor 1 in 3) in zmanjšamo hitrost sosednjih motorjev (npr. motor 2 in 4) – Slika 8.

2.3.4 PID-ZANKA

PID (Proportionalni, integralni in diferenčni – Proportional Integral Derivative)-zanka je eden najpogosteje uporabljenih algoritmov za regulacijo v industriji. Uporablja se za regulacije pretoka, hitrosti, v raznih grelcih ... Algoritem upošteva povratno informacijo (angl. feedback) in glede na njeno vrednost prilagaja izhodno vrednost, ki posledično vpliva na prej omenjeno povratno informacijo. Primerna je za regulacijo sistemov, na katere močno vplivajo zunanji dejavniki, ki jih je težko ali pa nemogoče predvideti. Slika 9 prikazuje matematičen zapis algoritma.

2.3.4.1 Implementacija PID-zanke

Pri dronu je težko ali pa nemogoče predvideti veliko dejavnikov. Največ preglavic povzročajo:

- turbulence, veter in drugi dejavniki, povezani z vremenom,
- neenakomerna razporeditev mase pri dronu in tovoru,
- odstopanja pri obliki propelerjev in hitrosti vrtenja, ki posledično vplivajo na vzgon.

Naloga PID-zanke je, da dron vzdržuje v dani referenčni legi.

Odstopanje od referenčne lege imenujemo napaka.

$$u(t) = \overbrace{K_p e(t)}^{\text{Proportional}} + \overbrace{K_i \int_0^t e(\tau) d\tau}^{\text{Integral}} + \overbrace{K_d \frac{d}{dt} e(t)}^{\text{Derivative}}$$

Slika 9: Matematična enačba za PID-regulacijo [15]

Vsak člen se množi s konstantnimi faktorji (K_p , K_i in K_d), ki določajo obnašanje in odzivnost zanke. Vrednosti faktorjev nameravam ugotoviti s poizkušanjem,

Izhod proporcionalnega dela (proportional) je sorazmeren s trenutno napako. Proporcionalni del popravlja večje napake (več od 3°). Z večanjem K_p faktorja se odzivnost samega drona na napake poveča.

Izhod integralnega dela (integral) je odvisen od preteklih napak, ki se nabirajo skozi čas (se seštevajo). Sčasoma integralni del popravi manjše napake (do 3° stopinje).

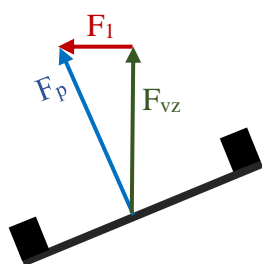
Izhod diferenčnega dela (derivative) skuša predvideti gibanje drona v prihodnosti. Izračuna spremembo napake med zadnjima dvema meritvama. Diferenčni del zaduši, oziroma izniči proporcionalni in integralni del in s tem prepreči prenihaj (overshoot) drona ter tako posledično prepreči njegovo oscilacijo.

PID-zanko izračunamo za vsako rotacijsko os posebej (nagib, naklon, odklon). [10] [7]

2.3.5 PREMIKANJE DRONA PO PROSTORU

Za vertikalno premikanje drona po prostoru (po oseh X in Z) dron namenoma nagnemo iz njegove idealne lege. Odklon povzroči, da se sila potiska propelerjev razdeli na dve komponenti – na silo vzgona in na silo F_1 , ki povzroči vertikalni premik drona. Večji kot je odklon, večja je sila F_1 , posledično večja sta pospešek in vertikalna hitrost drona (Slika 10).

Da dron nagnemo iz idealne lege, enostavno določimo novo referenčno lego, ki jo PID-zanka vzdržuje.



F_p – sila potiska propelerjev

F_{vz} – sila vzgona

F_1 – sila, ki povzroči vertikalno premikanje drona

Slika 10: Deljenje sile propelerjev

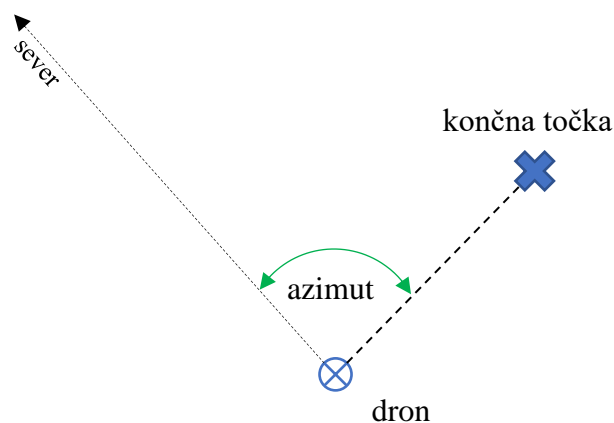
Hitrost rotacije drona (spreminjanje odklona) je odvisna od spremembe hitrosti nasproti ležečih motorjev. To kontroliramo s pomočjo PID-zanke, po istem principu kot naklon in nagib. Rotacijo lahko opišemo kot spremembo od začetne vrednosti ali pa kot azimut (kot od magnetnega severa do točke pogleda).

