

Natjecateljski robot

Radan, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:176899>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-09**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Radan

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Matej Radan

Zagreb, 2024.

ZADATAK

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matej Radan**

JMBAG: **0035222716**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Natjecateljski robot**

Naslov rada na engleskom jeziku: **A competitive robot**

Opis zadatka:

Natjecanja robota popularna su mjesta i oblici okupljanja osoba zainteresiranih za tehniku i inovacije. Odvijaju se po različitim scenarijima i u različitim kategorijama, pri čemu u natjecanjima uključeni strojevi imaju vrlo različite značajke u pogledu građe i stupnja autonomije. Tako se robotima smatraju i daljinski upravljani strojevi koji se u borbi međusobno nastoje onеспособiti.

U radu je potrebno:

1. objasniti značaj i opisati natjecanja robota
2. podrobno opisati vlastitu konstrukciju robota i natjecanje u kojem sudjeluje
3. naznačiti mogućnosti unapređenja robota sa stajališta, naprimjer, konstrukcije i upravljanja.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

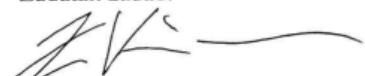
Datum predaje rada:

- 1. rok:** 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

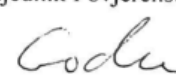
Predvideni datumi obrane:

- 1. rok:** 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:


 Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Predsjednik Povjerenstva:


 Prof. dr. sc. Damir Godec

IZJAVA

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

Zahvaljujem svim bližnjima.

Posebna hvala mentoru, profesoru Zoranu Kunici, njegovom asistentu te ujedino obožavatelju borbenih robota, kolegi Denisu Mlivicu i svim tetama na fakultetu.

Posebna hvala i našim sponzorima bez kojih ovaj projekt ne bi bio ostvariv: Agru Croatia Trade, Asio, Biz – Plima, Crom, Cuttech, Hennlich, Iscar alati, Imbus, Pfeifer – TTI, RPK, SET Bjelovar, Forch i FSB.

Zagreb, veljača 2024



Matej Radan

SAŽETAK

Ovaj rad istražuje povijest i privlačnost borbenih robota, ističući njihov utjecaj na inženjersko obrazovanje, razvoj mladih i koheziju zajednice. Proučavajući različite tipove robota, analiziraju se principi dizajniranja i njihova funkcionalnost.

Posebno se obrađuje Fightbotics, lokalno natjecanje brzorastućeg ugleda i robot Eggsecutioner, dvostruki prvak (inicijalno u studentskom, a kasnije i sveukupnom poretku). Detaljno je objašnjena konstrukcija napadačkih i pogonskih sistema, šasijske i oklopa. Kroz kronološko istraživanje iteracija, implementiranih i predloženih poboljšanja, cilj je ovim radom poboljšati razumijevanje učinkovite izrade borbenih robota.

Ključne riječi: borbe robota, Fightbotics, borbeni robot, načela dizajniranja, Eggsecutioner, konstrukcija, razvoj

SUMMARY

This paper explores the history and appeal of combat robots, emphasizing their impact on engineering education, youth development, and community cohesion. By examining different types of robots, the principles of design and their functionality are analyzed.

Particular attention is given to Fightbotics, a locally rapidly growing competition, and the robot Eggsecutioner, a double champion (initially in the student category and later overall). The construction of the offensive and drive systems, chassis and armor is explained in detail. Through a chronological investigation of implemented and proposed improvements, the aim of this paper is to enhance the understanding of effective combat robot construction.

Keywords: robot combat, Fightbotics, combat robot, design principles, Eggsecutioner, construction, development

SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY	IV
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VIII
POPIS SLIKA	IX
1. UVOD.....	1
2. POJAM BORBI ROBOTA.....	2
3. POČETCI, POPULARIZACIJA I AKTUALNE BORBE ROBOTA.....	3
4. PRAVILA NATJECANJA U BORBAMA ROBOTA	6
4.1. Trajanje i vrednovanje borbi robota	6
4.2. Mjesta odvijanja borbi robota	6
4.3. Težinske kategorije u borbama robota	7
4.3.1. Kategorije po masi	7
4.3.2. Faktor veličine.....	7
5. PODJELA BORBENIH ROBOTA PO STRATEGIJI NAPADA	9
5.1. Kontrolni borbeni roboti.....	10
5.2. Napadački borbeni roboti	11
5.2.1. Roboti s horizontalno okretnim oružjem.....	11
5.2.2. Roboti s vertikalno okretnim oružjem.....	12
5.2.3. Bacački roboti	14
5.2.4. Posebne vrste napadačkih robota	14
6. POGON BORBENIH ROBOTA.....	15
6.1. Općenito o pogonima	15
6.2. Pogonski sustavi s kotačima	16

6.3. Nekonvencionalni pogonski sustavi	16
6.4. Vožnja naopako	17
7. VRSTE OKLOPA BORBENIH ROBOTA	18
7.1. Tradicionalan oklop	18
7.2. Ablativni oklop	19
7.3. Reaktivni oklop	20
8. KUPOVNI BORBENI ROBOTI	21
8.1. Kupovni kompleti za izradu gotovih borbenih robota	21
8.2. Unajmljivanje konstruktora za izradu personaliziranih robota	22
9. BORBENI ROBOT EGGSECUTIONER	23
9.1. Sustav oružja	26
9.1.1. Odabir dizajna oružja	26
9.1.2. Konstrukcija oružja tipa <i>eggbeater</i>	27
9.1.3. Moguća poboljšanja sustava oružja	31
9.1.4. Primjeri štete na oružju	31
9.2. Sustav pogona	33
9.2.1. Pogon na sva četiri kotača	33
9.2.2. Prijenos momenta	34
9.2.3. Materijal gume	35
9.2.4. Naplatci	36
9.2.5. Moguća poboljšanja pogona	37
9.2.6. Primjeri štete na pogonskom sustavu	37
9.3. Konstrukcija šasije	37
9.3.1. Glavni nosači	38
9.3.2. Pregrade unutar konstrukcije	40
9.3.3. Ukrute od navojnih šipki	41

9.3.4. Gornja i donja ploča	41
9.3.5. Moguća poboljšanja šasije	43
9.3.6. Primjeri štete na sistemu šasije.....	44
9.4. Oklopi.....	45
9.4.1. Ralica.....	45
9.4.2. Klinovi.....	46
9.4.3. Bočni potrošni oklop	47
9.4.4. Moguća poboljšanja oklopa	48
9.4.5. Primjeri štete na oklopu.....	48
9.5. FINANCIJSKI ASPEKTI	51
9.5.1. Sponzori tima Judge&Jury	51
9.5.2. Fightbotics subvencionirane komponente	51
10. ZAKLJUČAK	52
LITERATURA	53

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
CAD	/	eng. <i>Computer Aided Design</i> – oblikovanje uz pomoć računala
CNC	/	eng. <i>Computer Numerical Control</i> – računalno numeričko upravljanje
d_{max}	m	maksimalni zahvat
eng.	/	engleski
v_x	m/s	brzina prvog robota
v_y	m/s	brzina drugog robota
Δt	s	vrijeme potrebno da zub prođe kroz fiksnu točku rotacije
n	/	broj oštrica
E_k	J	rotacijska kinetička energija
I	kgm ²	moment tromosti oko osi rotacije oružja
ω	rad/s	kutna brzina
E_p	J	potencijalna energija
m	kg	Masa robota
g	m/s ²	ubrzanje sile teže
h	m	visina krova arene od njenog poda
rpm	/min	eng. <i>Revolutions Per Minute</i> – okretaji u minuti
K_v	rpm/V	eng. <i>Constant Velocity of a motor</i> – rotacijska karakteristika DC motora bez četkica

POPIS SLIKA

Slika 1. Tri robota tima Judge&Jury na natjecanju u prosincu 2023. godine	1
Slika 2. Roboti s automatskim sistemima [4 i 5].....	2
Slika 3. Robot [23] u težinskim kategorijama od 250 lb, 30 lb i 12 lb	8
Slika 4. Dinamika <i>kamen – škare – papir</i>	9
Slika 5. Robot klin [24] (lijevo) i robot hvatač [25] (desno).....	10
Slika 6. Različite izvedbe horizontalaca, s lijeva nadesno: <i>bar, undercutter, overhead</i>	11
Slika 7. Različite izvedbe vertikalaca, s lijeva nadesno: <i>disc, drum, eggbeater</i>	12
Slika 8. Raspored sila pri udarcu oružja s manjim radijusom [20]	13
Slika 9. Raspored sila pri udarcu oružja s velikim radijusom [20]	13
Slika 10. Bacački robot	14
Slika 11. Robot drobilica (lijevo) i pila robot (desno)	14
Slika 12. Robot sa spužvastim [28] (lijevo) i s nazubljenim kotačima [27] (desno)	16
Slika 13. <i>Shuffler</i> roboti [29 i 30].....	17
Slika 14. Različite verzije ralice (lijevo) i pokušaji savijanja branika (desno)	18
Slika 15. Rezerve ablativnog oklopa (za Eggsecutionera_V3).....	19
Slika 16. TPU oklop robota horizontalca koji štiti ploču od karbon-kevlara.....	20
Slika 17. Sklopljeni kontrolni set roboti [31 i 32].....	21
Slika 18. Sklopljeni napadački set roboti [33 i 34]	22
Slika 19. Inspiracija: robot Lynx koji je promijenio scenu u Americi [43 i 44]	24
Slika 20. CAD rane verzije Eggsecutionera u kokošjim bojama (konfiguracija s klinovima) 24	
Slika 21. CAD finalne verzije robota Eggsecutioner (konfiguracija s ralicom)	24
Slika 22. Eggsecutioner_V1 (lijevo) te Eggsecutioner_V2(desno)	25
Slika 23. Eggsecutioner_V3 koji je pobjedio u prosincu 2023.	25
Slika 24. Eggsecutioner_V3 s medaljom poslje borbi (lijevo) i prije, bez oštećenja (desno)..	25

