Konstruiranje stabilizatora opreme s dva stupnja slobode gibanja

Jurčević, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:776967

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Kristijan Jurčević

KONSTRUIRANJE STABILIZATORA OPREME S DVA STUPNJA SLOBODE GIBANJA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2018.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Kristijan Jurčević

KONSTRUIRANJE STABILIZATORA OPREME S DVA STUPNJA SLOBODE GIBANJA

CONSTRUCTION OF EQUIPMENT STABILIZER WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Nenad Lorković, dipl.ing.

Karlovac, 2018.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 – 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 – 579

HRN EN ISO 9001:2009

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij*: **STROJARSTVA***

Usmjerenje: **Proizvodno strojarstvo** Karlovac, 30.06.2018.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student*:* **Kristijan Jurčević** Matični broj: **0110612057**

Naslov: **Konstruiranje stabilizatora opreme s dva stupnja slobode gibanja**

Opis zadatka:

U završnom radu potrebno je opisati što je to stabilizator opreme, kako je nastao i gdje se primjenjuje. Opisati što je to problem gimbal locka i zašto se pojavljuje. Što su tehnologije brze izrade prototipova i njihove prednosti u odnosu na ostale tehnologije. Konstruirati okvir stabilizatora s dva stupnja slobode gibanja aditivnom tehnologijom.

Zadatak izraditi i opremiti sukladno Pravilniku o završnom radu VUK-a.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
30.06.2018.	30.10.2018.	13.11.2018.

Mentor: Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Nenad Lorković, dipl.ing. Marijan Brozović, dipl.ing.stroj. v.p.

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad na temu KONSTRUIRANJE STABILIZATORA OPREME S DVA STUPNJA SLOBODE GIBANJA izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje koje sam stekao tijekom studiranja na Veleučilištu u Karlovcu.

Također se zahvaljujem mentoru Nenadu Lorkoviću, dipl.ing. na utrošenom vremenu, trudu, te korisnim savjetima.

Veliku zahvalnost također dugujem i Veleučilištu u Karlovcu koje je samom nabavkom printera Prusa i3 Mk2 omogućilo izradu ovog rada, također asistentu Denisu Kotarskom, mag.ing,mech, na pomoći pri izradi okvira stabilizatora.

I naposljetku, želio bih se zahvaliti svojoj obitelji, prijateljima i svima onima koji su mi tijekom studija pružili podršku i bez kojih ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

U Karlovcu, 30.06.2018. Kristijan Jurčević

SAŽETAK

U uvodnom dijelu ovog Završnog rada ukratko je opisano što je to stabilizator opreme, kako je nastao i gdje se primjenjuje danas.

Daljnjom razradom stabilizatora opreme dolazimo do dijela o samom konstruiranju stabilizatora opreme (gimbalu), u ovom konkretnom slučaju radi se o konstruiranju stabilizatora kamere sa dva stupnja slobode gibanja što je ujedno i tema ovog Završnog rada.

Zaključak ove teme govori o važnosti primjene stabilizatora opreme .

SUMMARY

In the introductory part of this Bachelor degree Final Report, it is briefly described what the equipment stabilizer is, how it was created and where it is applied today.

With further development of the equipment stabilizer we come to a part of the construction of the equipment stabilizer (gimbal), in this particular case it is about the construction of the camera stabilizer with two degrees of freedom of movement, which is also the theme od this Final Report.

The conclusion of this topic is about the importance of applying stabilizer to the equipment.

SADRŽAJ

IZJAVA I
SAŽETAK II
SADRŽAJ III
POPIS SLIKA I
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
1. UVOD 1
2. GIMBAL LOCK 4
2.1. Gimbal lock u dvije dimenzije 5
2.2. Gimbal lock u tri dimenzije 6
2.3. Gimbal lock kod Apola 11 7
2.4. Gimbal lock u robotici 8
2.5. Gimbal lock u primjenjenoj matematici 9
2.5.1. Gubitak stupnja slobode gibanja s Eulerovim kutovima 10
2.5.2. Primjena kvaterniona 11
3. KONCEPT STABILIZATORA OPREME 12
3.1. Primjena stabilizatora opreme 12
3.1.1. Inercijska navigacija 12
3.1.2. Raketni motori 13
3.1.3. Fotografija i slika 13
3.1.4. Film i video 14
3.1.5. Kronometri brodova 15
3.2. Odabir stabilizatora opreme 15
3.3. Odabir komponenti stabilizatora opreme 16
3.3.1. Bezkolektorski istosmjerni motor 17
3.3.2. Upravljačka jedinica 18
3.3.3. Napajanje 19
4. KONSTRUIRANJE STABILIZATORA OPREME 21
4.1. Dijelovi stabilizatora opreme 21

4.2. Popis komponenata stabilizatora opreme 22
4.3. Modeli komponenata 23
4.3.1. BLDC motor 23
4.3.2. Upravljačka jedinica 32
4.3.3. Napajanje 33
4.3.4. Antivibracijska gumica 34
4.3.5. Kamera 34
5. IZRADA STABILIZATORA OPREME 35
5.1. Aditivna tehnologija 35
5.2. Razvoj i primjena aditivnih tehnologija 36
5.3. FDM ili FFF tehnologija izrade 37
5.4. Materijali za 3D printanje 38
5.5. Strojevi (3D printeri) 39
5.6. Montaža stabilizatora opreme 45
6. ZAKLJUČAK 46
PRILOZI 47
LITERATURA 48

POPIS SLIKA

Slika 1: Osi rotacije [1] 2
Slika 2: Prstenovi u neutralnom položaju [2] 4
Slika 3: Pojava gimbal locka [3] 4
Slika 4: Prstenovi u položaju neposredno prije gimbal locka [4] 6
Slika 5: Gimbal lock [5] 6
Slika 6: Gimbal lock u robotici [6] 8
Slika 7: Inercijska navigacija [7] 12
Slika 8: Stabilizator kamere [8] 14
Slika 9: Multirotor [9] 15
Slika 10: Shema bezkolektorskog motora [10] 17
Slika 11: Motor Quanum 2208 [11] 17
Slika 12: Upravljačka jedinica [12] 18
Slika 13: Napajanje [13] 20
Slika 14: Sklopni crtež stabilizatora 21
Slika 15: Kućište motora u fazi modeliranja 1 23
Slika 16: Kućište motora u fazi modeliranja 2 24
Slika 17: Kućište motora u fazi modeliranja 3 24
Slika 18: Kućište motora u fazi modeliranja 4 25
Slika 19: Kućište motora u fazi modeliranja 5 26
Slika 20: Kućište motora u fazi modeliranja 6 26
Slika 21: Gornje kućište motora 27
Slika 22: Izrada sklopa motora 28
Slika 23: Sklapanje komponenti motora 29
Slika 24: Sklop osovine i donjeg kućišta 30
Slika 25: Quanum 2208 sklop 31
Slika 26: Upravljačka jedinica 32
Slika 27: Baterija 33
Slika 28: Antivibracijska gumica 34
Slika 29: Gopro kamera 34
Slika 30: Grafikon područja primjene aditivne proizvodnje u 2012. godini 36

Slika 31: Materijal za 3D ispis 39
Slika 32: Prusa i3 MK2.....41
Slika 33: Izrada glavnog okvira 43
Slika 34: Izrada donje pločice.....44
Slika 35: Stabilizator sklop 45

POPIS TABLICA

Tablica 1: Popis dijelova stabilizatora opreme

Tablica 2: Popis komponenti stabilizatora opreme

Tablica 3: Specifikacije motora

Tablica 4: Specifikacije upravlječke jedinice

Tablica 5: Specifikacije baterije

Tablica 6: Specifikacije antivibracijske gumice

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
m	[g]	Težina u gramima
U	[V]	Napon u voltima
I	[A]	Struja u amperima
T	[°C]	Temperatura u stupnjevima
N		Vektor normale

1. UVOD

STABILIZATOR OPREME (najčešće kamere), u stranoj literaturi poznat kao GIMBAL (camera gimbal), je zakretni suport koji omogućava rotaciju oko aktuiranih osi .

Stabilizator je prvi puta opisao grčki izumitelj Philo iz Bizanta (280.-220. pr. Kr.). Philo je opisao osmerostranu posudu za tintu s otvorom na svakoj strani, koja može biti postavljena tako da dok je lice okrenuto prema vrhu, pero može biti stavljeno u posudu sa tintom, a da bez obzira na to tinta ne može istjecati van na ostale rupe. To je postignuto na taj način da je središnji dio posude bio montiran na seriju koncentričnih prstenova, ostajući u stacionarnom položaju bez obzira u kojem je smjeru posuda okrenuta.

Stabilizator korišten za montiranje kompasa i slično, ponekad se još naziva kardanskom suspenzijom, nakon što ju je talijanski matematičar, fizičar, filozof i astrolog Girolamo Cardano (1501.-1576.) opisao u detalje. Međutim, Cardano nije izumio stabilizator, niti je to tvrdio. Uređaj je poznat još od davnina, te se još uvijek ne može točno utvrditi tko mu je pravi izumitelj.

Npr. na brodu, brodski kompasi, žiroskop, pa čak i držači za piće obično koriste stabilizator kako bi ih se zadržalo uspravno u odnosu na horizont, unatoč turbulenciji koja nastaje zbog valova koji udaraju o trup broda.

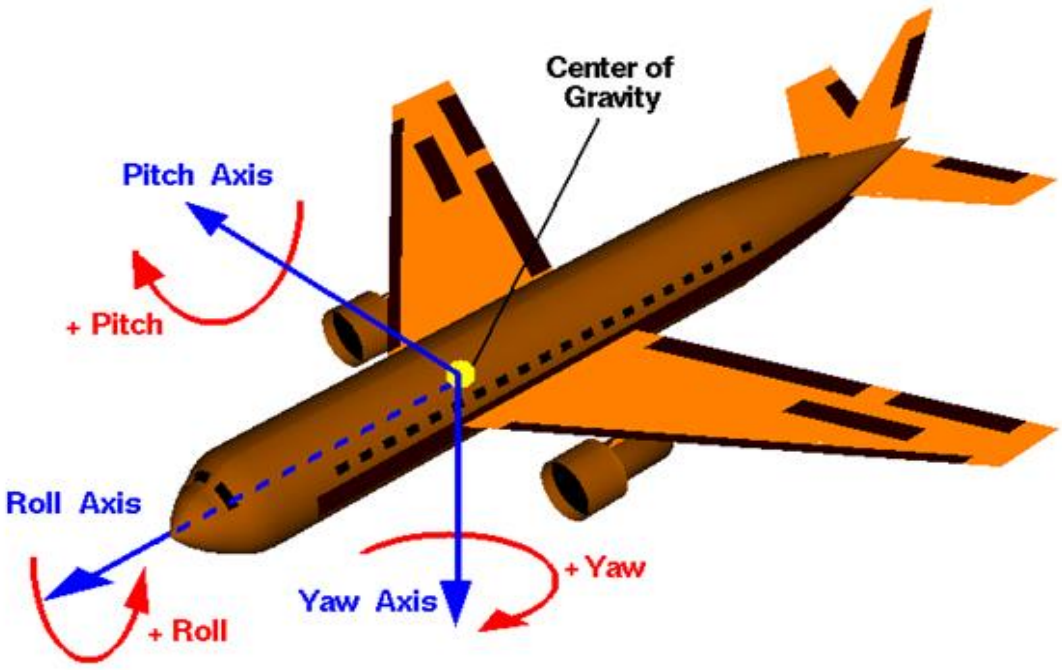
Upotreba stabilizatora seže i malo dalje, pa se tako stabilizator primjenjivao i u NASA-i. Ukoliko ste čitali članke poput „Kako su radile Apollo letjelice?“, onda ste zasigurno vidjeli izraz stabilizator. Ukoliko niste, stabilizator je platforma koja se može rotirati.

To znači, da umjesto da je platforma učvršćena za nepomičnu bazu, u uvom slučaju objektu na stabilizatoru se omogućava rotacija oko aktuiranih osi. U svijetu aeronautike, te osi se nazivaju: VALJANJE (*engl. roll*), PONIRANJE (*engl. pitch*) i SKRETANJE (*engl. yaw*).

Lakše je razumjeti značenja tih osi na nekom objektu. Uzmimo za primjer zrakoplov. Zamislite imaginarnu liniju koja prolazi sredinom zrakoplova od prednjeg kraja (tzv. nosa aviona) prema stražnjem kraju (repu aviona). Gibanje oko ove osi rezultiralo bi valjanjem aviona (poput bačve).

Sada zamislite novu liniju koja prolazi kroz oba krila aviona. Gibanje oko ove osi rezultiralo bi promjenom nagiba aviona. Odnosno avion se ili kreće penjati ili ponirati.

I posljednje, zamislite vertikalnu liniju koja prolazi kroz vrh aviona, prema njegovu dnu. Ova os je os skretanja, odnosno zrakoplov počinje skretati lijevo ili desno.



Slika 1: Osi rotacije [1]

Objekt montiran na tri ili više prstena se može rotirati u gotovo svakom smjeru. Što može biti od velike koristi ukoliko morate osigurati rotaciju objekta u odnosu na njegovu početnu poziciju a da ona ostane ista.

Stabilizator može biti bilo koji suport koji se može rotirati oko osi, većina stabilizatora izgleda poput serije međusobno povezanih koncentričnih prstenova. Najudaljeniji prsten se montira na veću površinu, poput instrument ploče na brodu. Sljedeći prsten spaja se na taj prsten u dvije točke, koje su okomite na površinu prvog prstena. Zatim se idući prsten spaja na prethodni prsten, na taj način da su točke okomite na površine prethodna dva prstena.

Svaki prsten se može rotirati oko jedne osi. Ujedno je zanimljivo za vidjeti, ali prava poanta stabilizatora je da se objektu montiranom u središte sustava osigurava bilo koja pozicija unutar sustava u određenom trenutku.

Točnije, u gotovo svakoj poziciji u određenom trenutku. Jedan problem kod stabilizatora je što se pojavljuje tzv. gimbal lock, odnosno, jedna os uvijek ostane zaključana. Gimbal lock se pojavljuje u slučaju kada se poklope 2 osi na 3-osnom gimbal sustavu. Kada se to dogodi, kretnje objekta su limitirane. Cijeli asortiman gibanja postaje ne izvediv.

Gimbal lock je ozbiljan problem. Postoje dva načina kako to izbjeći. Jedan od načina je da se podese prstenovi, bilo upravljanjem površinama, tako da se prstenovi rotiraju suprotnim smjerovima ili fizičkim resetiranjem prstenova. Ukoliko se gimbal lock dogodi, prstenovi moraju biti resetirani da ponovno rade. Druga opcija je da se ubaci još prstenova u sustav. Dodavanje četvrtog prstena je riješenje da se izbjegne tzv. gimbal lock ali to čini sustav skupljim i kompliciranijim. Obzirom da je većina stabilizatora dio elektroničkih sustava, dodatne komplikacije nisu uvijek najbolji izbor.