Višino leta drona določamo s spreminjanjem obratov vseh motorjev, ki posledično povečajo F_p in F_{vz} (Slika 10). Tudi to kontroliramo s pomočjo PID-zanke.

2.3.5.1 Premik drona do željene točke v fizičnem prostoru

Postopek premika drona ima dve točki, ki jih program mora izvajati, dokler ne pride blizu željene točke. Zaradi odstopanj pri navigaciji dron nikoli ne bo na točno željeni točki.

Najprej se mora dron obrniti proti željeni točki. Za to je potrebno izračunati azimut do željene točke iz perspektive drona (Slika 11) in izračunan azimut nastaviti za referenčno točko odklona. Za to potrebujemo trenutno lokacijo drona na Zemlji.



Slika 11: Azimut

Dron nagnemo (spremenimo naklon ali pa nagib), posledično se premika proti točki. Daljša, kot je razdalja, bolj se dron nagne (faktor je treba ugotoviti s poizkušanjem). Naklon ali nagib pa ne sme preseči 90° , saj drugače popolnoma izgubimo vzgon.

2.3.6 PRAVNI VIDIK

Upravljanje dronov je urejeno z Uredbo o sistemih brezpilotnih zrakoplovov, ki določa pravila in omejitve pri uporabljanju dronov. [20]

Upravljanje drona z maso pod 500 gramov je dovoljeno samo na prostorih, kjer ni ljudi in bivalnih objektov. Dron mora ostati v vidnem polju pilota. [20]

Z dovoljenem Agencije za civilno letalstvo lahko upravljamo dron, težji od 500 gramov, kjerkoli, tudi brez vidnega polja. Potrebno je pridobiti tudi dovoljenje za uporabljanje frekvenčnega spectra, po katerem komuniciramo z dronom. [20]

3 Praktični del

3.1 Izdelava lastnega drona

3.1.1 IDEJNA ZASNOVA

Zaradi lažjega programiranja in doseganja primerne razmerja med ceno in nosilnostjo sem se odločil za izdelavo kvadrokopterja – drona s štirimi propelerji. Predvidel sem, da se bo na dron porcija hrane ročno pritrdila z manjšim karabinom, z zemljo pa bo dron komuniciral (npr. določanje cilja, nadzorovanje, lokacija ...) preko interneta.

Z raziskavo na spletu in na podlagi lastnih izkušenj sem določil osnovne potrebe po sestavnih delih drona, in sicer:

- brezkrtačnem motorju (BLDC) – 4 kosih,
- propelerjih – 4 kosih,
- krmilniku hitrosti za motorje (ESC) – 4 kosih,
- žiroskopu,
- pospeškometru,
- kompasu,
- GPS-modulu,
- radijskem sprejemniku in oddajniku,
- bateriji,
- krmilniku.

3.1.2 DOLOČITEV MODELOV KOMPONENT IN NAKUP

Izbral sem **motorje** z oznako A2212/13T 1000KV. Na oznaki je zapisano, da ima rotor premer 22 mm, višino 12 mm in da ima vsako navitje 13 navojev. Pri napajanju 1 V motor doseže 1000 obratov.

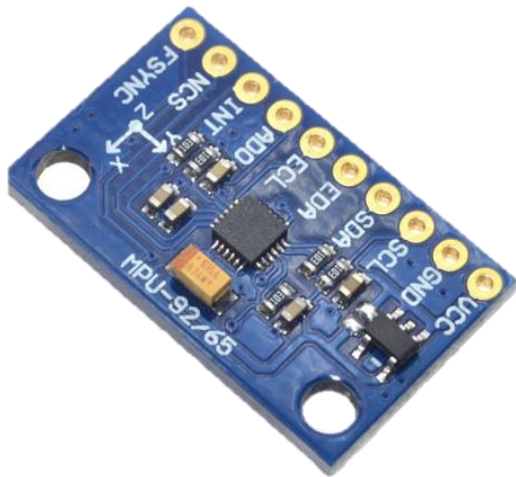
Večja površina in večji naklon pomenita več potiska, ki ga propeler ustvari. Za svoj dron sem izbral **propelerje** premera 255 mm in kotom naklona 4,5°. Propelerji so posebej prilagojeni za bolj učinkovito izvajanje potiska v eno smer vrtenja. V ta namen obstajajo CW-propelerji (vrtenje v smeri urinega kazalca) in CCW-propelerji (vrtenje v nasprotni smeri urinega kazalca). Za preprečitev rotacije okoli Y osi (odklon) sem nabavil obe vrsti propelerjev, smer vrtenja motorjev pa sem prilagodil. Iz cenovnega razloga sem se odločil za plastične propelerje.