Slika 25. Aluminijski bubanj s čeličnim zubima (lijevo) i robot [45] koji ga koristi (desno) .	26
Slika 26. <i>beater bar</i> [46] (lijevo) i robot koji ju koristi (desno)	27
Slika 27. Napadni kut oštrice oružja	28
Slika 28. CAD model oružja (lijevo) i oružje nakon glodanja (desno).....	28
Slika 29. Deformirano oružje s Eggsecutionera_V3	31
Slika 30. Detalj otkrhnute oštrice s Eggsecutionera_V3	32
Slika 31. Izbalansirano oružje s Penzionera	32
Slika 32. Neprijateljsko oružje koje je Eggsecutioner_V3 pukao i zarezao punom dužinom .	32
Slika 33. Konfiguracija pogona s motorom u sredini kod robota Lynx [44]	34
Slika 34. LEGO gume 43.2x22 ZR	35
Slika 35. Prva verzija naplatka [20]	36
Slika 36. Oštećen kotač s Eggsecutionera_V3 nakon direktnog udarca	37
Slika 37. Prazan Penzioner (lijevo) i Eggsecutioner_V3 (desno)	38
Slika 38. Nosači sa Penzionera	38
Slika 39. Nosači sa Eggsecutionera_V3	38
Slika 40. Nosač s naznačenim geometrijsko-funkcijskim značajkama	39
Slika 41. CAD prihvata motora (lijevo) i zapravo (desno)	39
Slika 42. Pregled unutrašnjosti Penzionera	40
Slika 43. Bočne ukrute od navojnih šipki	41
Slika 44. CAD gornjeg poklopca Penzionera (lijevo) i zapravo (desno)	42
Slika 45. CAD sklop gornjeg poklopca na Eggsecutioneru_V3	42
Slika 46. CAD gornjeg poklopca Eggsecutionera_V3 (lijevo) i zapravo (desno)	42
Slika 47. Usporedba donje ploče na Penzioneru (lijevo) i Eggsecutioneru_V2 (desno)	43
Slika 48. Ručno rezane ploče iz tacne za hranu složene na prvi 3D print robota	43
Slika 49. Slika deformirane šasije Penzionera (lijevo) i detalj (desno)	44
Slika 50. Oštećenje od vlastitog oružja na nosaču Penzionera	44

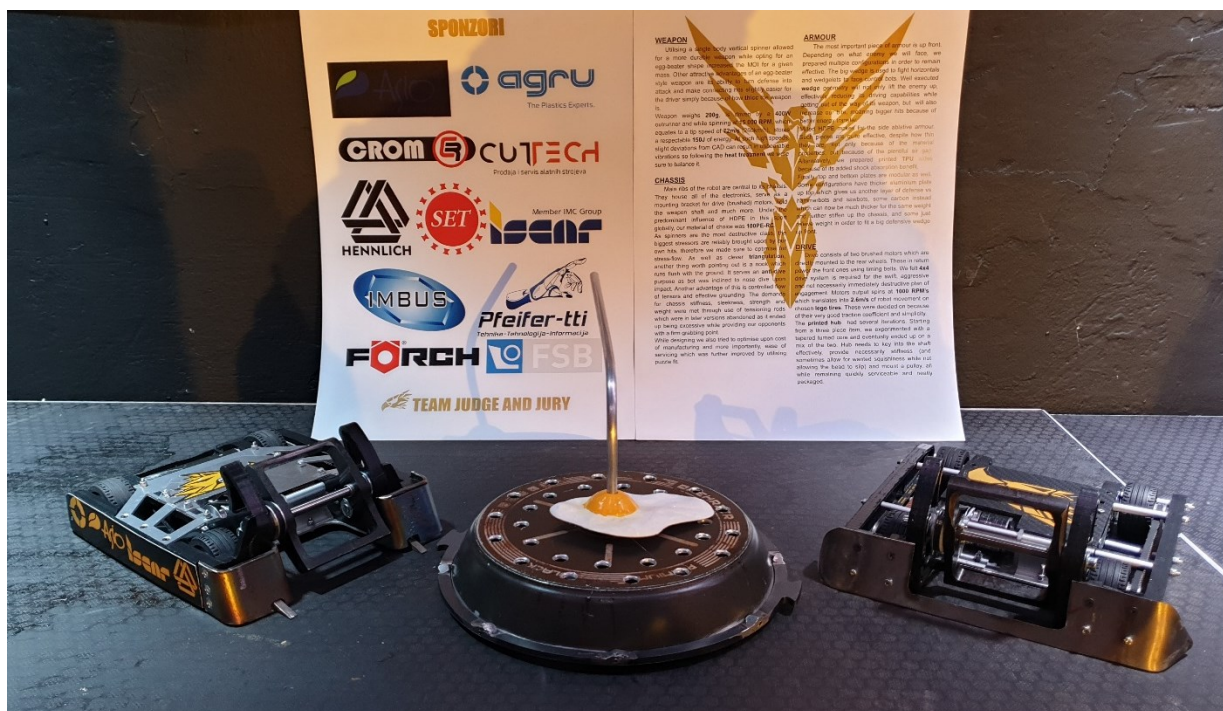
Slika 51. Prva ralica za Eggsecutionera_V1 (lijevo) i njen CAD model (desno)	45
Slika 52. Branici s Eggsecutionera_V3 (lijevo) i njihov CAD model (desno)	46
Slika 53. Klinovi na robotu (lijevo) i simulacija podkopavanja (desno)	47
Slika 54. Penzionerov CAD bočnog potrošnog oklopa (lijevo) te na sklopu (desno)	47
Slika 55. Eggsecutionerov_V3 CAD potrošnog oklopa (lijevo) na sklopu (desno)	48
Slika 56. Oštećenja na potrošnom oklopu Penzionera nakon borbe s horizontalcom.....	49
Slika 57. Šteta na ralici Penzionera.....	49
Slika 58. Potpuno zanemariva šteta na Eggsecutioneru_V3	50
Slika 59. Šteta na Eggsecutioneru_V3	50

1. UVOD

Ovaj završni rad ima za cilj prikazati početke razvoja i aktualan trenutak scene borbi robota u Hrvatskoj, vođen perspektivom pobjedničkog tima Judge&Jury na natjecanju Fightbotics i glavnog od njihova tri robota – Eggsecutionera (Slika 1. lijevo). U radu dana analiza ovog sporta i njegovih specifičnih zahtjeva proizlazi iz izuzetno pozitivnog iskustva stečenog vlastitim istraživanjem i radom u sklopu napora čitavog tima.

Nakon niza samostalnih projekata, ambicija tima nije samo uspjeh na natjecanju, već i doprinos širem razvoju borbenih robota. Dijeljenjem spoznaja nastoji se olakšati pristup ovom sportu širem krugu ljudi, potičući sveobuhvatno razumijevanje njegovih suptilnosti.

Rad se započinje sagledavanjem borbi robota, opisivanjem raznolikosti tipova i principa oblikovanja, s posebnim isticanjem ključnih elemenata potrebnih za realizaciju borbenog robota. Potom se detaljno opisuje i analizira pobjednički robot Eggsecutioner, s isticanjem mogućnosti poboljšanja njegove konstrukcije i izrade.



Slika 1. Tri robota tima Judge&Jury na natjecanju u prosincu 2023. godine

2. POJAM BORBI ROBOTA

Borbe robota su popularan naziv za sukob robota u stilu boksačkog meča. Natjecateljski roboti, najčešće, nisu autonomni, već su upravljani daljinskim radio upravljačima. Razlikuju se razne kategorije, iako je primarna podjela na težinske razrede pa postoje i natjecanja borbenih robota gdje je autonomnost pravilnikom zahtijevana. [1]

Često se primjenjuje strategija s dva vozača od kojih jedan upravlja robotom, a drugi oružjem što je standard za natjecanja na emisiji *BattleBots* [2], kako ne zahtijeva dodatne sisteme za izvedbu već samo služi da rastereti glavnog vozača.