Stabilizatori omogućavaju dizajnerima da naprave uređaje koji su mnogo fleksibilniji od onih uređaja koji ne koriste stabilizatore, odnosno uređaja koji su stacionarni. Moguće je orijentirati uređaj, tako da je okrenut u specifičnom smjeru, neovisno o tome kako se njegova okolina giba. Takva „aplikacija“ ima mnogo načina za korištenje, od držača šalica, do satelitskih antena.

Neki od uređaja koji koriste stabilizator opreme su : nosači kamera, strojnice, simulatori kretanja, satelitski tanjuri, sustavi rasvjete.

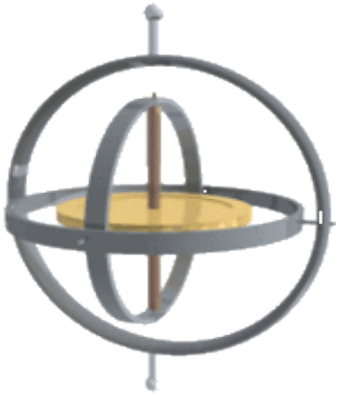
Stabilizatori opreme i NASA povezani su gotovo u svemu. NASA nije jedina koja koristi stabilizatore pri dizajniranju sustava navigacije i kontrolnih panela, već i za izradu simulatora za treninge. Bez stabilizatora NASA bi vrlo teško u svemir poslala astronaute na siguran način.

Na treninzima, NASA koristi stabilizatore kako bi simulirala situacije s kakvima će se astronauti susretati u svemiru. Neke rane simulacije na treninzima su zahtjevale od astronauta da se upregnu i vise na postolju stabilizatora, kako bi simulirali hod u svemiru. Zbog toga što su astronauti bili postavljeni na stabilizator, mogli su se preorjentirati u bilo kojem smjeru, kao što bi to bilo i u svemiru.

Stabilizatori su također odigrali veliku ulogu kod simulatora gibanja, dajući kabinama za simulaciju veći stupanj gibanja.

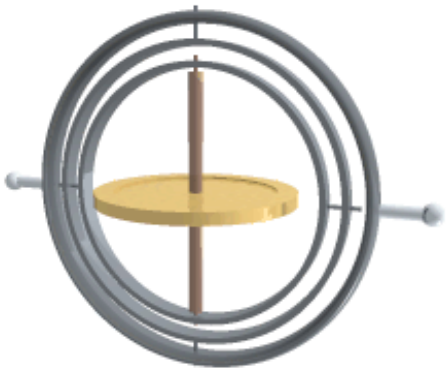
2. GIMBAL LOCK

Sve je u stupnjevima slobode gibanja .



Slika 2: Prstenovi u neutralnom položaju [2]

Stabilizator je sklop od tri prstena montirana jedan na drugi kako bi se omogućilo tri stupnja slobode gibanja. Kada se sva tri prstena poravnaju (u istu ravninu), sustav se može pomicati samo u dvije dimenzije iz te konfiguracije, ne tri, a to se naziva gimbal lock. U ovom slučaju može se samo skretati ili ponirati, ali ne i valjati (rotirati u ravnini u kojoj su se prstenovi poravnali).



Slika 3: Pojava gimbal locka [3]

Dodavanje četvrtog prstena može spriječiti pojavu gimbal locka, ali to zahtijeva da vanjski prsten bude aktivno pomican tako da uvijek ostane rotiran za 90 stupnjeva od unutarnje osi gdje se nalazi osovina. Bez aktivnog pomicanja vanjskog prstena, sve četiri osi bi se poravnale u istu ravninu kako je i prikazano na slici. I ponovno bi imali pojavu gimbal locka.

2.1. Gimbal lock u dvije dimenzije

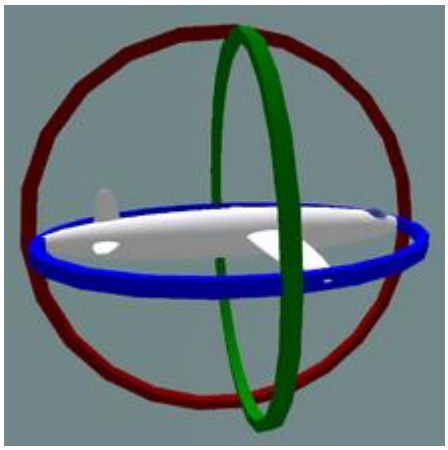
Gimbal lock se može pojaviti kod stabilizacijskih sustava sa dva stupnja slobode gibanja kao što su teodoliti s rotacijama oko azimuta i gibanjima u dvije dimenzije. Gimbal lock se kod ovih sustava pojavljuje u zenitu i nediru, zato što u ovim točkama azimut nije dobro definiran, a rotacija u smjeru azimuta ne mijenja smjer usmjeravanja teodolita.[1]

Zamislite praćenje helikoptera koji leti prema teodolitu s horizonta. Teodolit je teleskop montiran na tronožac tako da se može pomicati u azimutu i podizati da prati helikopter. Helikopter leti prema teodolitu a teodolit prati njegovu nadmorsku visinu i položaj. Helikopter leti neposredno iznad tronošca (tj. u zenitu) a onda promjeni smjer i leti na 90 stupnjeva prema prethodnom putu. Teleskop ne može pratiti ovaj manevar bez nekontinuiranog skoka u jednoj ili obje orijentacijske osi. Ne postoji konstantno kretanje koje bi mu omogućilo da stalno prati metu. Točnije jedna os se uvijek zaključa, odnosno imamo pojavu gimbal locka. Dakle postoji beskonačan broj smjerova u zenitu u kojima teleskop ne može pratiti kretnje svoje mete. Imajte na umu da čak i ako helikopter ne prođe kroz zenit, nego samo pored zenita, tako da se ne pojavi gimbal lock, sustav se i dalje mora kretati nevjerojatnom brzinom kako bi ga pratio, jer brzo prolazi od jednog do drugog položaja. Što je bliže zenitu, brže se to mora učiniti, a ako zapravo prolazi kroz zenit, granica tih „sve bržih" pokreta postaje beskonačno brza, odnosno diskontinuirana.

Da bi se spriječio gimbal lock korisnik mora ići oko zenita – izričito smanjiti visinu, promjeniti azimut da odgovara azimutu mete, zatim promjeniti visinu da odgovara visini mete. Matematički, to odgovara činjenici da sferne koordinate ne definiraju koordinatni grafikon na sferi u zenitu i nediru. Alternativno, odgovarajuća karta $T^2 \rightarrow S^2$ iz torusa T^2 u sferu S^2 (dana po točci s određenim azimutom i visinom) ne pokriva kartu u ovim točkama.

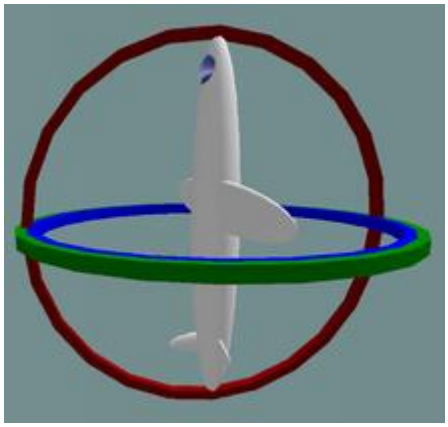
[1] Teodolit (*engl. theodolite*) je geodetski mjerni instrument za mjerenje vodoravnih kutova ili vodoravnih i okomitih kutova

2.2. Gimbal lock u tri dimenzije



Slika 4: Prstenovi u položaju neposredno prije gimbal locka [4]

Normalna situacija: tri prstena su neovisna



Slika 5: Gimbal lock [5]

Gimbal lock: dva od tri prstena su u istoj ravnini, gubi se jedan stupanj slobode gibanja.

Razmotrimo slučaj platforme za mjerenje razine zrakoplova sa tri stabilizacijske osi međusobno okomite (tj. osi valjanja, poniranja i skretanja u početnom položaju). Ako zrakoplov ponire za 90 stupnjeva, zrakoplov i os skretanja platforme postaju međusobno paralelni sa osi valjanja stabilizatora, promjene oko osi skretanja više nisu moguće (crveni

prsten se rotira oko zelenog prstena a zeleni prsten oko plavog prstena). Riječ zaključana os je zabluda: niti jedan prsten nije zaključan, sva tri prstena se i dalje mogu slobodno rotirati oko svojih odgovarajućih osi. Međutim, zbog paralelne orijentacije osi valjanja i skretanja, nema dostupne osi koja bi omogućila skretanje.

Ovaj problem se može riješiti korištenjem četvrtog prstena, inteligentno pogonjenog motorom tako da zadržava veliki kut između osi valjanja i osi skretanja. Druga mogućnost je da se rotiraju jedan ili više prstenova na proizvoljan položaj a kada se pojavi gimbal lock uređaj se resetira.

Suvremena praksa je da se u potpunosti izbjegava upotreba prstenova. U kontekstu inercijalnih navigacijskih sustava, to se može učiniti ugradnjom inercijskih senzora izravno na tijelo vozila i integrirajući rotaciju i ubrzanje digitalno koristeći metodu kvaterniona za dobivanje brzine i orijentacije vozila. Drugi način zamjene prstenova je koristeći klizne ležajeve ili plutajuće komore.

2.3. Gimbal lock kod Apola 11

Dobro poznati incident s gimbal lockom dogodio se kod misije Apola 11. Na ovoj svemirskoj letjelici, stabilizator je bio korišten za inercijsku mjernu jedinicu (*engl. Inertial Measurement Unit - IMU*[2]). Inženjeri su bili svjesni problema sa gimbal lockom ali su odbili koristiti četvrti prsten.

Oni su preferirali alternativno rješenje pomoću pokazatelja koji bi se pokrenuo kada bi se kod poniranja prsten približio kutu od 85 stupnjeva.

Umjesto da pokušaju pokretati prstenove brže nego što bi mogli, sustav je jednostavno odustao i zamrznuo platformu. Od te točke, svemirska letjelica se morala ručno pomaknuti s točke zaključavanja, odnosno točke na kojoj se pojavio gimbal lock, a platforma se također morala ručno poravnati pomoću zvijezdi kao referentne točke.

[2] IMU (*engl. Inertial Measerument Unit*) – inercijska mjerna jedinica

2.4. Gimbal lock u robotici



Slika 6: Gimbal lock u robotici [6]

U robotici, gimbal lock se često referira kao "nesreća ručnog zgloba", zahvaljujući uporabi "trostrukog valjkastog zgloba" kod robotske ruke, gdje tri osi u zglobu, kontroliraju skretanje, poniranje, te valjanje, sve prolaze kroz istu zajedničku točku.

Primjer zglobne nezgode, koji se naziva i zglobna singularnost, jest kada put kroz koji putuje robotska ruka prouzrokuje da se prva i treća zglobna os podudaraju . Druga zglobna os zatim pokušava vrtjeti 180 stupnjeva u nultom vremenu kako bi zadržala orijentaciju krajnjeg efektora. Rezultat singularnosti može biti prilično dramatičan i može imati neželjene učinke na robotsku ruku, krajnji efektor, te završni proces.

Važnost ne-singularnosti u robotici dovela je američki nacionalni standard za industrijske robote i sustave da ga definiraju kao uvjet uzrokovan kolinearnim poravnavanjem dvije ili više robotskih osi što rezultira nepredvidivim pokretima i brzinama robota.

2.5. Gimbal lock u primjenjenoj matematici

Problem zglobnog zaključavanja pojavljuje se kada se koristi primjena Eulerovih kutova u matematici, na primjer u računalnom programu (3D modeliranje, ugrađeni navigacijski sustavi, 3D videoigre..).

U formalnom jeziku, gimbal lock se pojavljuje jer karta Eulerovih kutova do rotacija (topološki, od 3-torusa T^3 do stvarnog projektivnog prostora **RP**) nije pokrivna karta – to nije lokalni hemeomortizam u svakoj točci, pa tako na nekim mjestima (stupanj slobode gibanja) mora pasti ispod tri, pa zbog toga dolazi do pojave gimbal locka.

Eulerovi kutovi omogućavaju numerički opis svake rotacije u trodimenzionalnom prostoru koristeći tri koordinate, ali ne samo da ovaj opis nije jedinstven, već postoje i neke točke u kojima ne može svaka promjena ciljanog prostora (rotacije) biti realizirana promjenom izvornog prostora (Eulerovi kutovi). Ovo je topološko ograničenje- ne postoji pokrivna karta od 3-torusa do trodimenzionalnog stvarnog projektivnog prostora ; jedina (ne trivijalna) karta pokrivanja je iz 3 kugle, kao u korištenju kvaterniona.

Da bismo napravili usporedbu, sva gibanja u prostoru mogu se opisati pomoću tri koordinate x, y i z, kao slijed tri uzastopna linearna kretanja duž tri okomite osi x, y i z. Tako je isto i za rotacijska gibanja, sve se rotacije mogu opisati pomoću tri kuta α, β i γ, kao sukcesiju tri rotacijska gibanja oko tri osi koje su okomite jedna na drugu. Ova sličnost između lineranih koordinata i kutnih koordinata čini Eulerove kutove vrlo intuitivnima, ali oni nažalost pate od gimbal locka.

2.5.1. Gubitak stupnja slobode gibanja s Eulerovim kutovima

Rotacija u 3D prostoru može se brojčano prikazati matricama na nekoliko načina. Jedan od tih načina prikazan je u donjoj jednadžbi:

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha & 0\\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta\\ 0 & \sin\beta & \cos\beta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (1)$$

Sa α i γ ograničenima u intervalima $[-\pi,\pi]$, i β ograničenim u intervalu $[0,\pi]$. Pogledajmo primjerice što se događa kada je $\beta = 0$. Poznavajući da je $\cos 0 = 1$ i $\sin 0 = 0$, gornji navedeni izraz postaje jednak :

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha & 0\\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (2)$$

Druga matrica je matrica identiteta i nema učinka na proizvod.

Izvođenje matričnog množenja prve i treće matrice:

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix}\cos\alpha\cos\gamma-\sin\alpha\sin\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma-\sin\alpha\cos\gamma & 0\\ \sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\sin\gamma+\cos\alpha\cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (3)$$

I naposljetku korištenjem trigonometrijskih formula:

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix}\cos(\alpha+\gamma) & -\sin(\alpha+\gamma) & 0\\ \sin(\alpha+\gamma) & \cos(\alpha+\gamma) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (4)$$

Promjena vrijednosti α i γ u gornjoj matrici ima iste učinke, kut rotacije $\alpha+\gamma$ se mijenja, ali osi rotacije ostaju u smjeru osi Z. Zadnji stupac i zadnji redak u matrici neće se mijenjati, što rezultira gubitkom jednog stupnja slobode gibanja.