ESC-ji (Electronic Speed Controller) so most med krmilnim in močnim vezjem. Njihova naloga je reguliranje hitrosti motorjev. Izbral sem 30A ESC-je, ker so primerni za moje motorje. Pri izbiri sem upošteval tudi frekvenco osveževanja hitrosti motorja. Izbral sem 500 Hz ESC-je.



Slika 12: Izbrani ESC [17]

Zaradi močnih motorjev sem izbral štiricelično LiPo **baterijo** (4S1P 50C – 14,8 V, 250 A) s kapaciteto 5000 mAh. Pri izbiri baterije je bil pomemben faktor tudi njena masa.



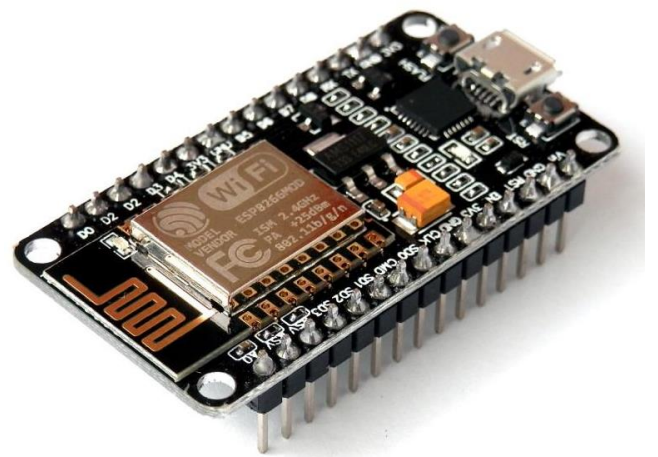
Slika 13: MPU9250 [18]

Žiroskop, pospeškometer in kompas so potrebni za samodejno uravnavanje drona in so na voljo v enem samem čipu z oznako MPU9250. Čip je digitalen in se s krmilnikom sporazumeva preko protokola I²C. Poleg natančnosti, hitrosti osveževanja in cene je to ključni faktor pri izbiri čipa. V bodoče bom lahko te senzorje uporabil še za natančnejši izračun lokacije.

Barometer je potreben za krmiljenje nadmorske višine drona. Za to nalogo sem izbral model BMP180, ker podpira prej omenjeno I²C komunikacijo in je tudi dovolj natančen.

Za grobo sledenje lokaciji sem se iz cenovnega razloga odločil za uporabo GPS-čipa NEO-6M.

Za **krmilnik** sem izbral ESP8266. Razlog za ta izbor je njegova WiFi-povezljivost, ki omogoča natančnejšo lociranje s pomočjo nazivov WiFi-oddajnikov preko programskega vmesnika – Google Geolocation API.



Slika 14: Node MCU (ESP8266) [19]

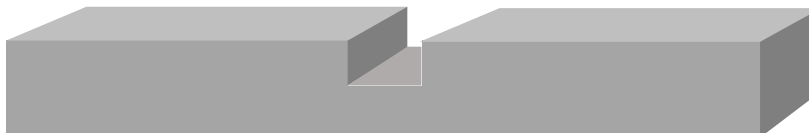
Ko sem imel opredeljene vse modele komponent, sem na spletu med spletnimi trgovinami primerjal cene za vsako posamezno komponento in jo kupil tam, kjer je bila najcenejša. Cene so bile naslednje:

Tabela 3: Cene posameznih delov drona

baterija	52,90 €
motorji + propelerji	24,48 €
ESC	22,33 €
barometer	7,44 €
GPS-modul	3,82 €
MPU9250	3,37 €
krmilnik	2,88 €
konstrukcija, žice, potrošni material	10 €
skupaj	127,22 €

3.1.3 IZDELAVA OGRODJA

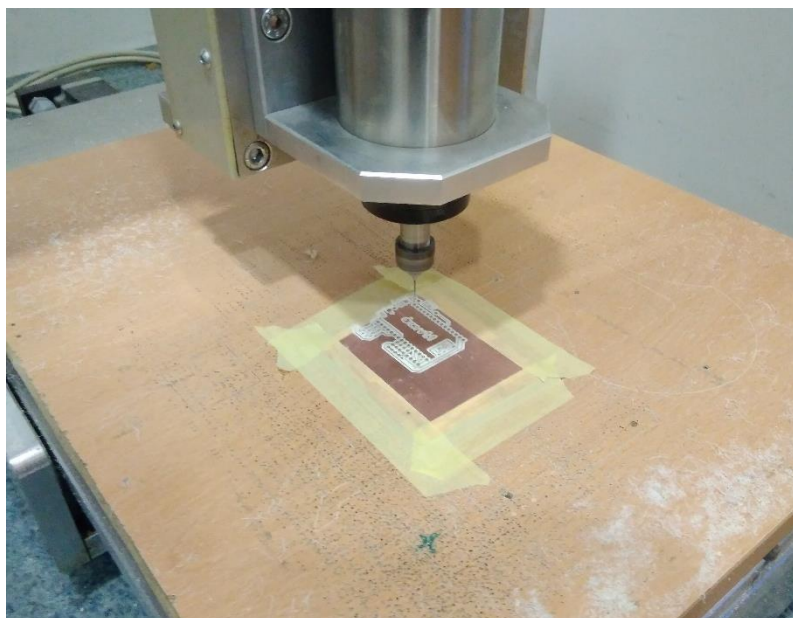
Ogrodje drona sem izdelal iz kvadratnih aluminijastih cevi (10 x 10 x 440 mm). Dve cevi sem obrezal tako, da sem ju lahko združil v isti višini in privijačil pod kotom 90 stopinj.