Neki od natjecatelja *BattleBotsa* koji su se koristili automatskim sistemima jesu:

- ❖ Chomp, robot čekičar (eng. *hammerbot*) s automatski okidanim oružjem [3],
- ❖ Obritron, robot s dvostrukim vertikalno okretnim oružjem (omogućava napad s obje strane i stvara protugiroskopski efekt) i automatskim navođenjem (Slika 2. lijevo [4]) te
- ❖ *NHRLov* natjecatelj, robot koji otapa mozak (eng. *meltybrain*) DeepMelt, s radarom i autonomnim navođenjem (zahtjevan za kodiranje) (Slika 2. desno [5]).



Slika 2. Roboti s automatskim sistemima [4 i 5]

3. POČETCI, POPULARIZACIJA I AKTUALNE BORBE ROBOTA

Natjecanja među robotima otpočela su 70-ih godina prošlog stoljeća, a borbe robota kao daljinski upravljanih jedinica koje se nastoje međusobno onеспособiti postaju popularne nakon 1992. godine, kada je Marc Thorpe spojio daljinski upravljani tenk s usisavačem kako bi dosadnu obavezu, usisavanje, učinio zabavnijom. Vozeći robota, pobudio se u njemu nestašan dječjački duh i počeo je zamišljati stavljanje raznih akumulatorskih alata na robota kojima bi se mogla nanijeti šteta. U tom periodu radio je za *Lucas Films* i inspiriran filmom *Star Wars* i njihovim modelom za generiranje prihoda od prodaje igračkaka, osmislio natjecanje robota gdje bi on organizirao događanja na koja bi pozvao ljude da rade svoje robote i natječu se u međusobnoj borbi. Tvrtka *Robot Wars* bi posjedovala prava na reklamiranje mehaničkih sportaša tj. robota koje bi drugi napravili. [6]

Ideja se brzo pokazala privlačnom kada je tvrtka *Robot Wars* 1998. godine prvi put prikazala istoimenu serijal natjecanja u Ujedinjenom Kraljevstvu na *BBC*-ovom kanalu. Prva epizoda serije postala je trenutačan hit, prikupivši preko dva milijuna pregleda i postala tema na *Twitteru* (danas *X*) s preko 20 000 dijeljenja. Svaka sezona okupljala je timove amatera i profesionalaca koji su upravljali svojim daljinski upravljanim robotima, sudjelujući u borbi u areni od čelika s višeslojnim polikarbonatnim stijenkama. Natjecanje je bilo prepuno zamki i prepreka te u ranijim sezonama, ispitnih staza. Osim televizijskog formata, *Robot Wars* je ostvario komercijalan uspjeh i kroz prodaju igračkaka, postavši jednim od najprodavanijih asortimana igračkaka 2002. godine. Serija je značajno pridonijela popularizaciji robotehlike, odgajajući cijele generacije budućih strojara i entuzijasta. Unatoč inicijalnom uspjehu, serija se prestala emitirati između 2004. i 2016. godine zbog raznih problema, uključujući pad kvalitete. No, 2016. godine serija je ponovno oživljena s novom opremom i stekla je popularnost na društvenim mrežama. [7]

Iako je prikazivanje serije prestalo nakon desete sezone, *Robot Wars* je bio izvor inspiracije za mnoge globalne adaptacije, kvalitetu kojih je osiguravala *The Fighting Robots Association* (FRA): udruga koja se brine za sigurnost, promoviranje i centraliziranu komunikaciju o borbama robota. [8]

Američki *BattleBots* je preuzeo inicijativu, dalje razvijajući gledanost borbenih robota. *BattleBots* je osvojio gledatelje tijekom pet sezona na *Comedy Centralu*. Iako je u početku isto bilo legalnih problema zbog koje je serija neko vrijeme stala s prikazivanjem, ABC ju je obnovio 2015. godine, dosežući novu publiku i otvarajući vrata suradnji s *Discovery Channelom* i *Science Channelom*. Ova suradnja rezultirala je s nekoliko sezona koje su prikazale inovacije u dizajnu robota i adrenalinskim borbama robota. S vremenom, *BattleBots* je postao globalan fenomen, proširivši se na međunarodne gledatelje koji su bili fascinirani inženjerskim umijećem i taktičkim vještinama timova. Gledanost je rasla, potaknuta inovacijama u borbenim strategijama, promocijama, arenama i sve složenijim robotima. Uz uspon popularnosti, *BattleBots* je stvorio vlastita *spin-off* natjecanja poput *BattleBots: Bounty Hunters* i *BattleBots: Champions*. Ova proširenja dodatno su utvrdila dominantan položaj serije u svijetu borbenih robota i danas serija je dostupna u preko 150 država i diči se milijunima gledateljima. [1 i 9]

King of Bots je kineska TV emisija, pokrenuta po uzoru na *BattleBots* u 2017. godini, a prva sezona s 48 robota se emitirala do 2018. godine. Druga sezona, koja je uključivala i gostujuće poznate osobe u odabiru timova, emitirala se u 2019. godini. [10] Serija je i dostupna na *YouTubeu*. [11]

Osim Kine, Brazil (natjecanje *Winter Challenge*) i Europa se također ističu sa svojom scenom, ali za razliku od dosad navedenih natjecanja koja su zahtijevala skupu produkciju, razne licence i možda najbitnije: znatno teže (veće i skuplje) robote, entuzijasti su se krenuli sami natjecati na manjim lokalnim natjecanjima u izvedivim težinskim kategorijama. Iskustveno se kategorija od 3 lb (1,5 kg), poznata kao *beetleweight* kategorija pokazala kao najatraktivnija. Poznate stranice službenih natjecanja za Ameriku su *Builders Database* [12] i *Robot Combat Events* [13], a za Europu *Bristol Bot Builders*. [14]

National Havoc Robot League (NHRL) je najveća i najpristupačnija liga borbenih robota na svijetu, domaćin svjetskih prvenstava u kategorijama od 3 lb, 12 lb i 30 lb kroz serije od sedam turnira borbenih robota godišnje u Americi, praćenih digitalno od strane tisuća obožavatelja diljem svijeta. Moguće je gledati pažljivo snimljene videozapise u punom formatu na *YouTubeu* [15] ili u dijelovima odnosno cijelosti uživo prijenos na *Discordu* [16] gdje je također moguće razgovarati s timovima pa čak i dobiti savjete o izgradnji vlastitih robota. Natjecatelji kombiniraju revolucionarnu tehnologiju i neobične ideje kako bi oduševili publiku, a natječu se za tisuće dolara u gotovini i pokušaj osvajanja priželjkivanog Zlatnog Kontejnera (eng. *Golden Dumpster*). Za svako natjecanje odabiru 160 robota koji se natječu u jednoj od šest arena ekskluzivnih za *beetleweight* kategoriju i još dvije koje koriste teže kategorije. [17]

Fightbotics je projekt studentske udruge *Studentski makerspace Strojarnica* koja djeluje na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu* [18]. Projekt je prvi takve vrste u Hrvatskoj, a okuplja studente područja STEM, srednjoškolce, entuzijaste i tvrtke u natjecanju, izradi i borbi robota. Ideja za natjecanje inspirirana je američkim serijalom *Battlebots*, a obrazovni potencijal takvog natjecanja za razvoj pojedinaca nastoji se približiti široj publici, a posebice STEM zajednici. Ulaznice za turnir uvijek se brzo rasprodaju, a tijekom natjecanja odvija se više od 30 borbi. Kako je događaj još uvijek nov, za svaki susret uvode se svježije promjene. Borbe redovito traju cijelo poslijepodne te s povećanjem broja prijavljenih timova, kao i kvalitete robota, povećava se i intenzivnost spektakla. Utjecaj projekta odjeknuo je kroz cijelu Hrvatsku, a i šire budući da su *Bristol Bot Builders* uvrstili *Fightbotics* kao službeno natjecanje na području Europe. Također je vidljiv i utjecaj na akademsku zajednicu, budući da je izrada robota vrijedna vještina pa je na tu temu izrađeno više završnih radova [19 i 20] pa i jedan rad za rektorovu nagradu [21].

4. PRAVILA NATJECANJA U BORBAMA ROBOTA

4.1. Trajanje i vrednovanje borbi robota

Samo odvijanje borbi ovisi o pravilima pojedinačnog natjecanja, a uvriježeno borba traje najviše tri minute i može završiti nokautom (eng. *knockout*), predajom ili istekom vremena.

- ❖ Nokautom se smatra onesposobljivanje pokretljivosti robota. To se najčešće dogodi uslijed značajnijeg udarca kada robot izgubi sposobnost kontroliranog gibanja te je, nakon odbrojavanja od deset sekundi, automatski proglašen gubitnikom.
- ❖ Gubitak vrijedi i za predaju koja se najčešće koristi da bi se spriječila dodatna šteta na robotu koja bi bila skupa novčano ili zahtjevna vremenski (za popraviti prije drugih borbi).
- ❖ Ako sukob potraje sve tri minute, prelazi na vijećanje sudaca koji dodjeljuju bodove jednom tj. drugom robotu skladno objektivnim performansama kroz tri kategorije: šteta (0-5 bodova), agresivnost (0-3) te kontrola (0-3).