Jedino riješenje za α i γ je da se vrijednost β promjeni sa vrijednosti $\beta = 0$, sličan problem se događa kada se vrijednost β postavi na $\beta = \pi$.

Može se odabrati drugačiji pristup zapisa rotacije pomoću matrice s Eulerovim kutovima nego što je gore prikazano za Z-X-Z, te također odabrati drugačije varijacije

intervala kuteva, ali na kraju uvijek postoji barem jedna vrijednost za koju se izgubi jedan stupanj slobode gibanja.
Imajmo na umu da problem s gimbal lockom ne prikazuje Eulerove kutove pogrešnima, oni uvijek odigraju svoju ulogu dobro definiranog sustava koordinata, međutim za određene praktične primjene nisu prikladni.

2.5.2. Primjena kvaterniona

Još jedan od načina prikaza rotacije u 3D prostoru je pomoću kvaterniona. Kvaternion je sačinjen od 4 koordinate (s, x, y, z) koje predstavljaju opću sliku geometrijske sličnosti. Ako je relacija $s^2 + x^2 + y^2 + z^2 = 1$ potvrđena, onda se kvaternion može koristiti za predstavljanje rotacije u prostoru. S praktičnog gledišta, rotacija kuta θ oko osi usmjerena vektorom normale $N = (x_0, y_0, z_0)$ predstavlja kvaternion :

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right), xo \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), yo \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), zo \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Za razliku od Eulerovih kuteva, kod kvaterniona nema problema sličnih gimbal locku. To se intuitivno može objasniti činjenicom da kvaternion opisuje rotaciju u jednom potezu (izvedi rotaciju oko osi upravljane vektorom normale), dok su Eulerovi kutovi napravljeni od tri uzastopne rotacije.

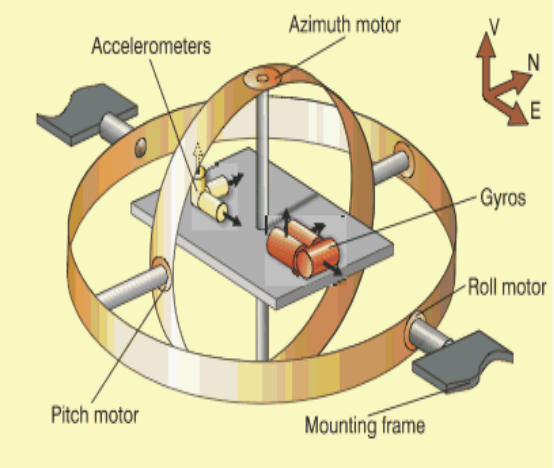
3. KONCEPT STABILIZATORA OPREME

Kako je već i ranije rečeno, stabilizator opreme se primjenjuje u različite svrhe, pa ćemo na osnovu toga i obuhvatiti 5 najčešćih primjena.

3.1. Primjena stabilizatora opreme

3.1.1. Inercijska navigacija

U inercijskoj navigaciji, koja se primjenjuje kod brodova i podmornica, potrebna su najmanje tri prstena kako bi se omogućilo inercijskom navigacijskom sustavu da ostane fiksiran u inercijalnom prostoru, nadoknadivši time promjene položaja broda prilikom valjanja, poniranja i skretanja. U ovoj primjeni, inercijska mjerna jedinica (*IMU-engl. Inertial Measurement Unit*) opremljena je s tri ortogonalno montirana prstena koji izvode rotaciju oko svih osi u trodimenzionalnom prostoru. Elementi stabilizatora se drže u nultom položaju pomoću motora na svakoj strani stabilizatora, kako bi se zadržala orijentacija IMU. Da bi se to postiglo, stabilizator prosljeđuje pogreške kroz senzor rezolver koji je montiran na tri prstena koji omogućavaju valjanje, poniranje i skretanje. Rezolveri omogućavaju automatski transformaciju matrice ovisno o kutu stabilizacije, tako da se momenti za svaku zasebnu os prenose po potrebi. Zakretni momenti moraju biti riješeni transformacijom valjanja i poniranja. Kut stabilizacije se nikada ne mjeri. Slične platforme za senzore koriste se na zrakoplovima.



Slika 7: Inercijska navigacija [7]

3.1.2. Raketni motori

U propulziji svemirskih letjelica, raketni motori uglavnom su montirani na stabilizatore kako bi omogućili vektorski potisak oko osi poniranja i skretanja; ponekad je i samo jedna os omogućena po motoru. Da bi kontrolirali valjanje, dvostruki motori s diferencijalnim poniranjem ili skretanjem se koriste da bi proizveli moment oko osi valjanja letjelice. Riječ stabilizator koristila se kao imenica.Većina današnjih riječnika i dalje ju koristi kao takvu. Međutim, nedostajući prikladnih pojmova za opisivanje gibanja raketnih motora, inženjeri su počeli koristiti riječ stabilizator kao glagol. Kada se komora za potiskivanje zakreće, to gibanje se krenulo opisivati kao stabilizacija ili stabiliziranje.

3.1.3. Fotografija i slika

Stabilizatori se također koriste za montiranje, od malih fotoaparata pa sve do velikih fotografskih teleskopa.U prijenosnoj opremi za fotografiranje koriste se jednoosne stabilizacijske glave kako bi se omogućio uravnotežen pomak kamere i leća. To se pokazalo vrlo korisnim u fotografiranju divljine, kao i u bilo kojem drugom slučaju kada se koriste vrlo dugačke i teške telefoto leće: glava stabilizatora rotira leću oko njenog središta gravitacije, čime se omogućuje jednostavna i glatka manipulacija prilikom praćenja pokretnih predmeta.

Vrlo veliki sklopovi stabilizatora koriste se na velikim nadmorskim visinama u svrhu satelitskog praćenja.Stabilizatori koji sadrže više senzora također se koriste za primjenu u zračnom nadzoru, uključujući: provođenje zakona u zraku, pregled cijevi i električnih linija, mapiranje i ISR[3] . Senzori uključuju toplinsko snimanje, dnevno svjetlo, fotoaparate s niskim svjetlom, kao i laserske određivače udaljenosti i iluminatore.

[3] ISR (*engl. Intelligence Surveillance and Reconnaissance)* – Inteligencija, nadzor i izviđanje

3.1.4. Film i video

Ručni 3-osni stabilizatori koriste se u stabilizacijskim sustavima namijenjenima da operatoru fotoaparata omoguće ručno snimanje bez vibracija i podrhtavanja kamere. Pokrećući se s tri bezkolektorska motora (bez četkica), stabilizatori su sposobni održati razinu kamere u određenom položaju, kako operater pomiče fotoaparat. Inercijska mjerna jedinica reagira na kretanje i koristi tri odvojena motora za stabilizaciju kamere.

Uz pomoć algoritama, stabilizator može primijetiti razliku između namjernog kretanja kao što su hod i praćenje snimaka od neželjenog podrhtavanja. To omogućuje kameri da izgleda kao da pluta kroz zrak, učinak koji je postigao Steadicam[4] u prošlosti. Ne ograničavajući se na ručno snimanje, stabilizatori se mogu montirati na automobile i druga vozila kao što su bespilotne letjelice (dronovi), gdje bi vibracije ili drugi neočekivani pokreti učinili klasične držače kamera neupotrebljivima.



Slika 8: Stabilizator kamere [8]

[4] Steadicam je brand stabilizatora za kamere kojeg je izumio Garret Brown a predstavljen je 1975. godine od strane Cinema Products korporacije

3.1.5. Kronometri brodova

Brzina mehaničkog morskog kronometra je osjetljiva na njezinu orijentaciju. Zbog toga su kronometri normalno ugrađeni na stabilizatore, kako bi ih izolirali od kretnje broda na moru.

3.2. Odabir stabilizatora opreme

Ukoliko uzmemo u obzir da će se u našem slučaju stabilizator montirati na bespilotnu letjelicu (dron), koji pokriva 4 S.S.G. (stupnja slobode gibanja), onda će nam biti dovoljno uzeti stabilizator koji će pokrivati još 2 S.S.G.. Kako bi za stabilizator sa tri stupnja slobode gibanja bilo potrebno konstruirati dosta kompliciraniji okvir, za kojega nemamo opremu, a uvelike bi i poskupilo samo izradu, odlučili smo konstruirati ravni 2D okvir. Upravo takva vrsta konfiguracija se primjenjuje kod multirotora.

Multirotor ili multikopter je letjelica sa više od 4 aktuatora. Prednost višerotorske letjelice je jednostavnija mehanika rotora potrebna za kontrolu leta. Za razliku od helikoptera sa jednostrukim ili dvostrukim rotorima koji koriste složene varijabilne pitch rotore čija visina varira kada se lopatice okreću za stabilnost i kontrolu letenja, multirotori često koriste lopatice sa fiksnim razmakom. Kontrola gibanja letjelice postiže se promjenom relativne brzine svakog rotora za promjenu potiska i okretnog momenta koji su proizvedeni od strane svakog rotora zasebno.



Slika 9: Multirotor [9]

3.3. Odabir komponenti stabilizatora opreme

Sklop stabilizatora se sastoji od komponenti koje omogućavaju funkcioniranje sustava. Potrebno je odabrati komponente koje su dostupne na tržištu prema opremi za koju će se konstruirati stabilizator. Prema odabranim aktuatorima (motorima), bateriji i upravljačkoj jedinici, konstruirat će se okvir (frame) stabilizatora opreme.

Kako ćemo u našem slučaju izrađivati stabilizator sa dva stupnja slobode gibanja, biti će nam potrebna dva aktuatora (motora) koji će ta gibanja i omogućiti. U današnje vrijeme na tržištu se nudi raznih vrsta elektromotora, pa tako imamo motore sa četkicama (engl. brushed), motore bez četkica (engl. brushless), koračne (step) motore te RC servo motore.

Klasični istosmjerni motori s četkicama sastoje se od rotirajuće armature koja je oblikovana u obliku elektromagneta s dva pola i od statora kojeg čine dva permanentna magneta. Krajevi namota armature spojeni su na rotacijski prekidač, koji prilikom svakog okretaja rotora dva puta mijenja smjer toka struje kroz armaturni namot, stvarajući time moment koji zakreće rotor. Protjecanjem istosmjerne struje kroz vodič koji se nalazi u magnetskom polju stvara se, prema pravilu lijeve ruke, sila koja zbog svog hvatišta, koje se nalazi izvan osi rotacije rotora, stvara moment koji zakreće rotor. Električna veza između rotora i izvora istosmjerne struje se ostvaruje tako da se izvor istosmjerne struje spoji na grafitne četkice koje kližu po komutatoru. Prilikom prelaska četkica s jedne na drugu lamelu komutatora, postoji trenutak kada se izvor nalazi u kratkom spoju usred čega dolazi do iskrenja četkica. Iskrenje četkica dovodi do polaganog uništavanja grafitnih četkica, a samim time do oksidacije i trošenja komutatora, pa je samim time ovo glavni nedostatak ovakvih vrsta motora.

Zbog nedostatka kojeg uzrokuje komutator u novije vrijeme je razvijen istosmjerni motor bez četkica koji na rotoru ima permanentni magnet, dok se kroz statorske namote propušta struja koja dovodi do zakretanja rotora. Strujom koja prolazi kroz statorske namote se upravlja elektroničkim sklopom, tzv. elektroničkim komutatorom ili inverterom, koji zamjenjuje klasični komutator. Da bi se moglo ispravno odrediti kroz koji namot će elektronički komutator poslati struju, i struju kojeg smjera, takav motor mora imati senzor položaja rotora na osnovu čega se upravlja samim radom elektromotora.

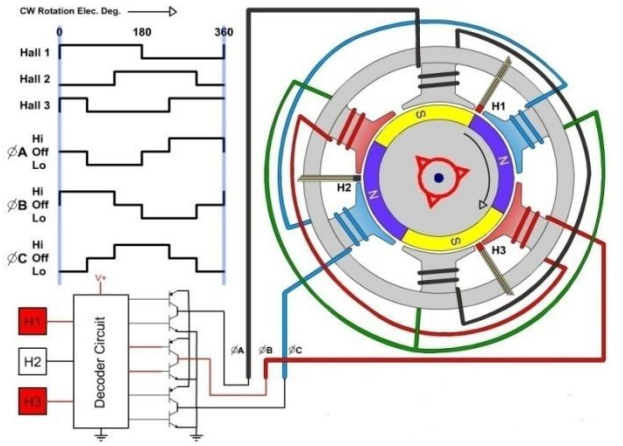
Zbog nedostatka klasičnih istosmjernih motora s četkicama, za naš slučaj ćemo odabrati BLDC motor (engl. brushless direct current) ili istosmjerni elektromotor bez četkica..

3.3.1. Bezkolektorski istosmjerni motor

Kako će na stabilizator ići GoPro kamera koja teži oko 80 grama, za naše potrebe je odabran elektromotor Quanum 2208, koji se koristi upravo kod takvih vrsta kamera.

Quanum 2208 je bezkolektorski istosmjerni motor za kamere GoPro klase

(100-200g). Dizajniran je da ima tanak profil za jednostavnu integraciju u sustav. Ima unaprijed učvršćene ležajeve za slobodnu preciznu montažu, te 14 polova (najviše za motor te veličine) za ultra glatko kretanje.



Slika 10: Shema bezkolektorskog motora [10]

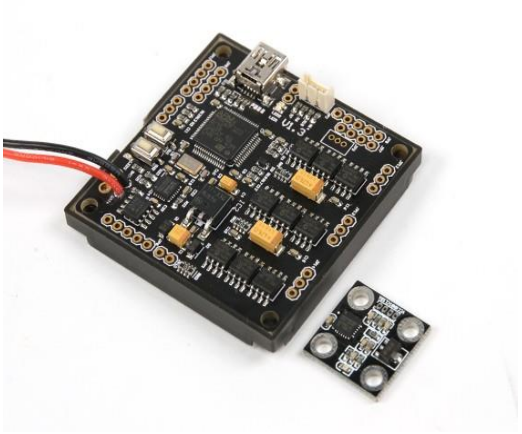


Slika 11: Motor Quanum 2208 [11]

3.3.2. Upravljačka jedinica

Upravljačka jedinica je centralni dio mikroprocesora koji regulira i orkestrira izvršavanje naredbi koji su sastavni dio nekog procesora ili mikroprocesora. Mnogi procesori/mikroprocesori sastavni su dio većih cjelina, a i sami procesor odnosno mikroprocesor sa sastoji od raznih dijelova kao: ALU, međuspremnika, predmemorija, programskog brojila, spremnika stanja, adresnog međuspremnika, podatkovnog međuspremnika, instrukcijskog međuspremnika, itd. Ovi svi dijelovi ne mogu raditi u isto vrijeme već mora postojati neki redosljed kojim se ti pod dijelovi uključe i isključe i kada koji dio procesora/mikroprocesora obavlja svoj rad. Ovaj redosljed može biti orkestriran sinkrono ili asinkrono.