Slika 15: Skica odreza aluminijastih cevi za ohišje drona

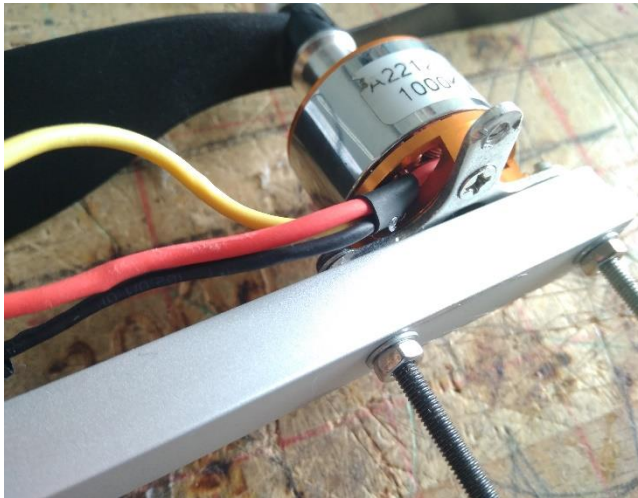
3.1.4 IZDELAVA TISKANEGA VEZJA

Najprej sem izdelal shemo vezja v programu EasyEDA. Po shemi sem narisal načrt tiskanega vezja in ga izdelal s pomočjo CNC-rezkalnika, nato sem na to vezje prispajkal priključke in potrebne komponente.



Slika 16: Izdelava vezja z rezkalnikom

3.1.5 PRITRDITEV MOTORJEV IN ELEKTRONIKE



Motorje sem z vijaki pritrdil na konec vsake kvadratne cevi. Zaradi tresljajev, ki jih ustvari vrtenje propelerjev, sem na matice vijakov nanesel lepilo za tesnenje vijakov. Na kvadratne cevi sem z vezicami pritrdil ESC-je.

Slika 17: Pritrjen motor

Na sredino sem z vijaki pritrdil MPU9250-čip, ki je s ciljem zmanjšanja motenj dvignjen nad okvir, baterijo in krmilnik. Pod dron sem pritrdil baterijo, senzorje in vezje z mikrokrmilnikom.



Slika 18: Mehansko sestavljen dron

3.1.6 PROGRAMIRANJE

Najprej sem napisal program, ki prebere podatke iz MPU9250-čipa in surovih podatkov (pospeška, spremembe naklona, azimuta), izračuna kote nagiba, naklona in odklona. (angl.: roll, pitch in yaw).

V program sem nato dodal PID-zanko, ki s spreminjanjem obratov motorjev uravnava in stabilizira gibanje drona za vsako os vrtenja posebej. V mojem programu PID-zanka popravlja pozicijo drona s frekvenco 250 Hz.

Program prav tako nadzoruje napetost baterije in omogoča nastavljanje PID-parametrov preko serijskega vmesnika.

Celoten program je napisan v C-ju, s pomočjo dveh knjižnic, s pomočjo Arduino okolja, rahlo modificirane Servo knjižnice in Bolderflightove MPU knjižnice [16].



Slika 19: Dron med kalibracijo PID-zanke

3.1.7 TESTIRANJE ENE OSI

Izdelal sem napravo za testiranje stabilizacije ene osi drona (Slika 20). Kvadratna cev je preko ležaja pritrjena na les in se lahko prosto giblje po eni osi. Nanjo sem pritrdil dva motorja in ESC-ja ter MPU9250.



Slika 20: Naprava za test stabilizacije ene osi

3.1.8 DALJINEC

Čeprav je bila ideja, da bo dron letel avtonomno, sem za testiranje uporabil modelarski daljinec s sprejemnikom. Sprejemnik sem priklopil na digitalne vhode krmilnika in v program dodal podporo za branje signalov iz sprejemnika.

3.1.9 TEŽAVE IN REŠITVE MED IZDELAVO

Največ težav sem imel s **kalibracijo PID-zanke**. Kalibracijo sem si olajšal z izdelavo naprave za kalibracijo samo ene osi (Slika 20). Ko sem bil s kalibracijo ene osi zadovoljen, sem z uporabo vrvic omejil gibanje, naklon, nagib in odklon drona.

Težavo **odvijanja vijakov med delovanjem** drona sem najprej poskušal rešiti z dodajanjem še ene matice na vijak. Ta rešitev ni bila uspešna, zato sem matice zalepil s posebnim lepilom za vijake.