Broj borbi i format natjecanja varira ovisno o događanju, ali se često koristi turnirski format dvostruke eliminacije kako bi se osiguralo da će se svi natjecatelji imati priliku boriti barem dva puta. Fightbotics natjecanje održava i predeliminacijsku rundu zbog velikog boja prijava.

4.2. Mjesta odvijanja borbi robota

Borbe robota se odvijaju u arenama veličina proporcionalnih težinskim kategorijama natjecateljskih robota. Za dno tj. pod arene često se koristi čelični lim ili šperploča kako bi se smanjila oštećenja ili olakšala zamjena. Ventilacija i dovoljna debljina (jedne ili više) polikarbonatnih stijenki su, radi sigurnosti, također bitni elementi dobre arene.

Arene mogu sadržavati različite zamke poput pregrada, pila, čekića i sličnog. Ako se zamke uopće pokažu kao presudan faktor za ishod borbe robota, to najčešće bude uslijed izbacivanja natjecatelja iz arene ili njegovog pada u rupu što se smatra automatskim gubitkom tj. nokautom. Postoje dodatna pravila, kao ona o odrješenju (eng. *unstick*), koja su navedena u pravilnicima pojedinačnih natjecanja, čime se dodatno umanjuje utjecaj zamki na ishod borbi [21].

4.3. Težinske kategorije u borbama robota

4.3.1. Kategorije po masi

Najlakša konvencionalna kategorija za borbe robota jest *fleaweights* (poznata još kao *nanoweights* ili *fairyweights*) i općenito ima ograničenje mase od 75 g (ili 50 g, ovisno o organizatorima događanja), ali kod njih kao i kod *fairyweights* (poznate još kao *antweights*) kategorije (do 0,33 lb tj. 150 g), događanja i odgovarajuća elektronika su rijetkost.

Antweights (1 lb tj. 450 g) i *beetleweights* (3 lb tj. 1360 g odnosno u Europi 1500 g) najkonkurentnije su kategorije među *insektima*. Popularnost im još uvijek eksponencijalno raste, vjerojatno zahvaljujući nešto nižem pragu za sudjelovanje na natjecanjima koji nije samo posljedica raširene elektronike (kako se koristi primarno ona za RC modele), već i ostatka potrebnih materijala, mnoštvu uputstava i aktivnih zajednica koje dijele savjete pa čak i nude gotova komercijalna rješenja (kit roboti) s kojima i osnovnoškolci mogu sigurno upravljati. U ovom težinskom rasponu ističu se još autonomne klase za takozvane *mrave* i *kornjače*.

Featherweights (30 lb) također postaju sve popularniji, posebno u Brazilu. Druge teže te najkonkurentnije klase su *hobbyweight* (12 lb), *lightweight* (60 lb) i *middleweight* (120 lb).

Heavyweight (220 lb) je najpoznatija kategorija, iako danas ima značajno manje natjecatelja nego u vrhuncu emitiranja *BattleBotsa*. Nažalost, teže kategorije poput *super-heavyweights* (do 340 lb) su u još značajnijem opadanju.

4.3.2. Faktor veličine

Važno je imati na umu faktor veličine tijekom faze konstruiranja robota. Kada bi ljudi rasli proporcionalno svojim dimenzijama dok ne bi bili dvostruko viši, tada bi bili i osam puta teži, no površina presjeka kostiju i mišića bi se uvećala samo četiri puta. Kako bi se to kompenziralo, kosti bi trebale biti proporcionalno šire te kraće što i uočavamo kod teških životinja poput slonova ili nosoroga. Smanjenjem veličine dolazi do suprotnog efekta. Primjerice, mrav je oko 100 puta manji od čovjeka, ali može nositi teret 100 puta teži od sebe.

Faktor veličine ima dvije svrhe;

- ❖ Prvo, ukoliko se napravi uspješan robot, množenjem s koeficijentima moguće je napraviti istog u drugoj težinskoj kategoriji (Slika 3. prikazuje verzije robota Mammoth [23] u različitim težinskim kategorijama) bez značajnijeg gubitka omjera snage (otpornosti) i težine (sile). Ove smjernice nisu samo teorijske, već su i provjerene u praksi te korisne za optimizaciju konstrukcije robota.
- ❖ Drugo, služi ocrtavanju značaja obujma tj. mase raspoređene u tri dimenzije. Također, vidi se empirijska korelacija s uspješnim robotima koji su uglavnom vrlo kompaktni (gusti s izuzetkom oklopnih dijelova koji su osmišljeni da se elastično deformiraju) i to im ostvaruje velike uštede na masi, koja je realno glavno ograničenje oko kojeg se roboti konstruiraju.

Kako elektronika i njena korisnost raste linearno s porastom veličine, a svojstva materijala su jednaka za sve klase, manje se klase poput *beetleweighta* smatraju poprilično žilavim kako mogu primiti značajan broj udaraca prije kritičnih oštećenja.



Slika 3. Robot [23] u težinskim kategorijama od 250 lb, 30 lb i 12 lb

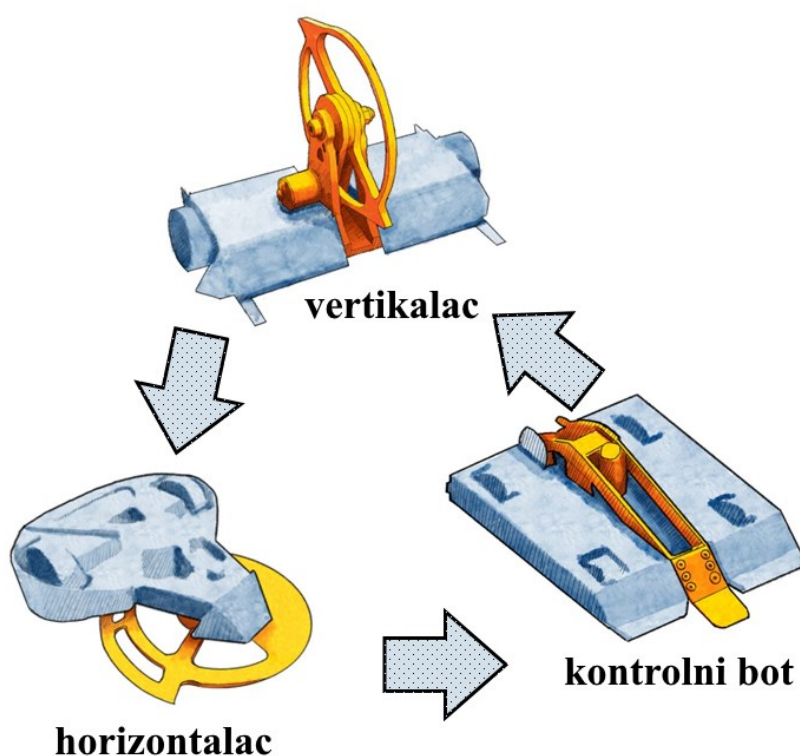
5. PODJELA BORBENIH ROBOTA PO STRATEGIJI NAPADA

Općenito se razlikuju se tri glavna tipa konstrukcije borbenih robota i to po sistemu oružja:

- ❖ vertikalci (eng. *verts*), roboti kojima se oružje vrti u vertikalnoj ravnini,
- ❖ horizontalci (eng. *horizontal*s), roboti kojima se oružje vrti u horizontalnoj ravnini,
- ❖ kontrolci (eng. *control bots*), roboti koji diktiraju tempo borbe.

Vertikalci, horizontalci i kontrolni roboti (kontrolci) se iskustveno ponašaju gotovo kao igra *kamen – škare – papir*, gdje jedan tip borbenog robota ima prirodnu prednost nad drugim, a značajan nedostatak pred trećim tipom robota.

Usprkos tome, u brzom, kaotičnom i zahtjevnom svijetu borbenih robota, ništa nije unaprijed određeno te se pametnom konstrukcijom, vještijom vožnjom ili pak srećom, sve može nadomjestiti.



Slika 4. Dinamika *kamen – škare – papir*

5.1. Kontrolni borbeni roboti

Kontrolni roboti često koriste jednostavnije konstrukcije, iskorištavajući većinu dopuštene mase za pogon i oklop. Kako rijetko nokautiraju protivnika, obično koriste pogon s četiri ili više kotača kako bi učinkovito gurali protivnike i tako skupljali bodove na kontroli i agresiji (pomaže ako se mogu okoristiti zamkama).

Kvalitetan oklop je ključan kako bi izdržali napade protivnika, posebice ako isti koristi vrlo destruktivno oružje. Po prilagodljivosti protivniku raznim modularnim konfiguracijama, ali i samom prirodom sukoba, kontrolni roboti su općenito najsvestraniji.