Postoje razna riješenja kako je izvedena upravljačka jedinica od kojih su dva najzastupljenija riješenja: mikroprogram i tvrdo-užićenje. Ta dva spomenuta riješenja uvjetovana tehnologijom i vremenom kada su izrađeni neki procesori/mikroprocesori i naravno izborima tehnološkog tima prilikom dizajna tog procesora ili mikroprocesora. Kod tvrdo-užićene izvedbe izravno, odnosno žičano su spojeni svi dijelovi CPU-a na upravljačku jedinicu. Dok kod mikroprograma upravljanje ostalih dijelova CPU-a se obavlja izvršavanjem skupa manjih radnji koje su kodirane u mikroprogram. Mikroprogram je pohranjen u kontrolnoj memoriji dok redosljed naredbi mikroprograma održava posebna jedinica zvana mikrosljedbenik. Mikrosljedbenik izvršava naredbe u mikroprogramu u onom slijedu u kojem su zapisane.



Slika 12: Upravljačka jedinica [12]

3.3.3. Napajanje

Na tržištu imamo više vrsta baterija, od nikl-kadmijumskih (NiCd), niklov metalni hidrid (NiMH) pa do litijum polimernih (LiPo), litijum-željezo-fosfatnih (LiFe).

Najstarije po tehnologiji izrade su nikl-kadmijumske (NiCd) baterije. Za njih mnogi tvrde da imaju memoriju pa da se stoga moraju prije svakog punjenja potpuno isprazniti. Memorija baterije je efekat koji nastaje kada bateriju punimo a ona već u sebi ima pohranjene električne energije. Tada stanje baterije prije punjenja postaje minimalno stanje do kojeg će se baterija isprazniti što znači da smo efektivno izgubili sav kapacitet koji je bio preostao u bateriji.

Za ovakvu bateriju bitno je da nam punjač ima opciju pražnjenja kako bi baterija sačuvala kapacitet i nakon mnogo ciklusa. Baterije ove tehnologije izrade gube 10-20 % punjenja za mjesec dana nekorištenja. Nikl kadmijumske baterije se mogu puniti brzo, međutim pri tome stvaraju velike količine topline. Ćelija NiCd baterija je napona 1.2V a koriste se u seriji spojeno 7 ili 8 ćelija čime dobijamo baterije napona 8.4V i 9.6V.

Niklov metalni hidrid (NiMH) baterije imaju manje izraženu memoriju od nikl kadmijumskih baterija pa ih je moguće puniti i kada nisu potpuno ispražnjene. Specifična snaga im je veća tj. NiMH baterije imaju veći napon/kapacitet od NiCd baterija iste veličine. Sporije se prazne kada nisu u upotrebi od nikl kadmijumskih baterija. Međutim sporije se pune jer se ne smiju puniti preko određene struje a i cijena im je nešto veća nego za NiCd baterije. Napon pojedinačne ćelije je 1.2V. Slabost obje vrste nikl baterija je podložnost promjenama performansi uslijed promjene temperature.

Litijumskih baterija ima više vrsta a najčešće su u upotrebi litijum polimerne (LiPo) i litijum-željezo-fosfatne (LiFe ili LiFePo4). Općenito, prednost litijumskih baterija nad nikl baterijama je što su u stanju dati mnogo veći intenzitet struje radi manjeg unutrašnjeg otpora a to dovodi do znatno boljih performansi nego kod nikl baterija istog ili većeg napona. Tako LiPo baterija napona 7.4V ima performanse slične NiMH bateriji napona 9.6V. Razlog tome je što kada litijumska baterija daje struju 20A i više njen napon neosjetno opadne (mali unutrašnji otpor) dok baterije na bazi nikla pri tako velikom protoku struje nisu u stanju održati nominalni napon od oko 9.6V već on pada čak i na vrijednosti niže od nominalne vrijednosti litijumske baterije od 7.4V.

Litijum polimerne baterije se danas nalaze u velikom broju mobilnih uređaja zbog velike specifične snage (lagane su i manje prostora zauzimaju). Nemaju memoriju, električnu energiju zadržavaju jako dugo i kada se ne koriste. Mogu se puniti dosta brzo ali obavezno uz neku vrstu pametnog punjača. Bitno za napomenuti je i to da se ne pune preko istog kabela preko kojeg se i prazne već za to imaju poseban priključak koji osigurava da su sve ćelije podjednako pune. Za razliku od NiCd i NiMH baterija imaju mali unutrašnji otpor što znači da pri naglom pražnjenju ne doživljavaju velike padove u naponu što ujedno objašnjava zašto LiPo baterije imaju najveću brzinu pražnjenja (*discharge rate,* C oznaka na bateriji). Ujedno se LiPo baterije mogu naći u bilo kojem obliku za razliku od NiCd i NiMH baterija koje se uvijek sastoje iz cilindričnih ćelija. Napon pojedinačne LiPo ćelije je 3.7V pa njihovim uvezivanjem u seriju dobijamo baterije od 7.4V i 11.1V. Za razliku od nikl baterija performanse litijumskih baterija ne opadaju pri padu temperature.

Za naš konkretan slučaj, biti će potrebno isporučivati napon koji iznosi oko 12V, kako bi to bilo omogućeno, odabrati ćemo litijum polimernu bateriju Turnigy 500, odnosno baterija sa tri ćelije od 500 mAh. Kako kod litijum polimernih baterija svaka ćelija uvijek sadrži 3.7V, baterija će uvijek moći isporučiti napon od 11.1V.

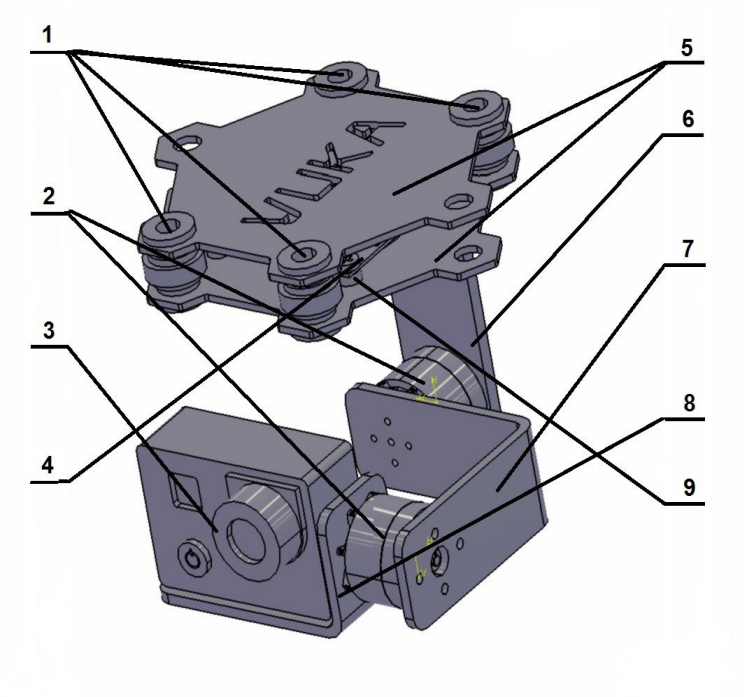


Slika 13: Napajanje [13]

4. KONSTRUIRANJE STABILIZATORA OPREME

Za konstruiranje modela stabilizatora opreme s dva stupnja slobode gibanja korišten je softver Catia V5R19.

4.1. Dijelovi stabilizatora opreme



Slika 14: Sklopni crtež stabilizatora

R.B.	OPIS
1.	ANTIVIBRACIJSKE GUMICE
2.	BEZKOLEKTORSKI MOTORI
3.	GO PRO KAMERA
4.	UPRAVLJAČKA JEDINICA
5.	PLOČICE
6.	GLAVNI OKVIR
7.	ROLL OKVIR
8.	OKVIR ZA KAMERU
9.	ODSTOJNICI

Tablica 1: Popis dijelova stabilizatora opreme

4.2. Popis komponenata stabilizatora opreme

NAZIV	**SKLOP (PRODUCT)**	**DIO (PART)**
BLDC-BEZKOLEKTORSKI ISTOSMJERNI MOTOR	Quanum 2208	Kuciste_motora_donje
		Kuciste_motora_gornje
		Osovina
		Seger
		Permanentni_magnet
KONSTRUKCIJA OKVIRA	Okvir 1	Glavni okvir
	Okvir 2	Okvir za kameru
	Okvir 3	Roll okvir
UPRAVLJAČKA JEDINICA	Kontroler	Plocica_kontrolera
ANTIVIBRACIJSKE GUMICE	Gumice	Gumica
KAMERA	Gopro kamera	GoPro_kamera
PLOČICE	Pločice	Plocica
		Ploca_donja
NAPAJANJE	Turnigy bolt	Baterija
ODSTOJNICI	Odstojnici	Odstojnik

Tablica 2: Popis komponenti stabilizatora opreme

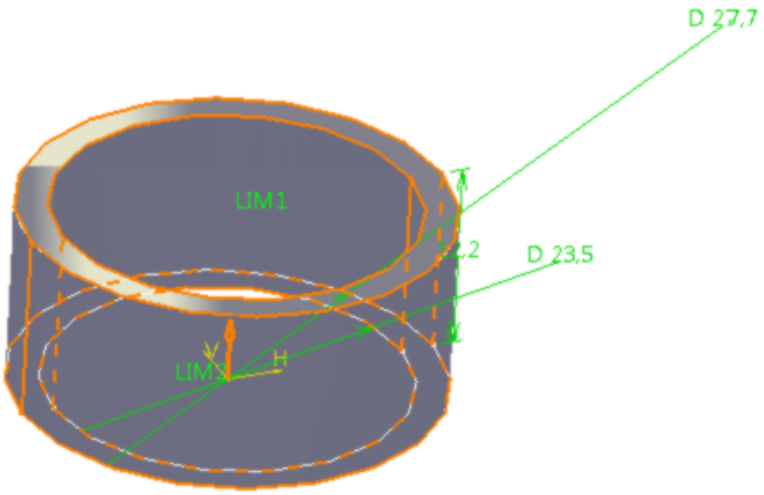
4.3. Modeli komponenata

4.3.1. BLDC motor

Motor se sastoji od 5 dijelova (partova), od čega gornje kućište motora u sklopu sa osovinom i segerovim prstenom čini rotor motora. Statorski dio motora čine donje kućište te permanentni magneti unutar kućišta.

Opisati ću ukratko postupak konstruiranja gornjeg (rotorskog) dijela kućišta motora.

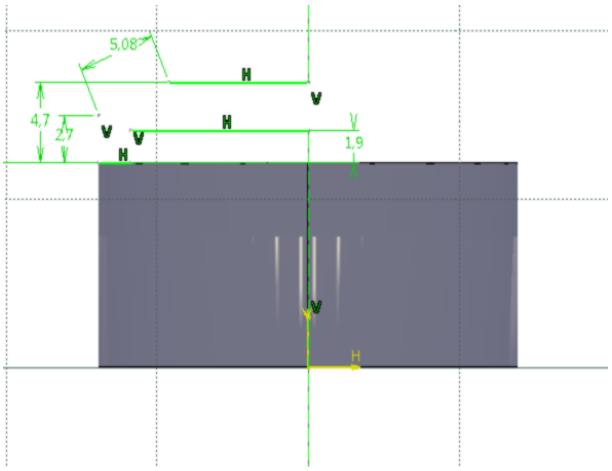
Nakon pokretanja Catie, odabiremo Start, u padajućem izborniku naredbu Mechanical Design te odabiremo Part Design. Zatim odabiremo ravninu u kojoj ćemo crtati, odabiremo XY ravninu i ulazimo u Sketch. U toj ravnini konstruiramo dvije kružnice koje su koincidentne sa središtem koordinatnog sustava. Upišemo potrebne dimenzije kružnica i nakon što smo to napravili, naredbom Exit Workbench izlazimo iz Sketch-a i nastavljamo dalje sa radom. Izlaskom iz Sketch-a odabiremo naredbu Pad, tom naredbom radimo ekstrudiranje, nakon što upišemo potrebne dimenzije, dobijemo sljedeći rezultat:



Slika 15: Kućište motora u fazi modeliranja 1

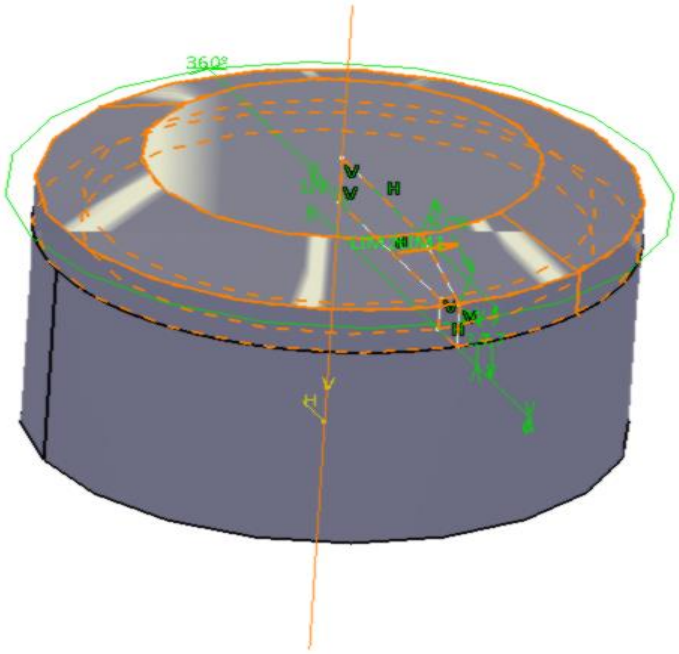
Zatim odabiremo YZ ravninu i ponovno ulazimo u Sketch. Naredbom Project 3D elements projiciramo bočne strane prethodno ekstrudiranog sketcha i označimo ih kao

pomoćne (construction elements). Odabiremo naredbu profile, nacrtamo željeni oblik i definiramo ga s obzirom na prethodne pomoćne linije, te ga kotiramo. Sketch ponovno pozeleni i možemo ga zatvoriti.