Pritrditev elektronike s izolirnim trakom je imela za posledico, da so komponente postale lepljive. Pritrditev s pomočjo vezic se je izkazala za dobro prakso.

3.2 Test potiska motorja

Najprej sem en motor (s pritrjenim propelerjem) pritrdil na dvokilogramsko utež in ga povezal s krmilnikom. Arduino (Atmelov mikrokontroler – Atmega168) sem sprogramiral tako, da lahko s potenciometrom krmilim hitrost motorja. Da bi vedel, s kakšno hitrostjo se motor vrti, sem med krmilnikom in ESC-jem povezal osciloskop. Utež in motor sem postavil na kuhinjsko tehniko, ki ima razpon 3 kg, nato sem spreminjal hitrost motorja in zapisal spremembe teže na tehnici (Tabela 4).

3.3 Merjenje časa dostave

3.3.1 DOLOČITEV CILJEV

Najprej sem določil začetek poti in tri cilje, ki so dosegljivi z avtomobilom. Zaradi varnostih razlogov sem preizkus opravil na lokalnih cestah in travniku. Hitrostna omejitev za avtomobil je bila 50 km/h.

PRIMER 1: Prvi cilj je od začetka poti po zračni liniji oddaljen 150 m, po cesti pa 450 m. Dron se lahko do cilja pelje po direktni zračni liniji.

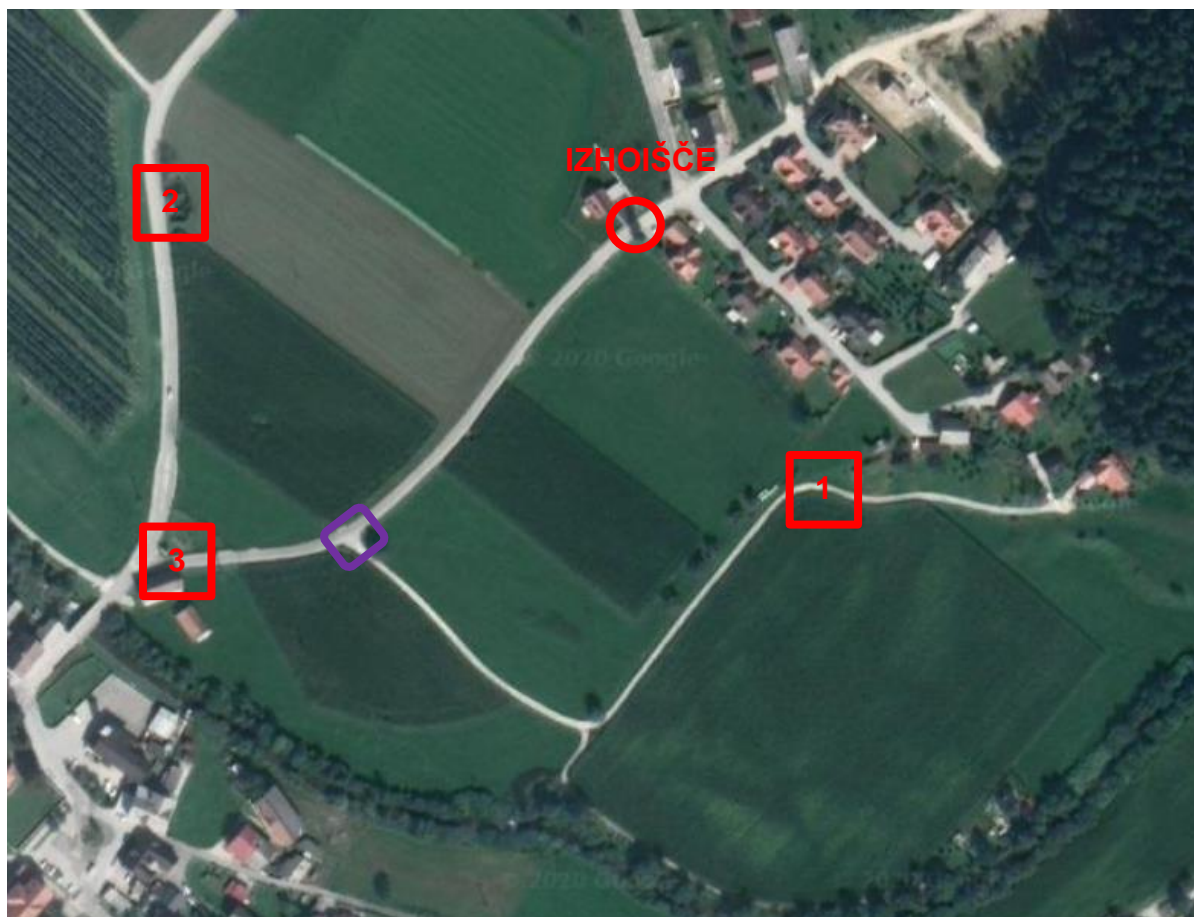
PRIMER 2: Drugi cilj je po zračni liniji oddaljen 250 m, po cesti pa 440 m.