Razlikuju se:

- ❖ zabijači (eng. *rammers*), roboti koji nastoje uništiti neprijatelja tako da se zabijaju u njega s čvrstim, ravnim oklopom koji olakšava prijenos energije.
- ❖ klinovi (eng. *wedges*), roboti koji koriste ralicu klinastog oblika koja im pruža veliku zaštitu pri guranju dok istovremeno protivničkog robota podiže u zrak, smanjujući njegov kontakt s podlogom te olakšavajući daljnje guranje (Slika 5. lijevo – Foxic [24]).
- ❖ podizači (eng. *lifters*), roboti koji manipuliraju protivničkim robotom njegovim podizanjem, okretanjem ili držanjem u onespoblijenom položaju. Ovi roboti koriste alat s polugom, često pokretanu elektromotorom ili linearnim aktuatorom, a rjeđe pneumatski. Neki podizači imaju sofisticirane mehanizme za ostvarivanje određene putanje poluge, postižući dodatnu funkcionalnost poput optimizacije putanje za prevrtanje protivnika.
- ❖ hvatači (eng. *grabbers/clampers*), roboti koji, uz polugu za dizanje neprijatelja, imaju i hvataljku koja se spušta od gore i služi za pridržavanje protivnika, to jest onemogućuje protivničkom robotu da sklizne s poluge pri dizanju (Slika 5. desno – GrabCrab [25]).



Slika 5. Robot klin [24] (lijevo) i robot hvatač [25] (desno)

5.2. Napadački borbeni roboti

Razlikuju se:

- ❖ horizontalci (eng. *horizontalts*), roboti s horizontalno okretnim oružjem (Slika 6),
- ❖ vrtilice (eng. *fullbody spinners*), kao posebne inačice horizontalaca,
- ❖ vertikalci (eng. *verts*), roboti s vertikalno okretnim oružjem (Slika 7.)
- ❖ bacači (eng. *flippers*) (Slika 10.),
- ❖ bacači plamena (eng. *flamethrower*),
- ❖ pile (eng. *sawbot*),
- ❖ drobilice (eng. *crushers*)...

5.2.1. Roboti s horizontalno okretnim oružjem

Horizontalci spadaju među najdestruktivnije robote. Ovo proizlazi iz njihove jednostavne konstrukcije koja im omogućuje stavljanje većine mase u oružje. Oblik oružja je najčešće varijanta diska ili štapa. Štap (eng. *bar*) za istu masu može biti deblji i povoljnije se opirati udarcima vertikalaca, dok će disk (eng. *disc*) imati veću inerciju (spremljenu energiju).

Najčešće se oružje postavlja simetrično po visini zbog boljeg uležištenja, jednostavnosti izvedbe i omogućenja vožnje naopako. Postavljanje oružja na vrh robota omogućuje napad i ujedno pruža zaštitu sa svih strana. Oružja smještena nisko bolje prenose energiju na robote zaštićene ralicom te lakše udaraju u kotače i tako onesposobljuju pogonski sustav.



Slika 6. Različite izvedbe horizontalaca, s lijeva nadesno: *bar*, *undercutter*, *overhead*

Horizontalci nemaju problema sa zahvatom (eng. *bite*), ali im je nedostatak nešto lošiji prijenos energije kako se prilikom udarca odbijaju tj. suprotstavljaju samo inercijom što je uvijek lošije za prijenos energije od opiranja o kruti pod kao što je slučaj kod vertikalaca.

5.2.2. Roboti s vertikalno okretnim oružjem

Vertikalci su iznimno destruktivni usprkos tome što zbog svoje komplicirane geometrije i raspodjele mase ne mogu pohraniti jednako energije u svoje oružje kao i horizontalci. Razlog njihove destruktivnosti je povoljniji prijenos energije kako se prilikom udara odupiru o čvrstu podlogu i bacaju protivnika u zrak.

Vertikalcima je potreban dobro razvijen pogonski sustav kako bi:

- ❖ bili što brži kako bi mogli ostvariti, s minimalnim zaletom, dostatan zahvat tj. značajan prijenos energije (više u poglavlju 9.1.2. i jednadžbi 1) te
- ❖ bili što okretniji kako bi lakše savladali giroskopsku precesiju koja nepogodno djeluje na ovu konfiguraciju napadačkog robota, opirući se njenom skretanju.

Giroskopska inercija je svojstvo brzo rotirajuće mase koja nastoji zadržati svoju orijentaciju u prostoru s mnogo većom tromašću nego što odgovara samoj masi. Ako vanjski moment pritom nastoji pomaknuti masu iz njegove ravnine rotacije, os neće skrenuti u smjeru djelovanja sile, već u ravnini okomitoj na njega. To skretanje osi rotacije zove se precesija.



Slika 7. Različite izvedbe vertikalaca, s lijeva nadesno: *disc, drum, eggbeater*

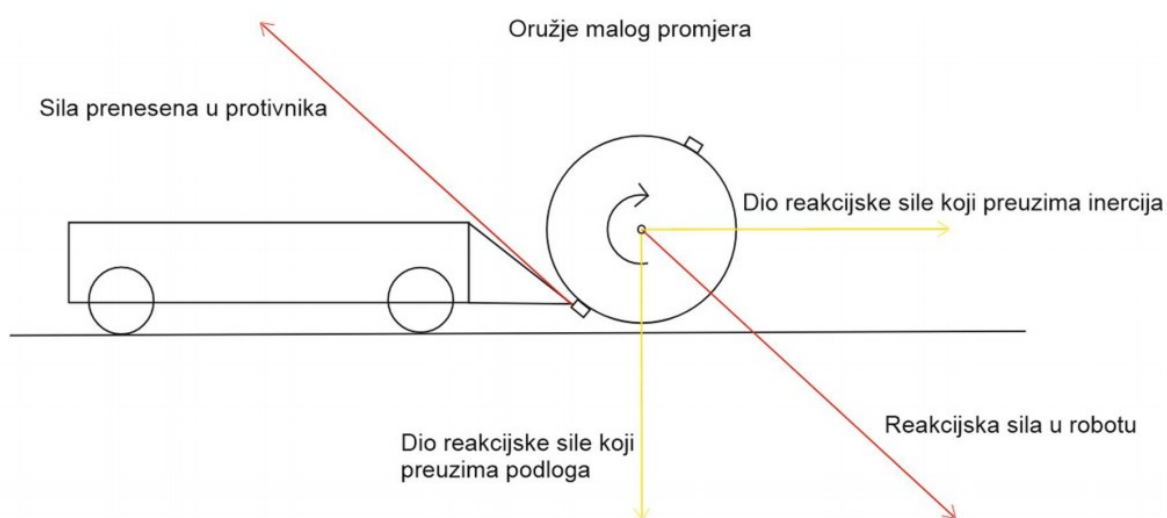
Konceptualno vertikalce dijelimo na:

- ❖ Robote s oružjem manjeg radijusa (Slika 8.) što pogoduje nižem težištu robota (čime se poboljšava stabilnost) i olakšava ciljanje (zbog veće širine oružja), ali se za pohranu iste količine energiju trebaju vrtjeti brže zbog čega imaju manji zahvat (udaraju nešto slabije).

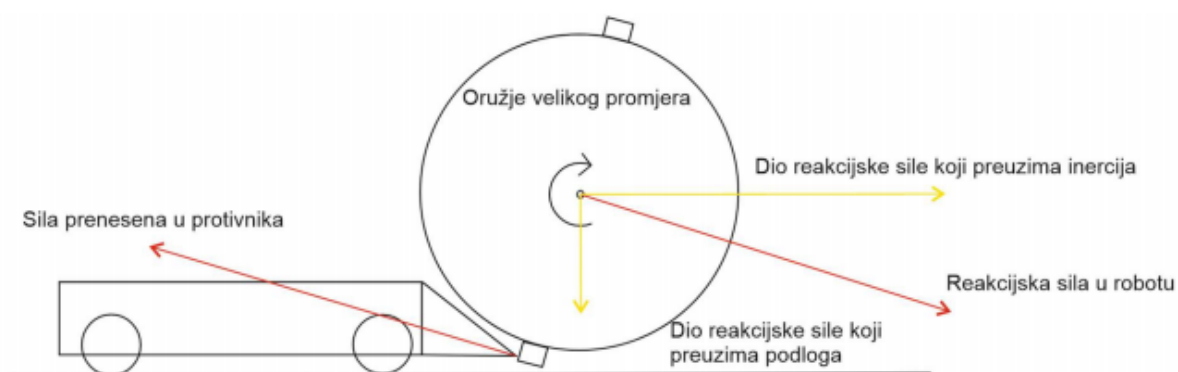
- ❖ Robote s oružjem većeg radijusa (Slika 9.) koji su skloni nepovoljnom težištu, otežanom napadu i obrani (zbog manje širine oružja) te izazovima u borbi s nižim robotima.

Kako je oružje najčešće izvedeno kao disk ili štap, nalik većini horizontalaca, spremaju ogromne količine kinetičke energije, ali za razliku od njih, tu energiju uspješno predaju.

Uprkos tome, imaju posebnih problema s drugim vertikalcima kako, ne samo da im je kut udara nepovoljniji, već i zbog (često) manje obodne brzine, neprijatelj uvijek udara prvi. Uz to, gubi se urođena prednost vertikalaca nad horizontalcima.