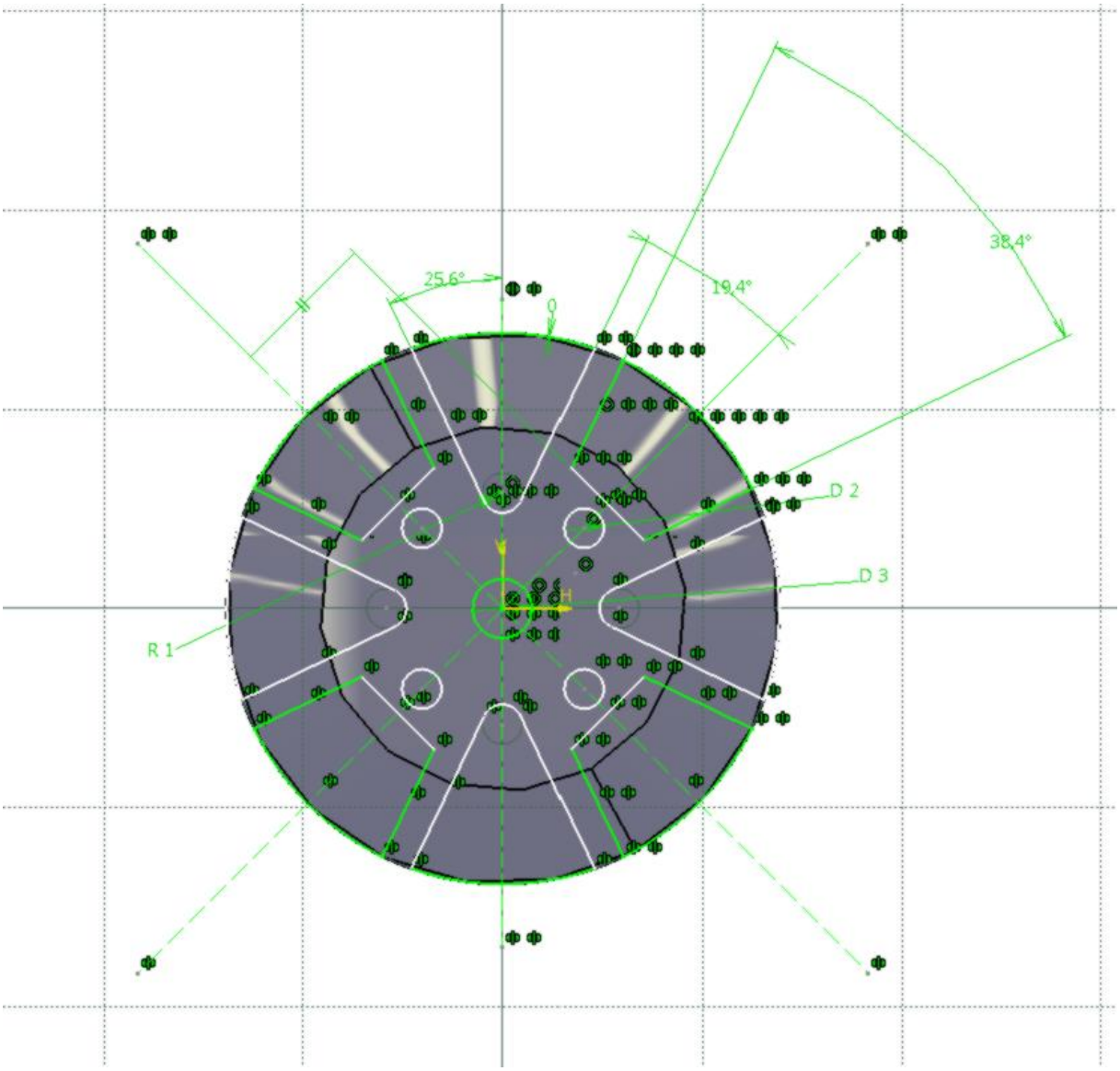
Slika 16: Kućište motora u fazi modeliranja 2

Nakon što smo zatvorili Sketch odabiremo narebu Shaft i dobivamo sljedeće:



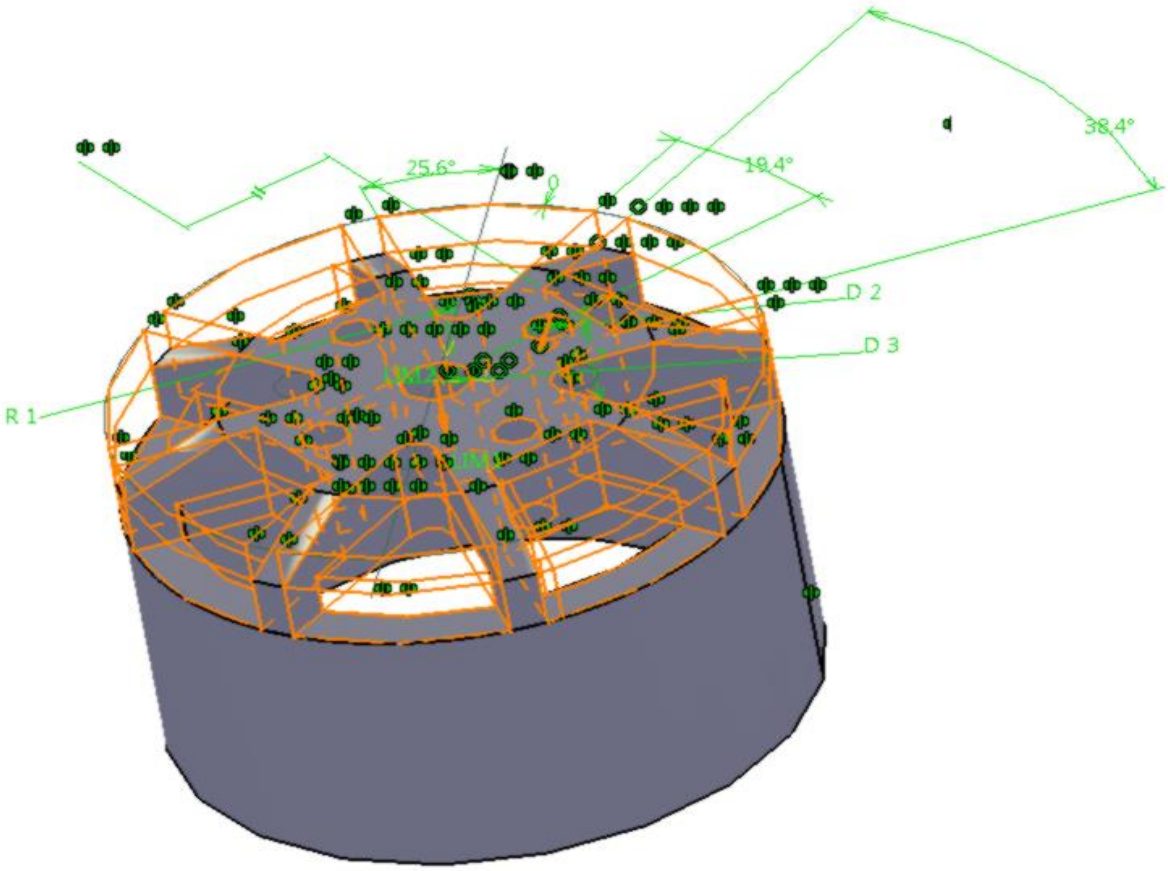
Slika 17: Kućište motora u fazi modeliranja 3

Zatim odabiremo XY ravninu, ponovno ulazimo u Sketch i konstruiramo sljedeći oblik:



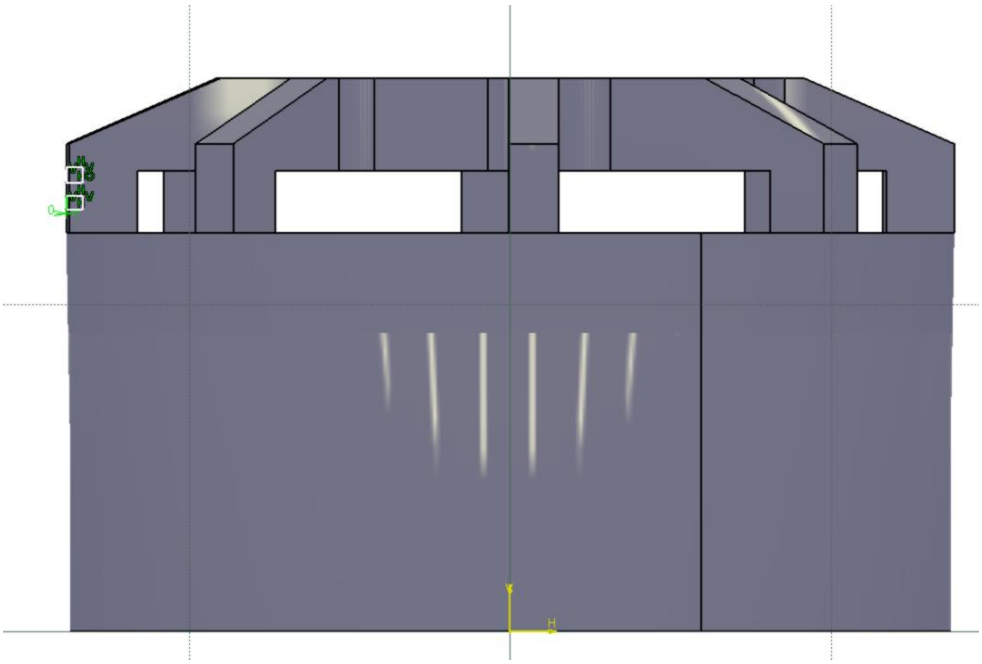
Slika 18: Kućište motora u fazi modeliranja 4

Kada definiramo geometriju, ponovno izlazimo iz Sketcha odabirom naredbe Exit Workbench i odabiremo naredbu Pocket, kao rezultat dobivamo sljedeće:



Slika 19: Kućište motora u fazi modeliranja 5

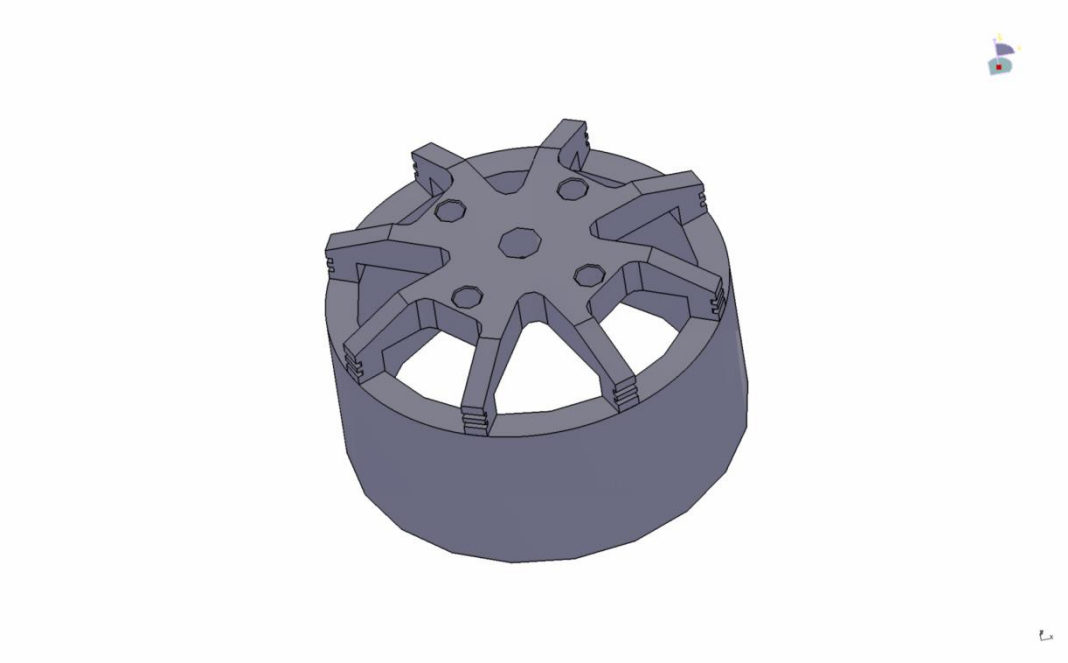
Zatim odabiremo ravninu YZ te naredbom Profile na rubove konstruiramo dva mala utora kao na slici:



Slika 20: Kućište motora u fazi modeliranja 6

Odabiremo naredbu Groove, izlazimo iz Sketcha.

Kada smo naredbama Chamfer i Edge Fillet konstruirali sva potrebna skošenja, odnosno radijuse, dobivamo završni oblik kao na slici.



Slika 21: Gornje kućište motora

Na sličan način konstruiramo i ostale komponente od kojih se sastoji motor, te nakon što smo završili sa time pripremamo dijelove za izradu sklopa. Najprije je potrebno u CATIA-i otvoriti svaki dio koji trebamo za kreiranje našeg sklopa. Naš sklop sastojati će se od pet dijelova:

Part 1: Kuciste_motora_gornje.CATPart

Part 2: Kuciste_motora_donje.CATPart

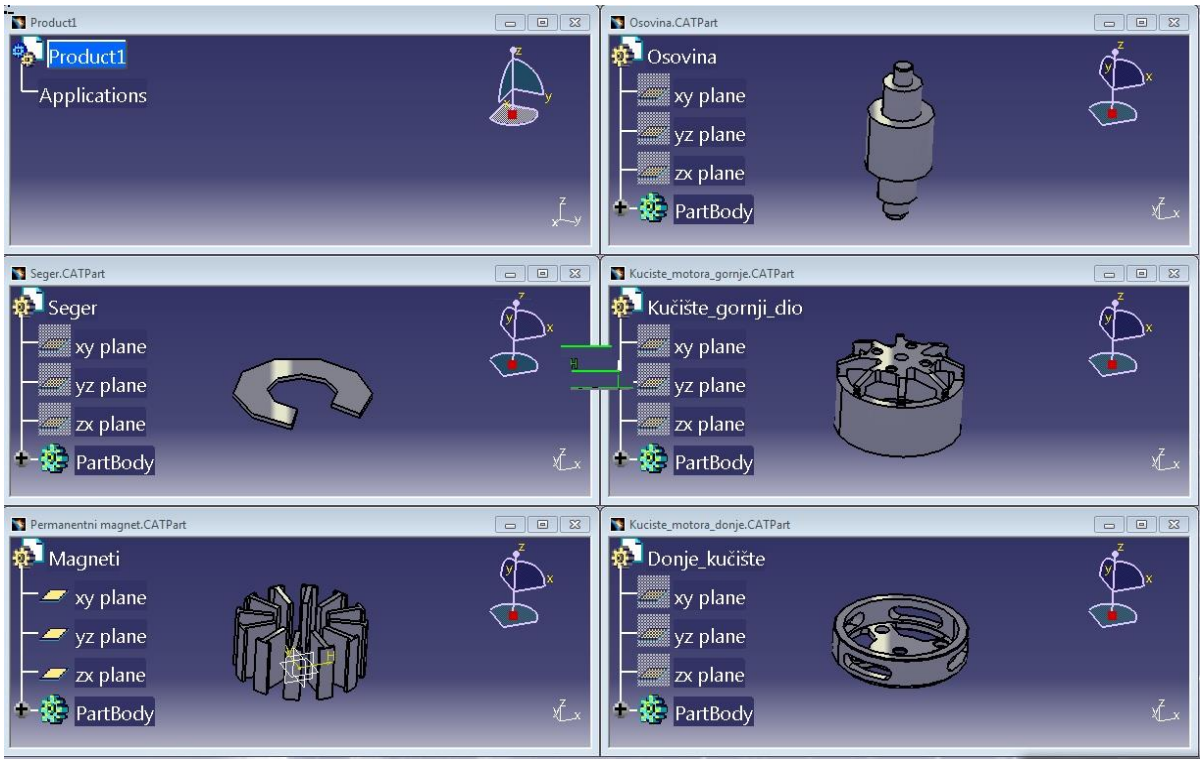
Part 3: Osovina.CATPart

Part 4: Seger.CATPart

Part 5: Permanentni_magnet.CATPart

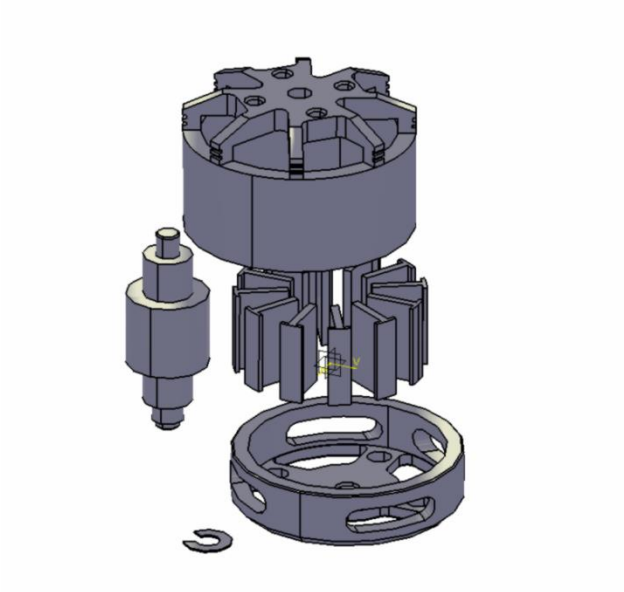
Otvaramo novi sklop (New-Product). Sada ćemo funkcijom Window-Tile Horizontally podijeliti ekran tako da budu vidljivi svi dijelovi (Partovi) i sklop (Product).