PRIMER 3: Zračna in cestna razdalja sta v tretjem cilju podobni (240 m in 250 m).

PRIMER 4: Cilj je enak kot v tretjem primeru, le da avto čaka na navideznem semaforju (na sliki 21 je označen z vijolično barvo) približno 30 sekund.

PRIMER 5: Cilj je enak kot v prvem primeru. Dron sem pilotiral nad cesto. S tem sem simuliral daljšo ravno cesto do cilja (kot v tretjem primeru). Razlika med prevoženo potjo drona in avtomobila je majhna.

S štoparico sem izmeril čas, ki ga dron in osebno vozilo potrebujeta, da prispeta na cilj. Rezultati so prikazani na grafikonu 1.



Slika 21: Zemljevid ciljev in izhodišča (Google Maps)

4 Rezultati

4.1 Dron lahko dvigne eno porcijo hrane

Povprečna porcija hrane je 400 gramov. [6] Masa drona vključno z baterijo je izmerjena s tehtnico in znaša približno 900 gramov. To pomeni, da morajo dronovi propelerji zagotoviti vzgon 13 N.

Tabela 4: Vzgon v odvisnosti od hitrosti motorja

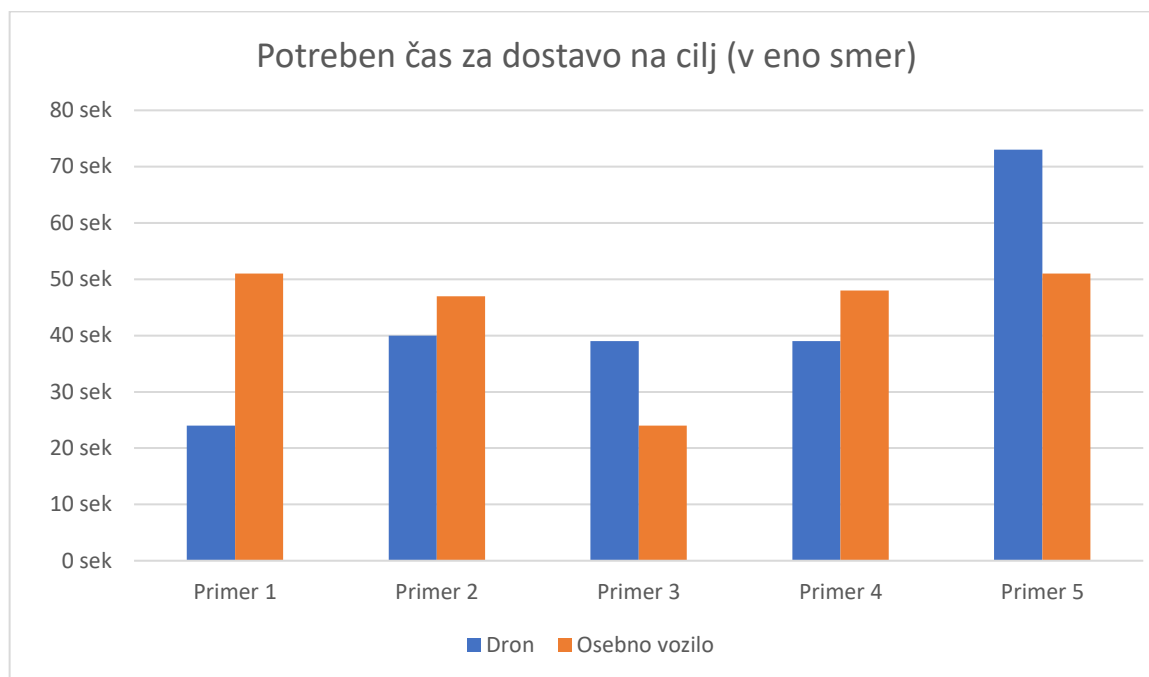
Hitrost motorja (%)	Odčitek iz tehnice (g)	Sprememba teže (g)	Vzgon motorja (N)
0	2000	0	0,00
10	1925	75	0,74
20	1875	125	1,23
30	1800	200	1,96
40	1700	300	2,94
50	1600	400	3,92
60	1450	550	5,39
80	1275	725	7,11
100	1125	875	8,58

Opomba: Zaradi tresljajev kazalca na tehnici sem lahko meritev odčital v toleranci 25 gramov.

Za stabilizacijo in premikanje drona sem namenil 20 % hitrosti motorjev, 80 % hitrosti pa je namenjene ustvarjanju vzgona. Iz zgornje tabele je razvidno, da je pri 80 % hitrosti vzgon enega motorja 7,1 N. Če to pomnožimo s številom motorjev, dobimo 28,4 N vzgona, kar je več kot potreben vzgon.

Hipoteza je potrjena.