Slika 8. Raspored sila pri udarcu oružja s manjim radijusom [20]

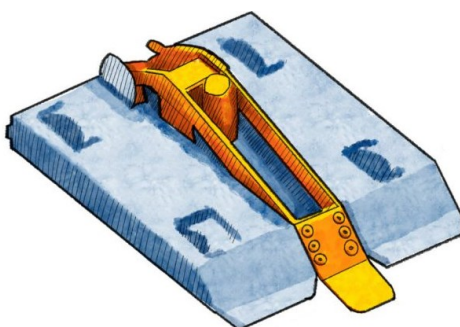


Slika 9. Raspored sila pri udarcu oružja s velikim radijusom [20]

5.2.3. Bacački roboti

Bacači mogu biti iznimno uspješni, ali imaju mnogo problema koji su dodatno naglašeni u lakšim kategorijama, najveći od kojih su pohrana energije te njena brza potrošnja. Ruka za bacanje u zrak mora izdržati velika naprezanja, a pokušaj akcije u krivom trenutku može završiti oštećenjem odnosno deformacijom koja onemogućava sistem za daljnji rad.

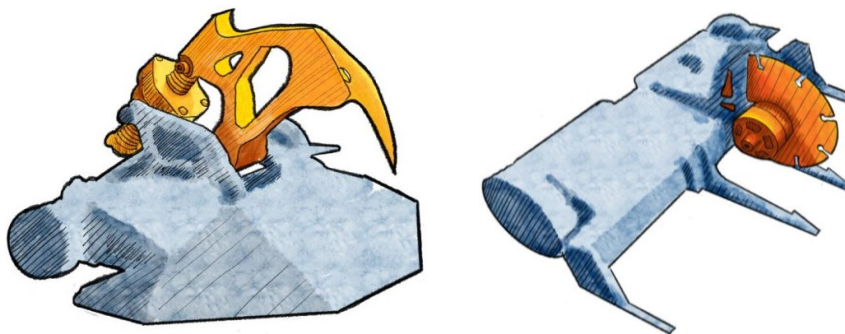
Neke od karakterističnih prednosti ovog tipa robota su nizak profil, česta dominacija u borbama potkopavanjem (eng. *ground game*, više u poglavljima 6. te 9.4.) i dobar oklop.



Slika 10. Bacački robot

5.2.4. Posebne vrste napadačkih robota

U ovu grupu spadaju roboti koji nastoje imobilizirati protivnika i takvog ga kritično oštetiti. Bilo da je riječ o (dobro izvedenim) bacačima plamena, pilama ili drobilicama, svi zahtijevaju oprez kako jedna greška u vožnji može značiti, ne samo gubitak borbe, već i potpuno uništenje elektronike. Zbog visoke specijaliziranosti, osjetljivi su na različite konfiguracije protivničkog robota, jer im oružje optimalno djeluje u definiranim pozicijama.



Slika 11. Robot drobilica (lijevo) i pila robot (desno)

6. POGON BORBENIH ROBOTA

6.1. Općenito o pogonima

Dobar i pouzdan pogonski sustav ključan je za uspjeh svakog borbenog robota te mu se iskustveno pripisuje uspjeh na natjecanjima više nego sistemu oružja. To proizlazi iz činjenice da pogonski sustav izravno utječe na sposobnost izbjegavanja, manevriranja i napadanja (primjer finalnih borbi tima Judge&Jury na Fightbotics natjecanju 2022. godine gdje je, zbog smanjene mobilnosti, glasanjem pobjeda dodijeljena protivniku, a 2023. godine nokautom pobijeđen protivnik lošijeg pogona [26]).

Pogonski sustavi dijele se na sustave s kotačima i nekonvencionalne pogonske sustave kao što su sustavi s gusjenicama ili nogama, a rjeđe se nailaze alternativni principi kretanja poput onih koji koriste vibracije oružja ili giroskopski učinak.

Neovisno o izvedbi konvencionalnog tipa pogona (miksanju kanala na radio upravljaču ili vrsti odnosno broju kotača), skretanje je uvijek ostvareno kao i na tenkovima gdje, neovisnim kretanjem svake strane robota te nepodudaranjem njihovih brzina, robot kruži većim ili manjim radijusom skretanja. Taj pristup ne zahtijeva dodatnu, finu geometriju koja svakako ne bi dobro podnosila učestale udarce kojima su ovi roboti izloženi.

Izvedbe s više kotača imaju bolju sposobnost naguravanja i određenu zalihost, ali manju agilnost. Kod njih je preporuka ne pogoniti sve kotače aktivno, već prijenosom kako bi se uštedjelo na masi.

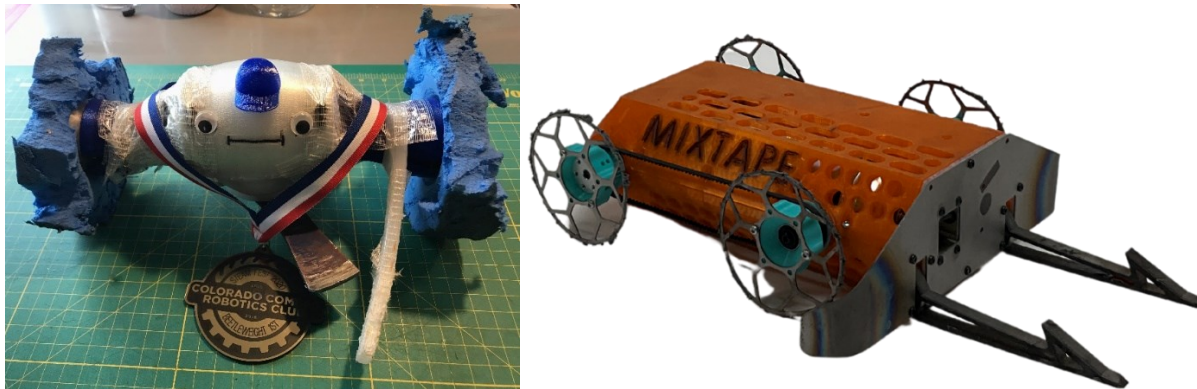
Posebnu pažnju zahtijeva raspored kotača i pozicija težišta koji su ključni za sposobnosti naguravanja i održavanja stabilnosti. Težište borbenih robota je najčešće pomaknuto prema naprijed što kruto montiranim klinovima (eng. *fixed wedglets/skis*) pomaže da se potkopaju pod neprijatelja. Izvedbe s dva kotača, u tom pogledu, imaju veliku prednost zbog više mase na klinovima (ako je zanemaren utjecaj magneta i oblik tj. kut klina)

Dominacija u potkopavanju je toliko značajna za ishod bitke da organizatori natjecanja danas aktivno pokušavaju napraviti odmak od nje, mijenjajući arenu (nepravilnosti ili razne teksture na podlozi) i pravilnik.

6.2. Pogonski sustavi s kotačima

Kotači su najčešće korišteni u borbenim robotima i to zbog svoje jednostavnosti, kompaktnosti i male mase. Mogu biti gumeni, spužvasti, kruti ili nazubljeni;

- ❖ Kod nazubljenih kotača (Slika 12. desno – *flamethrower* robot Mixtape [27], Slika 2. desno – *meltybrain* robot Deepmelt [5]) pretežito se koriste titanijske, laserski rezane, zvijezde zbog povećanja prianjanja (i posljedično akceleracije na podu od šperploče) te je u takvim arenaima gotovo preduvjet za agresivnu vožnju ili izvedbe *meltybrain*.
- ❖ Gumeni kotači imaju najveći faktor trenja na čeličnom podu i mogu biti montirani na elastičnu ili krutu felgu što pretežito ovisi o tome koriste li se magneti na podvozju kako bi dalje povećali akceleraciju, upravljivost i sposobnosti guranja.
- ❖ Spužvasti kotači (Slika 12. lijevo – *undercutter* robot Billy [28]) imaju iste prednosti kao elastični naplatci (felge) s tim da se pretežito koriste kod nezaštićenih kotača kako bi zadržali svoju funkciju i nakon gubitka forme.



Slika 12. Robot sa spužvastim [28] (lijevo) i s nazubljenim kotačima [27] (desno)

6.3. Nekonvencionalni pogonski sustavi

Gusjenice (eng. *caterpillars*) pružaju odlično prianjanje na podlogu, ali usporavaju kretanje i smanjuju okretnost robota. Također, kako ih protivnici s moćnim oružjem mogu lako oštetiti, preporuka je izbjegavati ih sve dok razlog njihove implementacije nije dobro opravdan.

Pogonski sustavi s nogama (eng. *walkers*) su sporiji i manje učinkoviti te okretni od kotača. Najčešće se koriste zbog pravila natjecanja koja dopuštaju dodatnu masu nekonvencionalnim pogonskim sustavima. Kompetitivnija varijanta njih su miješajući mehanizmi (eng. *shufflers*) (Slika 13. lijevo – Monkfish [29], desno – Silent Spring [30]) koji su kompaktni, brzi i otporni te im se zbog toga, u zadnje vrijeme, bonus masa smanjuje ili čak potpuno oduzima.