Dobivamo sljedeće:



Slika 22: Izrada sklopa motora

Sada smo spremni za početak slaganja sklopa. Odabiremo prvu komponentu (Part). Kliknemo desnom tipkom miša na naziv komponente i odabiremo naredbu Copy. Nakon toga u prozoru sklopa (product) kliknemo desnom tipkom na naziv produkta ili pripadajuću mu ikonu, te iz menija odabiremo naredbu Paste. Time smo u sklop ubacili prvu komponentu. Isto napravimo i sa preostalim komponentama, te dobivamo sljedeće:



Slika 23: Sklapanje komponenti motora

Sljedeća faza je dovođenje komponenti u približan relativni položaj ali dovoljno razmaknute kako bi sve plohe bile dostupne za selektiranje. Koristimo funkciju Manipulation. Ona nam omogućava translaciju pojedine komponente uzduž osi X, Y, Z ili duž pravca definiranog postojećom geometrijom. Također je moguće translatirati komponentu po odabranoj ravnini (u bilo kojem smjeru), te rotacija komponente oko odabrane osi (Vrijedi isto kao i za translaciju tj. X, Y, Z ili selektirana geometrija).

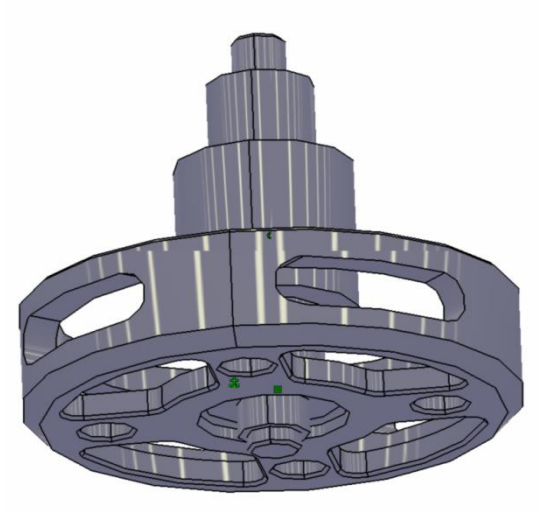
Sljedeći korak je definiranje točnih relacija između pojedine dvije komponente. Za to nam služe funkcije Fix, Coincidence Constraint, Contact Constraint, Offset Constraint i Angle Constraint.

Najprije ćemo funkcijom Fix fiksirati part Kuciste_motora_donje.CATPart unutar produkta. Time će nam on postati osnovna komponenta na koju ćemo dodavati sve ostale. Selektiramo odgovarajuću ikonu (sidro) i zatim komponentu koju želimo fiksirati. Na njoj se zatim pojavi zeleno sidro kao oznaka Fix Constraint-a.

Nakon toga ćemo povezati kućište koje smo fiksirali i osovinu. Povezujemo ih s dva constrainta:

a) Contact Constraint između donjeg unutarnjeg ruba kućišta i donje površine debljeg dijela osovine. Kliknemo na ikonu, selektiramo površine na komponentama. Ukoliko je uključena opcija automatic update-a, komponente će se postaviti u zadani položaj, istovremeno će se pojaviti oznaka constrainta na komponentama.
b) Coincidence Constraint između osi osovine i osi donjeg kućišta motora.

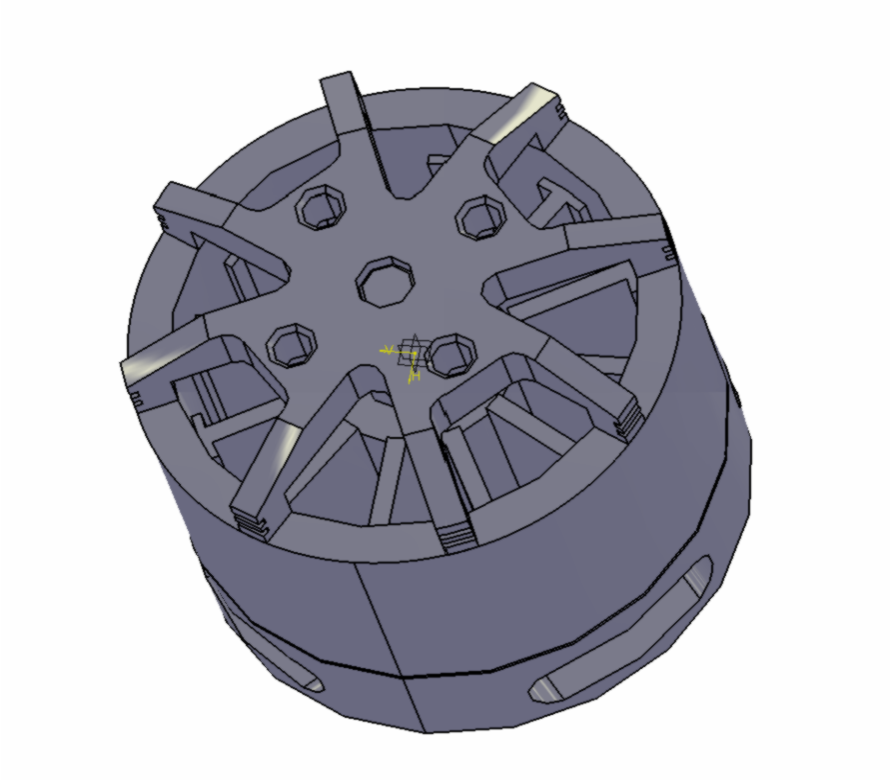
   Selektiramo funkciju, zatim bilo koju cilindričnu površinu na kućištu. Pojavi se os kao parametar. Na isti način selektiramo i os osovine. Ovime smo međusobno poravnali glavne osi ovih komponenti što uz prethodni constraint potpuno definira njihov međusobni položaj.



Slika 24: Sklop osovine i donjeg kućišta

Na isti način sklapamo i preostale komponente, te kao rezultat dobivamo kompletni sklop motora, koji bi trebao izgledati kao na slici:

Razlog zbog kojeg smo se odlučili konstruirati motor je dobivanje točnih fizikalnih parametara odnosno inercije mase, koja će nam kasnije biti potreba pri analizi i konstruiranju okvira.



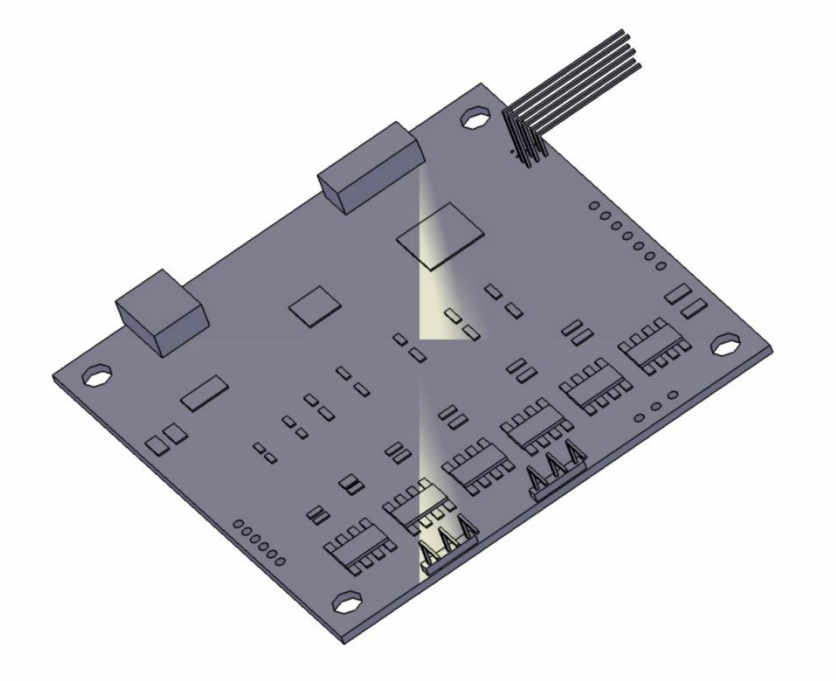
Slika 25: Quanum 2208 sklop

SPECIFIKACIJE:

NAZIV	**VELIČINA**
TEŽINA KAMERE KOJU MOŽE PODIĆI	100-200 g
BROJ POLOVA	14P12S
KV	114
IDEALNA STRUJA	0.03 A
OTPOR	23 m(ohma)
TEŽINA	39 g
NAPON	6-14 V (2-3 lipo ćelije)
DONJE MONTAŽNE RUPE	16 x 19 mm
GORNJE MONTAŽNE RUPE	12 mm (od rupe do rupe)
MONTAŽNE RUPE	M3

Tablica 3: Specifikacije motora

4.3.2. Upravljačka jedinica



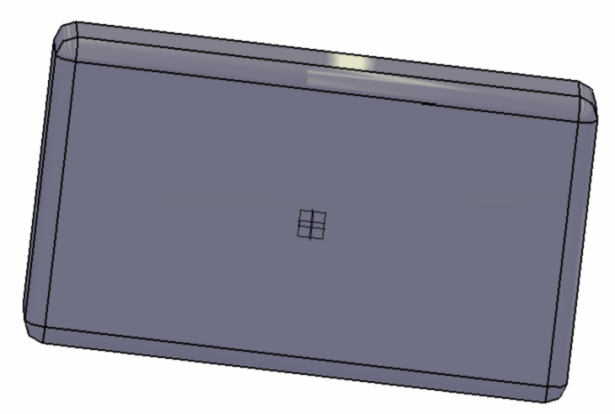
Slika 26: Upravljačka jedinica

SPECIFIKACIJE:

NAZIV	VELIČINA
BROJ STABILIZACIJSKIH OSI	2
NAPAJANJE	8.18 V (3S-4S LiPo)
MAKSIMALNA STRUJA	2.8 A
DIMENZIJE UPRAVLJAČKE JEDINICE	50 x 50 mm
DIMENZIJE MONTAŽNIH RUPA	M 3.45 mm

Tablica 4: Specifikacije upravlječke jedinice

4.3.3. Napajanje



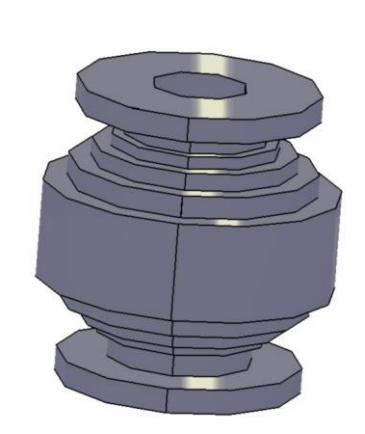
Slika 27: Baterija

SPECIFIKACIJE:

NAZIV	VELIČINA
KAPACITET	500 mAh
NAPON	11.1 V
PRAŽNJENJE	20C konstantno
TEŽINA	49 g
DIMENZIJE	56 x 30 x 19 mm
PRIKLJUČAK ZA PUNJENJE	JST-XH

Tablica 5: Specifikacije baterije

4.3.4. Antivibracijska gumica



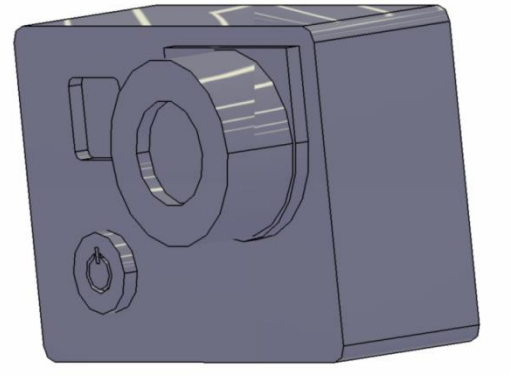
Slika 28: Antivibracijska gumica

SPECIFIKACIJE:

NAZIV	**VELIČINA**
IZOLACIJSKI OPSEG	100 g (po gumici)
TEŽINA	1.8 g (po gumici)
VELIČINA	21 mm (vrh priruvnice do dna prirubnice)
ŠIRINA	9 mm (u najširoj točci)
MONTAŽA	Rupe 9 mm

Tablica 6: Specifikacije antivibracijske gumice

4.3.5. Kamera



Slika 29: Gopro kamera

5. IZRADA STABILIZATORA OPREME

U današnje vrijeme, kada je tehnologija napredovala jako puno i kada se na tržištu nudi mnogo opcija za samu izradu, uključujući i aditivne postupke izrade a kako bi proces izrade bio što jednostavniji i povoljniji, odlučili smo izraditi okvire (frame-ove) za stabilizator upravo pomoću takve vrste tehnologije.

5.1. Aditivna tehnologija

Aditivna tehnologija pojavljuje se od druge polovine 80-ih godina prošlog stoljeća. Primjenjuje se u sektoru 2D tiska i 3D ispisa (struktura opskrbnog lanca u automobilskoj i zrakoplovnoj industiji).