4.2 Dron je hitrejši od osebnega vozila



Grafikon 1: Potreben čas drona in avtomobila za dostavo na cilj

Grafikon 1 prikazuje, da je bil dron hitrejši v prvih dveh primerih, kjer je bila cestna razdalja daljša od zračne.

Iz 3. in 5. primera je razvidno, da se ob majhni razliki med zračno in cestno razdaljo avto na daljše razdalje obnese bolje.

V 4. primeru (enake okoliščine kot v 3. primeru, razen namišljenega semaforja) pa se dron obnese bolje, ker lahko preleti semafor.

Za dostavo hrane na podeželju je potrebno prevoziti večje razdalje in je manj prometnih ovir (semaforjev, zastojev, križišč). Zaradi tega je avtomobil hitrejši od drona.

Za dostavo hrane v mestu ni potrebno premagovati velikih razdalj. V mestih je veliko prometnih ovir in gost promet, zaradi enosmernih ulic in zasnove cest pa je večja razlika med cestno in zračno razdaljo.

Sklepam, da je v urbanem okolju dron hitrejši od avtomobila, na podeželju pa počasnejši.

Hipoteza je delno potrjena.

4.3 Dostava s popolnoma avtonomnim dronom je cenejša

4.3.1 CENA DOSTAVE Z DRONOM

Za sestavne dele, ki so potrebni za izdelavo celotnega drona, sem porabil približno 130 € (Tabela 3) in vložil okoli 120 ur lastnega dela (idejna zasnova, ugotovitev materialnih potreb, konstruiranje, izdelava modela, programiranje in izdelava prototipa). Ker se ne ukvarjam s pridobitno dejavnostjo, pri določitvi cene drona ne bom upošteval vrednosti lastnega dela in željenega dobička.

Zanesljivih podatkov za stroške vzdrževanja drona nimam, ker je v prototipni fazi. Iz lastnih izkušenj vem, da bateriji kapaciteta s časom upada in s tem tudi dronov doseg, na podlagi tega grobo ocenjujem, da bodo ti stroški znašali 100 € letno.

V primeru popolnoma samodejnega pristajanja je delo s dronom enostavno in ne zahteva dodatnega izobraževanja. Za nalaganje in polnjenje drona lahko poskrbijo drugi zaposleni (na primer natakari), ker za to ni potrebno veliko časa. Zaradi tega stroškov za delo z dronom nisem upošteval.

4.3.2 CENA DOSTAVE Z AVTOMOBILOM

Pri celotni ceni dostave hrane z avtomobilom je potrebno upoštevati investicijo v nakup rabljenega avtomobila nižjega razreda, stroške registracije in obveznega zavarovanja, stroške vzdrževanja in popravil ter stroške dela dostavljalca.

S pregledom na spletnih straneh avto.net in bolha.com sem ugotovil, da je povprečna cena rabljenih vozil nižjega razreda okoli 2000 €.

Stroški za registracijo osebnega vozila so 105,89 €. [5] Obvezno zavarovanje za mlade voznike stane 200 € letno. [4] Na podlagi pogovorov z lastniki starejših vozil sem ocenil, da je letni strošek vzdrževanja in popravil okoli 300 €.

Hrano bo dostavljal delavec, ki je zaposlen na podlagi študentske napotnice. Ta način zaposlitve je za podjetje najcenejši, saj znaša skupni strošek ene ure dela 7,62 €. [3]

4.3.3 PRIMERJAVA CEN

Investicija gostišča v uporabo drona je nižja od investicije v osebno vozilo. Stroški vzdrževanja osebnega vozila so višji od stroškov vzdrževanja drona. Pri uporabi avtonomnega drona ni treba plačati dostavljalca, saj dron raznaša hrano avtomatsko.

Hipoteza je potrjena.

5 Razprava

5.1 Pravni vidik

Trenutna zakonodaja zajema samo drone s pilotom, ki upravlja dron preko daljinca. Zakonodaje za popolnoma avtonomne sisteme še ni.

5.2 Primerjava s osebnim vozilom

Iz zastavljenih hipotez potrdim, da je dostava z dronom cenejša in hitrejša od dostave z osebnim vozilom. Dostava je tudi bolj ekološka, ker dron deluje na elektriko.

Dron je bolj odvisen od vremenskih pogojev kot avtomobil, saj v primeru močnega in sunkovitega vetra ne more leteti.

Avtomobil se v mestu sooča z gnečo, zastoji, semaforji in težavami s parkiranjem, ki povečujejo čas dostave hrane.

Plačilo dostavljene hrane z gotovino pri uporabljanju drona ni možno, zato kupec plača porcijo hrane preko interneta vnaprej.

Glavna ovira dostave hrane s dronom je veliko manjši doseg, kot ga ima osebno vozilo. To predstavlja problem predvsem za gostišča na podeželju.

5.3 Nadaljnje delo in izboljšave

Najprej bom vzpostavil avtomatsko sledenje poti preko GPS-a (GPS Point to Point).