Slika 13. *Shuffler* roboti [29 i 30]

6.4. Vožnja naopako

Mnogi uspješni borbeni roboti su sposobni za rad čak i kad su prevrnuti (eng. *invertible*). Postizanje invertibilnosti može uključivati upotrebu viših kotača, implementaciju mehanizma za samopodizanje (rijetko se koristi u lakšim kategorijama) ili pažljivo oblikovanje robota.

Prilikom konstruiranja za invertibilnost, potrebno je paziti na težište i promijenjeno trenje na kotačima u naopakoj orijentaciji, sveukupnu geometriju te oklopne dijelove koji bi svojom deformacijom mogli nasukati robota. Također, potrebno je riješiti se ravnih ploha na robotu. Postoji izreka u svijetu borbi robota: ako robot nakon udarca može doći u stabilan položaj u kojem mu kotači nisu u doticaju s tlom, to će se i dogoditi (eng. *it did a thing*).

Slika 12. i Slika 13. desno su ujedno i primjeri robota koji mogu voziti prevrnuti, a na istim slikama lijevo su primjeri robota koji se, zbog lukavo izvedene geometrije te pozicije težišta, automatski ispravljaju odnosno vraćaju u uspravan položaj.

7. VRSTE OKLOPA BORBENIH ROBOTA

7.1. Tradicionalan oklop

Tradicionalne oklopne ploče koriste se s ciljem apsorpcije i prijenosa kinetičke energije udara bez značajnog oštećivanja oklopa. Redovito se primjenjuju materijali visoke tvrdoće što uzrokuje lomljenje oštih rubova protivničkog oružja, dok je visoka žilavost poželjna kako bi se izdržali udarci bez pucanja. Zbog svoje velike gustoće, pogotovo u lakšim kategorijama borbenih robota, potrebno ih je strateški (konzervativno) primjenjivati na mjestima koja su najviše izložena i udarana. Ove ploče mogu biti i kompozitne odnosno sastavljene od više slojeva različitih materijala radi postizanja optimalnih svojstava.

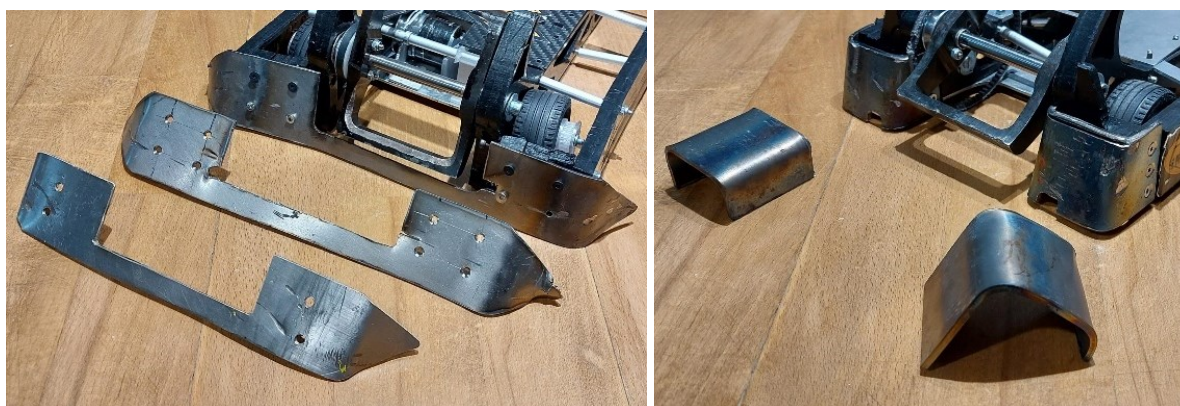
Oblik i geometrija ovog tipa oklopa su posebno važni zbog kuta defleksije i montaže:

- ❖ Kut defleksije se razlikuje ovisno o tome koju primarnu funkciju ima oklop.

Ukoliko je napadačka, utoliko je oklop izveden nešto strmije što rezultira većim prijenosom energije kojim se nastoji, s manje rizika, usporiti ili onеспособiti neprijateljsko oružje.

Ako je kut oklopa manji, tada oklop ima primarno obrambenu funkciju kako otežava učinkovit prijenos energije, istovremeno se braneći.

- ❖ Kod montaže ovog tipa oklopa bitno je ne podcijeniti naprezanja i osigurati da, ako dođe do kritičnog pucanja ili deformacije, ostali sistemi (oružje i pogon) neće biti onеспособljeni samim oklopom.



Slika 14. Različite verzije ralica (lijevo) i pokušaji savijanja branika (desno)

7.2. Ablativni oklop

Ablativne oklopne ploče su zamišljene da sprječavaju kritičnu štetu na robotu tako da se same oštete kroz proces ablacije koji uključuje uklanjanje materijala oklopa. Rade se iz materijala niske tvrdoće i niskog tališta kako bi se olakšala ablacija. Zbog tih svojstava, u lakšim kategorijama borbenih robota, polimerni oklopi su najčešće korišteni. Također, učinkoviti su u apsorpciji kinetičke energije udara što uz mehanizam ablacije i razmaknut oklop (dovoljan zračni džep do unutrašnjih, krutih komponenti) smanjuje prijenos energije na ostatak robota.

Nedostatak je učestalo mijenjanje (uzima vrijeme na natjecanju, a i prije njega zbog pripreme velikog broj rezervi). Sličan princip se koristi i u *Formuli 1* gdje se, pri sudaru automobila, kompozitni dijelovi od ugljičnih vlakana otkidaju od glavne kade u kojoj sjedi vozač. Dobru opciju predstavljaju i drvene ploče koje imaju sličan učinak, ali očekivana oštećenja izgledaju poprilično loše i moguće je da sudci precijene načinjenu štetu prilikom bodovanja.



Slika 15. Rezerve ablativnog oklopa (za Eggsecutionera_V3)

7.3. Reaktivni oklop

Još se razlikuje i reaktivni oklop koji reagira na udar oružja kako bi spriječio daljnja oštećenja.

Primjeri nekih od reaktivnih oklopa su:

- ❖ eksplozivni reaktivni oklop koji je primjenjivan kod tenkova gdje se, prilikom udara, oklop lokalno detonira i, pored ostalog, efektivno povećava svoju debljinu (opet zračni džep),
- ❖ električni reaktivni oklopi koji koriste inačicu visokonaponskog kondenzatora kako bi neutralizirao oružje protivnika, uništavajući mu vrh i tako umanjio prijenos energije te
- ❖ protuvibracijski oklop (eng. *shock-mounted armor*) koji koristi (sendvič konstrukciju i/ili) elastične materijale kako bi deformiranjem apsorbirao dio energije udarca. Najčešće se koristi TPU (eng. *Thermoplastic PolyUrethane*).



Slika 16. TPU oklop robota horizontalca koji štiti ploču od karbon-kevlara

8. KUPOVNI BORBENI ROBOTI

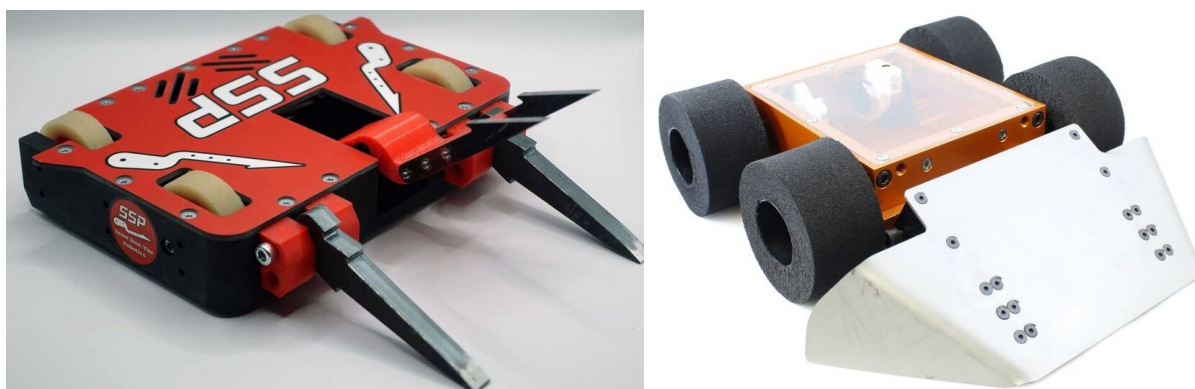
8.1. Kupovni kompleti za izradu gotovih borbenih robota

Kupovni kompleti za izradu gotovih borbenih robota tj. set roboti (eng. *kit bots*) predstavljaju iznimno privlačan način za započeti u ovom dinamičnom sportu. Čak se smatraju preporukom za djecu i odrasle koji nemaju iskustva u struci, a obožavatelji su serije *BattleBots* i htjeli bi se sami okušati na manjim natjecanjima. Izgradnja takvih kompleta omogućuje brzo usvajanje osnovnih znanja o sistema borbenih robota, uključujući: mehaniku, pogon, kotače, elektroniku te njihov međusoban utjecaj.