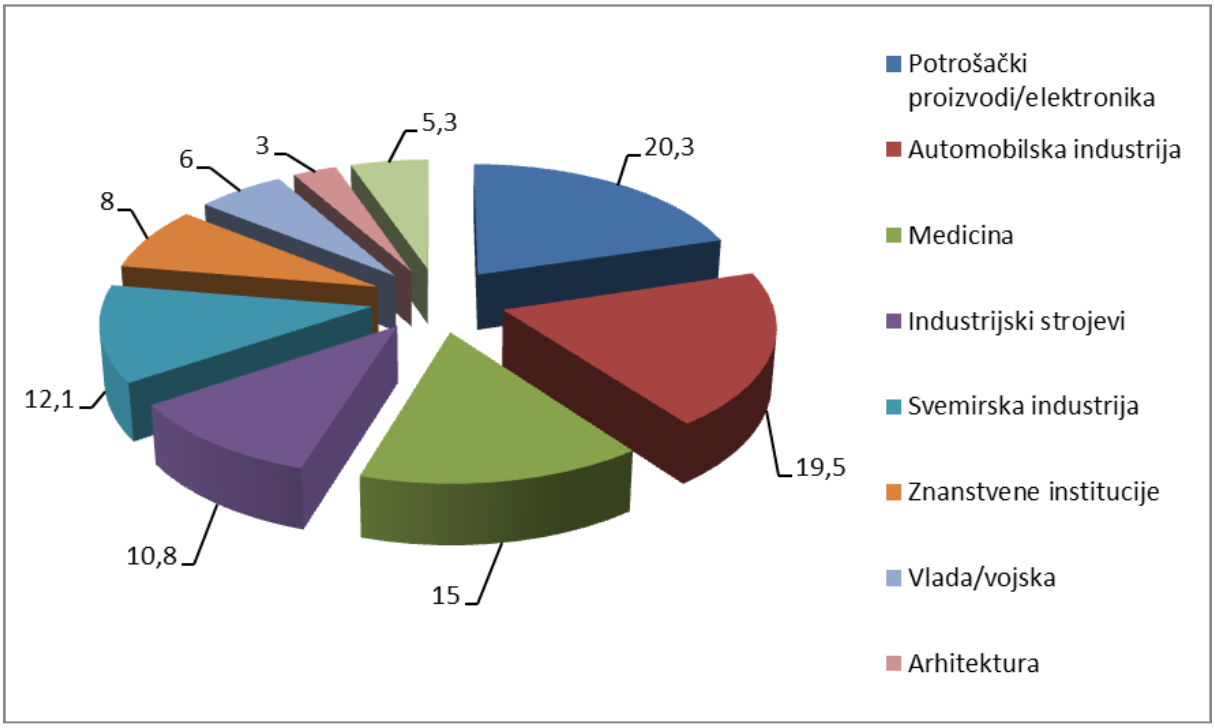
Aditivna tehnologija odnosi se na skupinu tehnologija koje proizvode fizičke, kompjuterski dizajnirane predmete (*engl. Computer Aided Design-CAD*). Pojam izravna proizvodnja je sinonim za aditivnu proizvodnju. Aditivna proizvodnja se temelji na digitalnoj tehnologiji za proizvodnju fizičkih objekata , sloj po sloj iz trodimenzionalno računalno potpomognute datoteke.

Prednosti aditivne tehnologije :

- Dizajniranje, izrada prototipova, serijska proizvodnja ;
- Nisu potrebni alati za proizvodnju kakve uglavnom poznajemo ;
- Mogućnost povećanja geometrijske složenosti proizvoda ;
- Povećanje mogućnosti oblikovanja proizvoda ;
- Smanjeni troškovi proizvodnje ;
- Smanjeno vrijeme proizvodnje.

5.2. Razvoj i primjena aditivnih tehnologija

1. Brza izrada prototipova (*engl. Rapid Prototyping*)
2. Primjena aditivnih tehnologija za proizvodnju polimernih, keramičkih ili metalnih alata i kalupa (*engl. Rapid Tooling*)
3. Izravna maloserijska ili velikoserijska izrada gotovih proizvoda (*engl. Rapid Manufacturing*)



Slika 30: Grafikon područja primjene aditivne proizvodnje u 2012. godini

5.3. FDM ili FFF tehnologija izrade

Fused Deposition Modeling ili Fused Filament Fabrication su nazivi za identičnu tehnologiju izrade modela polaganjem otopljenog materijala slojevito, jedan sloj na drugi . Princip rada je da se nacrtani CAD model ubaci u računalni software koji se popularno nazivaju „sliceri“, čija je zadaća generiranje G-koda koji stroju određuje parametre modela, temperaturu mlaznice i brzinu ispisa. Stroj zatim pomicanjem mlaznice po radnom prostoru stroja razvlači rastopljenu i spljoštenu plastičnu nit, te time čini konturu modela. Plastika se zagrijava do poluotopljenog stanja nakon čega je numerički upravljana mlaznica raspoređuje po površini radne ploče. Radna površina može, ali i ne mora biti zagrijana, makar se u zadnje vrijeme sve više koristi zagrijana ploča pri izradi modela od ABS plastike.

Ova tehnologija je dosta fleksibilna što se tiče mogućnosti izrade modela. Modeli mogu imati unutrašnje šupljine, nagibe, zakrivljenja, provrte i ostale značajke potrebne za funkcionalnost modela. Međutim, postoje ograničenja što se tiče nagiba, ne preporuča se nagib preko 45° bez korištenja potpornog materijala. Kvaliteta i mehanička svojstva ovise o parametrima ispisa, poput visine sloja, unutrašnje ispune modela, broja horizontalnih slojeva modela, te svojstvima samog materijala.

Izrada je slojevita, što znači da se nakon svakog završenog sloja radna površina ili sklop X i Y osi podigne za visinu sloja, te printer nastavlja sa izradom tog sloja. Pošto je proizvodnja takva, vanjski izgled i zaglađenost površine ovisi i debljini sloja. Što je sloj tanji to je dulje vrijeme printanja, ali je završna kvaliteta modela mnogo veća nego kada se koristi veća visina sloja što ubrzava proces izrade.

Tipične vrijednosti visine sloja su između 0,15-0,25 mm ali se koriste i slojevi raspona 0,05-0,5 mm, ovisno o primjeni i promjeru mlaznice. Visina mlaznice također odeređuje i troškove samog postupka, jer velike grube modele možemo izraditi relativno brzo sa većim promjerom mlaznice što automatski određuje i veću visinu sloja i tako smanjuje vrijeme izrade. Pri biranju parametara stroja pod kojima se smatra brzina, temperatura, akceleracija pojedninih osi, visina sloja, postavke retrakcije materijala i ostalih, treba voditi računa o smaom stroju.

Pošto je proces izrade slojevit, vrlo je važno odabrati pravilnu orijentaciju modela tokom izrade. To je najbitniji dio pripreme CAD modela za izradu ovom tehnologijom, jer

pravilan raspored sila osigurava model od pucanja tokom uporabe. Ako s emodel neće koristiti pod nekim opterećenjem, orijentacija mkodela nije bitna. Vrlo je važno najprije znati kako će se model koristiti nakon izrade, pod kakvim će s eopterećenjima biti i pod kojim temperaturnim uvjetima će se vršiti eksploatacija. Kao i kod svih vlaknastim materijala, modeli su najčvršći kada je sila usmjerena u istom pravcu sa vlaknima. Zbog toga se pri FDM tehnologiji izrade slojevi rade okomito jedan na drugi kako bi se postiglo što je veća moguća kombinacija orijentacija vlakana, tako da se opterećenje može podnesti u svim smjerovima djelovanja što je bolje moguće.

Primjena FDM metode izrade počela je dobivati sve šire raspone primjene napretkom strojeva i materijala, što se odrazilo i na sve veću kvalitetu samih modela. Prije su modeli služili smao kao grubi prikaz nekog dijela prilikom dizajniranja, te razrade nekog sklopa. Sada FDM tehnologija zastupa prvenstveno izradu prototipova visoke kvalitete ali se sve više i više koristi kako bi se napravili strojevi sastavljeni od 3D printanih dijelova . Trendovi se mijenjaju, tako da se sada nastoji izrađivati modele spremne za prodaju i uporabu direktno iz 3D printera, bez naknadne obrade.

5.4. Materijali za 3D printanje

Najbitnije od svih postavki su postavke temperature mlaznice i radne površine. Svaki materijal ima drugačiji sastav, te o tome ovisi na koliko stupnjeva on počinje prelaziti iz krutog u tekuće stanje. Temperatura prelaska materijala je različita čak i za isti materijal, istog proizvođača ali različite boje. Cilj je točno odrediti temperaturu na kojoj je materijal dovoljno otopljen, da bez problema izlazi iz mlaznice u jednom kontinuiranom toku, bez prekida, bez grudica ali s druge strane dovoljno krut, da se ohladi što je brže moguće kako bi se smanjila mogućnost deformiranja uslijed promjene temperature. To se postiže jedino probnim ispisom nekoliko manjih modela, kako bi se ustanovilo na kojoj se temperaturi materijala ponaša najbolje. Za PLA materijal idealna temperatura se nalazi u području od 180-220°C što ovisi o vlažnosti materijala, da li je materijal prirodan ili obojan, te o proizvođaču. Pri korištenju PLA materijala grijana radna površina nije presudna jer je materijal dovoljno toplinski stabilan da ne dolazi do odvajanja modela od površine i deformiranja uslijed hlađenja.

Prilikom printanja ABS i ostalih egzotičnih materijala, preporučuje se imati grijanu ploče temperature između 70-100°C kako bi model bio dovoljno zagrijan, da se ne hladi prevelikom brzinom što dovodi do pucanja slojeva ili ekstremne deformacije modela. Hot-end bi trebao biti zagrijan od 230-250 °C, također zbog ovisnosti kvalitete materijala. ABS plastika se koristi u slučajevima kada bi se model koristio u uvjetima većih temperatura jer ABS bolje podnosi temperature što se vidi iz temperature koja je potrebna za uspješnu izradu modela.



Slika 31: Materijal za 3D ispis

5.5. Strojevi (3D printeri)

FDM 3D printeri su popularni zadnjih desetak godina, što je dovelo do njihovog razvoja u nekoliko osnovnih varijanti. Iako im je svima funkcija potpuno ista, razvoj svakog pojedinog 3D printera je moguć zbog toga što korisnik može napraviti poboljšanja samo za svoj stroj ili ih podijeliti sa drugima kako bi i oni svoj stroj učinili boljim. Takav način unaprijeđenja strojeva je doveo do toga da se printeri dijele u 3 osnovne kategorije:

1. Printeri koji funkcioniraju na osnovui kartezijeva sustava
2. Delta printeri
3. CORE XY

1.Printeri napravljeni prema kartezijevu sustavu

Karakterizira ga jednostavnost izrade, namještanja samog stroja, te je svaka os napravljena za sebe, bez utjecaja na druge dvije osi. Klasični 3D printeri imaju raspored osi X,Y i Z te su one raspoređene po Kartezijevom sustavu, otkuda i naziv. Najčešći strojevi su napravljeni na način da se ekstruder nalazi na pomičnom nosaču koji klizi po X osi koja je pričvršćena na nosače ležajeva Z osi, koja klizi po šipkama. Znači da sa 3 dijela printera već imamo sklopljene dvije osi. To je također još jedna prednost, jer se cijeli stroj može napraviti uz minimalni broj dijelova potrebnih za sastavljanje, što dovodi do smanjenja cijene i vremena potrrebnog za samo sklapanje stroja.

Nadalje, Y os je pokretna i na njoj se nalazi radna ploča na koju ekstruder polaže materijal . One su raznih dimenzija, mogu biti grijane ili ne grijane, ovisno o materijalu koji se na stroju primjenjuje ali i cjenovnom rangu printera.

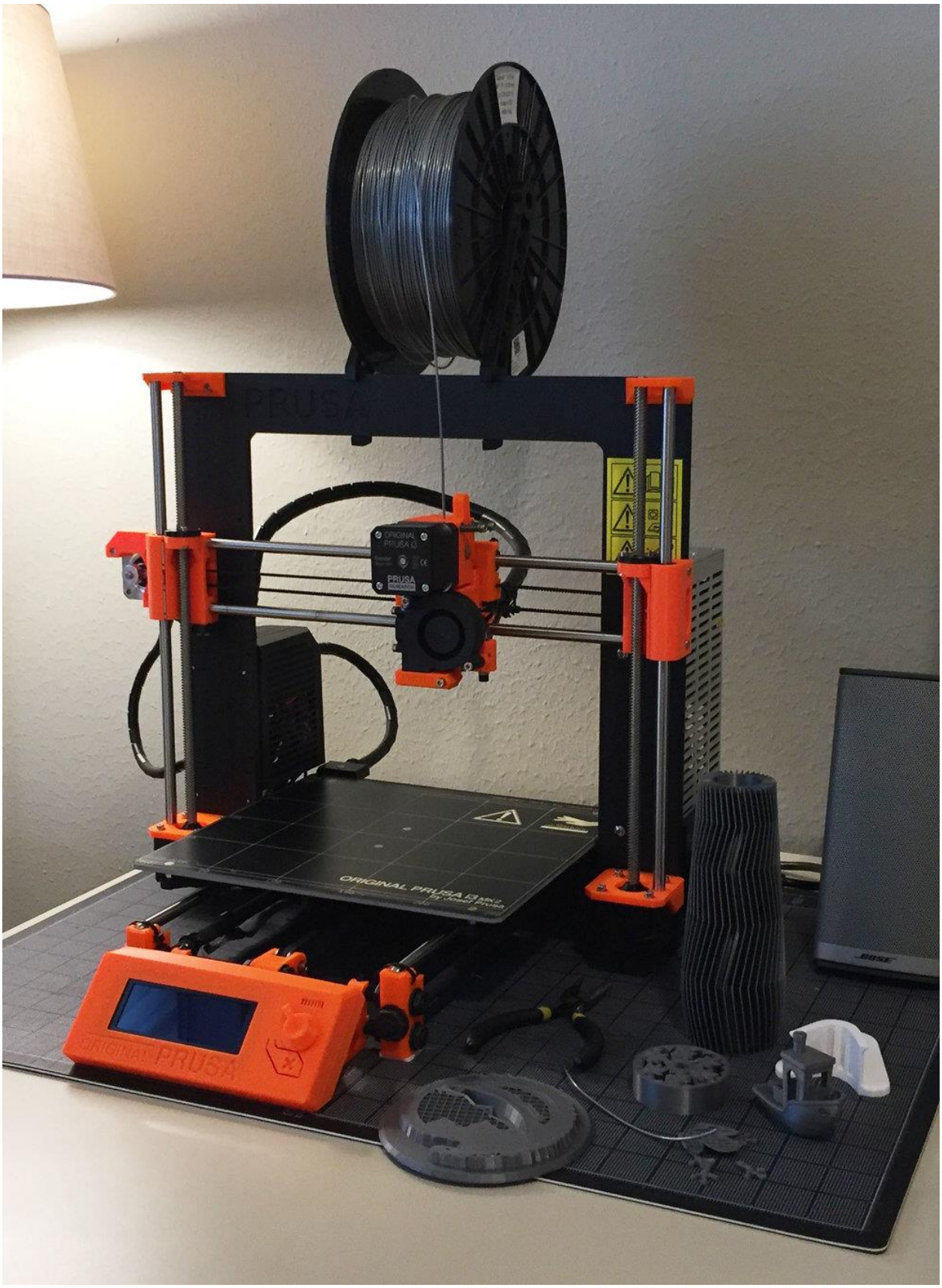
2.Delta printeri

Delta printere karakterizira nepomična radna ploča, pretežito okruglog oblika te 3 ruke koje pozicioniraju središnji dio na kojem se nalazi ekstruder . Taj središnji dio se naziva efektor, te on spaja 3 pomične ruke u jednu cjelinu. Kretanje ekstrudera u radnom prostoru omogućuje razlika u položaju nosećih ruku tako da ako se svi 3 ruke jednakom brzinom pomiču prema gore, cijeli sklop efektora s rukama se pomiče prema gore a ako se ruke različito pozicioniraju, rezultat je pomicanje efektora s ekstruderom lijevo, desno, naprijed ili natrag.