Za natančajše orientiranje drona, bi uporabljal WiFi imena – Google Location Services. S pomočjo kamere in ultrazvočnih senzorjev bi lahko dron sam vzlelel in pristal. Z razvojem sistema za samodejno spuščanje tovora bi dron postal čisto avtonomen.

Ugotovil bi maksimalen doomet drona in raziskal, v kako velikem krogu je dron hitrejši od vozila.

Da bi omogočil letenje v dežju, bi lahko elektroniko drona vodoodporno zaščitil. Naredil bi lahko aerodinamično ohišje in s tem izboljšal odpornost drona proti vetru.

Izdelal bi lahko sistem za plačevanje in določanje ciljnega naslova s strani strank.

S pomočjo kamere in ultrazvočnih senzorjev bi lahko dron sam vzlelel in pristal. Z razvojem sistema za samodejno spuščanje tovora bi lahko postal čisto avtonomen.

Dron, ki bi sam pristajal na svoje “domače” mesto, bi se lahko tudi samodejno polnil.

Zanimivo bi bilo raziskati tudi možnost lastne proizvodnje dronov in nudenja raznih storitev z njimi v okviru enega podjetja.

5.4 Zaključek

Dostava hrane z avtonomnim dronom je vsekakor možna. V urbanem okolju je hitrejša od dostave z avtomobilom. Tam je dron tudi bolj konkurenčen, ker je na manjših površinah več prebivalcev in posledično več povpraševanja. Največjo oviro trenutno predstavlja doseg drona. Prepričan sem, da bodo droni z razvojem samodejnega pristajanja, razvojem močnejših baterij in razvojem načinov fizične predaje hrane kupcu v prihodnosti v veliki meri nadomestili trenutne načine dostave.

6 Viri in literatura

- [1] A. Krašček, **Vizualizacija in analiza izhodnih podatkov optičnega sistema zasledenje gibanja**, Ljubljana, 2018.
- [2] Google, „Geolocation API,“
<https://developers.google.com/maps/documentation/geolocation/intro>. [7. 2. 2020].
- [3] data.si, „Izračun študentske plače,“ [https://data.si/studentsko-delo/?stn=\)](https://data.si/studentsko-delo/?stn=)).. [8. 2. 2020].
- [4] Wiz.si, „Izračun zavarovanja za moj avot,“ <https://avto.wiz.si/>. [8. 2. 2020].
- [5] Spletni portal AMZS, „Podajšanje registracije,“
<https://www.amzs.si/storitve/pregledi-in-registracije/registracija-vozil/podaljsanje-registracije>. [8. 2. 2020].
- [6] NIJZ Slovenija, „Velikost porcij hrane,“
https://www.nijz.si/sites/www.nijz.si/files/publikacije-datoteke/slikovno_gradivo_s_prikazom_velikosti_porcij.pdf. [10. 2. 2020]
- [7] D. Pikš, **Samodejno nastavljanje parametrov PID krmilnika mobilnega robota**, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2018.
- [8] R. Luis, D. Pozo in J. Rosales, **Quadcopter stabilization by using PID controllers**, 2014.
- [9] N. Manoj Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano in V. Jayaseelan, **On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants**, ScienceDirect, 2018.
- [10] J. Muhovič, **Vizualno sledenje objektov skvadrokopterjem**, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, 2017.
- [11] A. Stoian, **Drone for Video Surveillance**, Tragoviste: University Valagia, Faculty of Electrical Engineering, Electronics and Information Technology, 2016.
- [12] „Slika: Bichopter,“
https://opengameart.org/sites/default/files/Bicopter%20.66_0.jpg. [6. 2. 2020]
- [13] „Slika: Coaxial Bichopter,“ <https://www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2019/06/NASA-autonomous-Mars-helicopter.jpg>. [10. 2. 2020]
- [14] „Slika: dron s motorji,“ <https://pix.toile-libre.org/upload/original/1380985932.jpg>. [7. 2. 2020]

- [15] „Slika: PID enačba,“ [http://www.oemheaters.com/Images/PID Control.jpg](http://www.oemheaters.com/Images/PID%20Control.jpg). [9. 2. 2020]
- [16] „MPU9250 Library,“ <https://github.com/bolderflight/MPU9250>. [15. 10. 2019]
- [17] „Slika: ESC,“ <http://i.ebayimg.com/images/i/281523844780-0-1/s-l1000.jpg> . [13. 2. 2020]
- [18] „Slika: MPU9250 čip,“ https://www.makerlab-electronics.com/my_uploads/2017/08/MPU9250-Sensor-Module-01.jpg [13. 2. 2020]
- [19] „Slika: Node MCU ESP8266,“ https://www.makerlab-electronics.com/my_uploads/2017/08/MPU9250-Sensor-Module-01.jpg [11. 2. 2020]
- [20] Republika Slovenija, „**Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov,**“ <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7317&0.5806895639579236> [1. 3. 2020]