3.Core XY

Core XY printeri su printeri veoma slični kartezijevim printerima, razlika je jedino u povezivanju stepper motora sa Xi Y osima. Kod ovog načina izrade printera, koristi se po jedan stepper motor sa svaku os ali s posebnim načinom povezivanja remenja.

Konkretno za naš slučaj, koristiti ćemo 3D printer po imenu Original Prusa i3 MK2 koji pripada prvoj skupini 3D printera koja radi na principu kartezijeva koordinatnog sustava.



Slika 32: Prusa i3 MK2

Nakon modeliranja u CATI-a alatu, naš Part ima format datoteke .Part, kako bi omogućili izradu na 3D printeru, taj format moramo prebaciti u .STL.

STL (StereoLitography) je format datoteke povezan za stereolitografski CAD softver kojeg su stvorili 3D sustavi. Ovaj format datoteke podržava mnoge druge softverske pakete, široko se koristi kod izrade prototipova, 3D tisak i računalno potpomognutu proizvodnju.

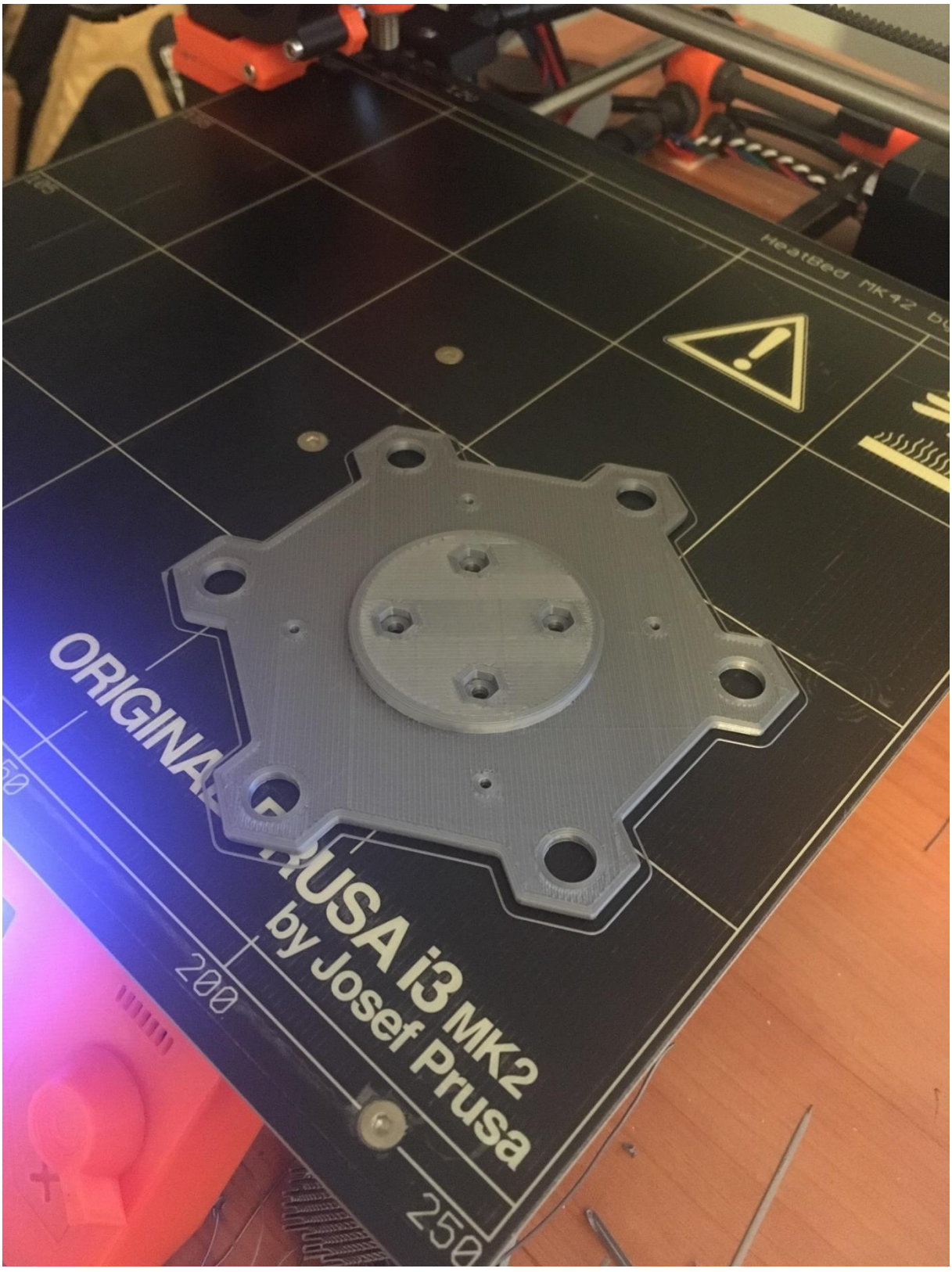
STL datoteke opisuju samo geometriju površine trodimenzionalnog objekta bez ikakvog prikaza boje, teksture ili drugih zajedničkih CAD modelnih atributa. STL format određuje ASCII i binarne prikaze, međutim binarni su češći zbog kompaktnijeg prikaza.

STL datoteka opisuje sirovu nestrukturiranu triangularnu površinu vektorom normale i vrhovima (pravilom desne ruke) trokuta pomoću trodimenzionalnog kartezijeva koordinatnog sustava.

Nakon što printer učita datoteku, ona je spremna za printanje, kako će se kretati, kojom brzinom i putanjom printer proračunava sam. Nakon što smo učitali datoteku, printer kreće sa izradom, na monitoru printera vidimo koliko će printeru za izradu tog modela biti potrebno.



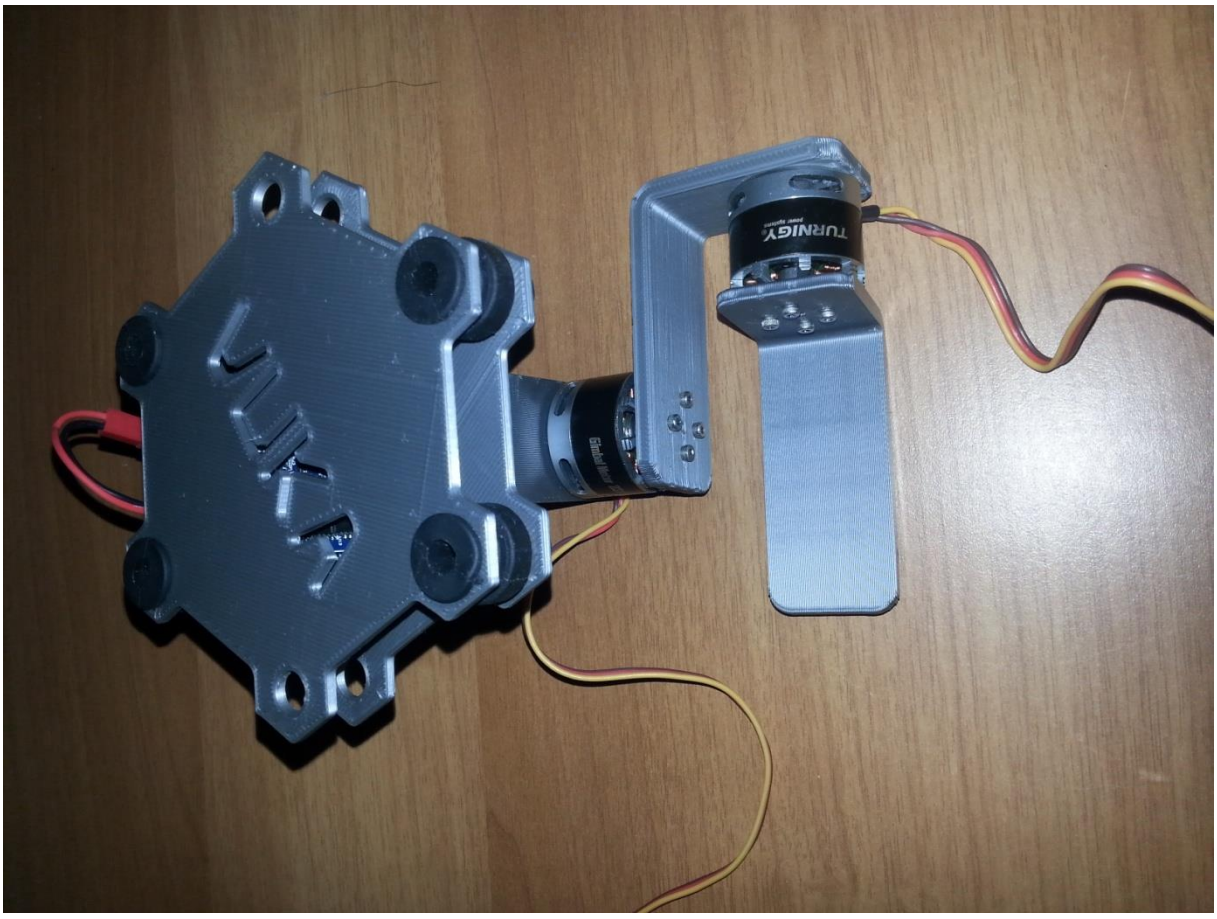
Slika 33: Izrada glavnog okvira



Slika 34: Izrada donje pločice

5.6. Montaža stabilizatora opreme

Nakon izrade svih potrebnih komponenti dolazimo do završne faze a to je montaža svih komponenti u jednu cijelinu. Prvo pričvršćujemo okvir za kameru sa rotorom motora vijcima M2 sa inbus glavom, zatim se na isti taj motor ali na stator pričvršćuje Roll okvir sa vijcima M3, također sa inbus glavom. Drugi kraj Roll okvira zatim pričvršćujemo na rotor drugog motora, također vijcima M2 sa inbus glavom. Nakon što smo povezali roll okvir i okvir za kameru sa motorima, stator drugog motora pričvršćujemo na glavni okvir vijcima M3 sa inbus glavom. Sada imamo sve okvire povezane u jednu cjelinu i možemo ih pričvrstiti sa pločicama. Glavni okvir pričvršćujemo sa donjom pločicom vijcima M3 sa heksagonskom glavom. Zatim se na tu istu pločicu pričvršćuje upravljačka jedinica. Sada kada imamo sve komponente pričvršćene vijcima, još nam preostaje između donje i gornje pločice postaviti gumice i na taj način povezati ih u jednu cjelinu. Sada imamo gotov model kao na slici.



Slika 35: Stabilizator sklop

6. ZAKLJUČAK

Svakodnevnim napretkom tehnologije izrada prototipova, bilo koje pa čak i najsloženije geometrije postala je moguća upravo zbog razvoja tehnologije brze izrade prototipova, posebice aditivnih tehnologija. Konkretno za naš slučaj, bilo je potrebno izraditi okvire za stabilizator opreme. Konstruiranje se vršilo u softverskom paketu Catia V5R19, te se nakon konstruiranja pristupilo prilagodbi modela za izradu FDM postupkom. Izrada se vršila na 3D printeru Prusa i3 Mk2 a za iradu smo koristili PLA materijal, koji je najosnovniji materijal na 3D printerima koji koriste FDM tehnologiju. Printanje je potrajalo svega par sati i ubrzo smo imali sve potrebne komponente, da možemo sklopiti funkcionalni prototip stabilizatora opreme sa dva stupnja slobode gibanja u jednu cjelinu.

Kako je već i ranije navedeno, stabilizatori opreme se primjenjuju u velikom broju područja, od filmske industrije pa sve do raketnih motora. Međutim, najveća primjena je svakako u filmskoj industriji, točnije, stabilizatori se koriste ponajviše kako bi se omogućilo što kavlitetnije snimanje filmskih scena, pa i onih najzahtjevnijih koje klasičnim načinom snimanja nije bilo moguće izvesti.

PRILOZI

1. CD-R

LITERATURA

[1] https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/rotations.html
https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal
[2], [3], [4], [5], [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal_lock
https://www.hq.nasa.gov/alsj/e-1344.htm
https://hr.wikipedia.org/wiki/Kvaternion
[7]https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/tilt_sensing/inertial_gyros
[8]https://www.dhgate.com/product/jly-m2-3-axis-handheld-dslr-camera-stabilizer/389835730.html

[9]https://technikblog.ch/2015/04/high-end-multicopter-gepaart-mit-high-speed-4k-kamera/
https://hr.wikipedia.org/wiki/Komutator_(elektromotor)
https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_strojevi
https://hr.wikipedia.org/wiki/Upravlja%C4%8Dka_jedinica
[10] http://www.avdweb.nl/solar-bike/hub-motor/permanent-magnet-dc-hub-motor-tuning
[11] https://hobbyking.com/en_us/quanum-2208-precision-brushless-gimbal-motor-gopro-size-100-200g.html

[12]https://hobbyking.com/en_us/storm-32-3-axis-brushless-gimbal-controller.html?___store=en_us

[13] https://hobbyking.com/en_us/turnigy-bolt-500mah-2s-7-6v-65-130c-high-voltage-lipoly-pack-lihv.html
http://suvremena.hr/wp-content/uploads/2017/10/Knego-MAGROS2017-10102017.pdf
http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979
https://www.netokracija.com/windays-3d-printeri-72890
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1522161569-0-naprednetehnologijematerijala_bruno_babic.pdf
https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A399/datastream/PDF/view

https://bib.irb.hr/datoteka/878641.Digitalna_proizvodnja_Vdovic_Pap_CUC2016.pdf

https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication

https://hr.wikipedia.org/wiki/Trodimenzionalni_ispis

https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing

https://makezine.com/2015/03/10/cartesian-delta-polar-common-3d-printers/

https://www.riggstudio.com/latest/2017/9/20/3d-printing

https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)

https://zx3d.com.au/premium-pla-filament-500g-1.75mm.html