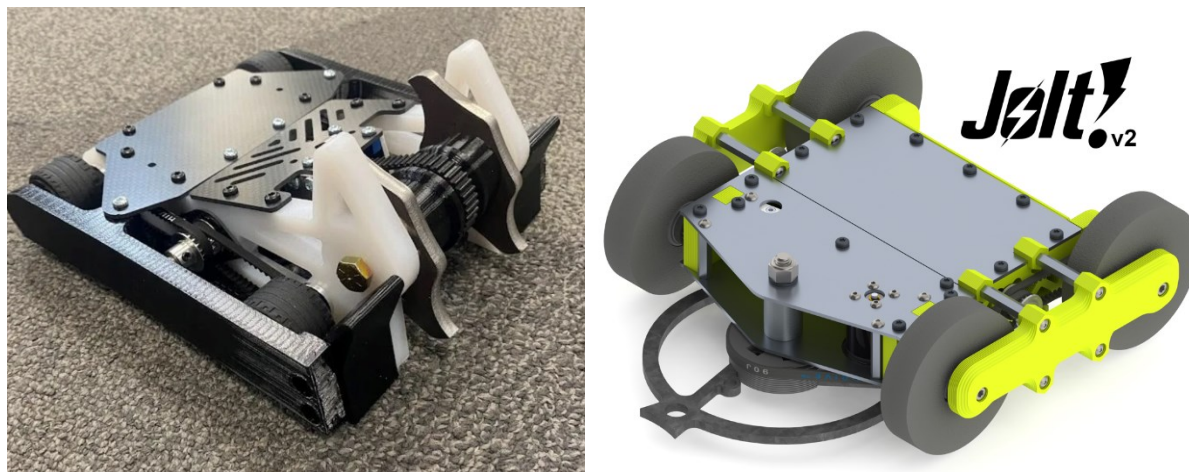
Iskustvo i znanja stečena prilikom sastavljanja gotovih kompleta, kod mlađih generacija, često prerastu u strast i motivaciju za svijet robotike te se kroz rad, natjecanja i komunikaciju s drugim entuzijastima, educiraju o mnogim strojarskim temama, ali možda i bitnije, uče rješavanju problema te radu u timu, s rukama i pod stresom.

Neki od danas dostupnih i popularnih kupovnih kompleta za izradu borbenih robota u kategoriji *beetleweight* su: SSP (Slika 17. lijevo [31]), D2 (Slika 17. desno [32]), Peter Bar Kit (Slika 18. lijevo [33]), Jolt! V2 (Slika 18. desno [34]), Weta X [35], Black Frost [36], FTBB [37].

SSP modularni kit se ističe kako je proizvod tima *Just 'Cuz Robotics* [38] koji su posvećeni pružanju usluga entuzijastima borbenih robota i imaju aktivan (i koristan) *YouTube* kanal [39].



Slika 17. Sklopljeni kontrolni set roboti [31 i 32]



Slika 18. Sklopljeni napadački set roboti [33 i 34]

8.2. Unajmljivanje konstruktora za izradu personaliziranih robota

Potrebno je istaknuti i unajmljivanje konstruktora za izradu personaliziranih dizajnova (eng. *commissions*) kao moguću alternativu gotovim kompletima za ulaz u sport, ali je zbog više razloga problematično i zahtjeva dozu opreza tj. ozbiljnosti:

- ❖ Potencijalna složenost može premašiti mogućnosti početnika s ograničenim vještinama te ga zavarati u samoprocjeni sposobnosti prevođenja ideje u funkcionalnog robota.
- ❖ Realizacija naručenog dizajna uključuje naručivanje i proizvodnju različitih dijelova što može predstavljati izazove onima koji nisu upoznati s tim aspektima dok kompletni setovi obično uključuju, ne samo sve potrebne dijelove već i upute za sastavljanje nalik onima koje budu priložene uz bilo koji LEGOv proizvod što pruža strukturirani put učenja prije istraživanja prilagođenih dizajnova.
- ❖ Kvaliteta unajmljenog konstruktora varira, a i naposljetku, je skupo s obzirom na to da inženjerski rad povezan s dizajniranjem robota ima značajnu vrijednost te
- ❖ Vrijednost neovisnog dizajniranja i samostalne izrade robota podrazumijeva stjecanje korisnih vještina, počevši s 3D modeliranjem različitim (pa i besplatnim) CAD programima što je gotovo preduvjet za kvalitetno učenje i korištenje tehnologije 3D ispisa (printanja) što je globalno brzorastuća disciplina i uz to iznimno korisno za borbe robota.

Ističe se tim *Immersion* [40] s kvalitetom rada, brzinom isporuke i priloženim uputstvima.

9. BORBENI ROBOT EGGSECUTIONER

U ovom poglavlju se proučava cjelovit razvoj originalnog robota, Eggsecutioner, koji je dizajniran i konstruiran za prvo hrvatsko natjecanje Fightbotics, održanom u studenom 2022. godine. Pojedini sistemi i njihove izvedbe su uspoređene s njegovim robotom nasljednikom s drugog, polusezonskog, natjecanja koji je za potrebe lakšeg snalaženja u ovom radu nazvan Eggsecutioner_V2. Isti je za zadnje natjecanje u trenutku pisanja ovog rada, održanog u prosincu 2023. godine, nepromijenjen te preimenovan u Penzionera. Uz njega, tim Judge&Jury se natjecao s još dva robota: zadnjom verzijom, Eggsecutionera, u nastavku rada oslovljavanju s Eggsecutioner_V3 te robotom vrtlicom FlyingPan, koji za potrebe ovog rada nije raspravljan.

Kako su kontrole i elektronika robota ostvareni sa standardnim komponentama za RC modele, detalji neće biti opsežno raspravljani u ovom radu.

Prilikom konstrukcije borbenih robota, ključno je svjesno upravljati ograničenjem mase. Napominje se da je dopuštena masa za posljednje natjecanje promijenjena s 1,3 kg (po uzoru na američki standard 3 lb tj. 1360 g) na 1,5 kg (europski standard za beetleweight klasu). Promišljena raspodjela masa između podsustava robota, usklađena s vizijom za robota, je ključ uspješnog dizajna. Grube smjernice poput pravila 30-30-25-15 postoje, gdje 30 % mase ide u pogonski sustav, 30 % u sustav oružja, 25 % u strukturu i oklop, te 15 % na baterije i elektroniku [41]. Ove smjernice služe u inicijalnoj fazi konceptualizacije, ali ih je dopušteno svjesno kršiti, ovisno o specifičnostima pojedinog robota. Na primjer, kontrolni robot može dati prioritet pogonskom sustavu i oklopu, dok će napadački robot imati lakši pogon i manje oklopa, s fokusom na oružje.

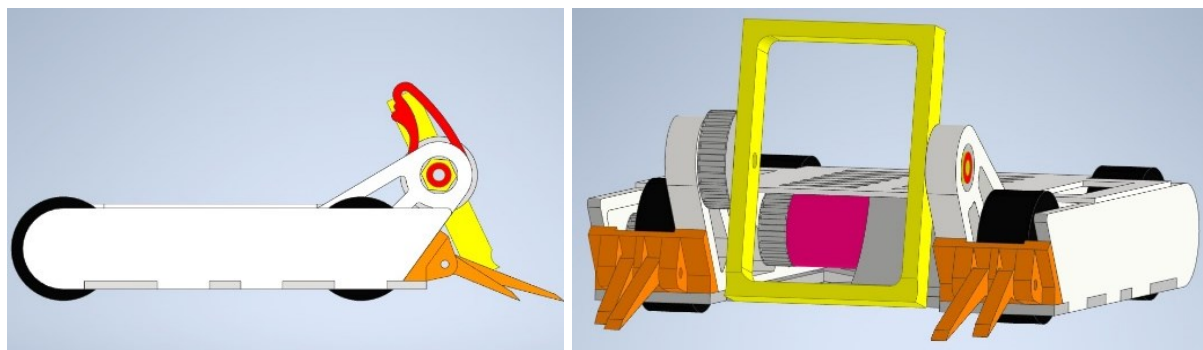
Prije odabira dizajna (a i konstantno referenciranje tijekom same izrade), posvećeno je određeno vrijeme proučavanju prethodnih borbi na svjetskoj razini što podrazumijeva brojne video sadržaje, tutorijale, članke, knjige [1 i 41] te možda najutjecajnije: komunikaciju s mnoštvom hobista pa čak i bivših natjecatelja emisije *BattleBots*. Zajednice entuzijasta [16 i 42] su voljne pomoći te je preporuka za one zainteresirane da im se pridruže i potraže savjete ili uključe u raspravu.

Nažalost, dokumentirati sve korisne savjete i eksplicitno navesti njihove izvore je vrlo teško kada je riječ o usmenoj predaji i iskustvenim procjenama, stoga je potrebno kritički sagledati sve navedeno bez izvora u nastavku rada.

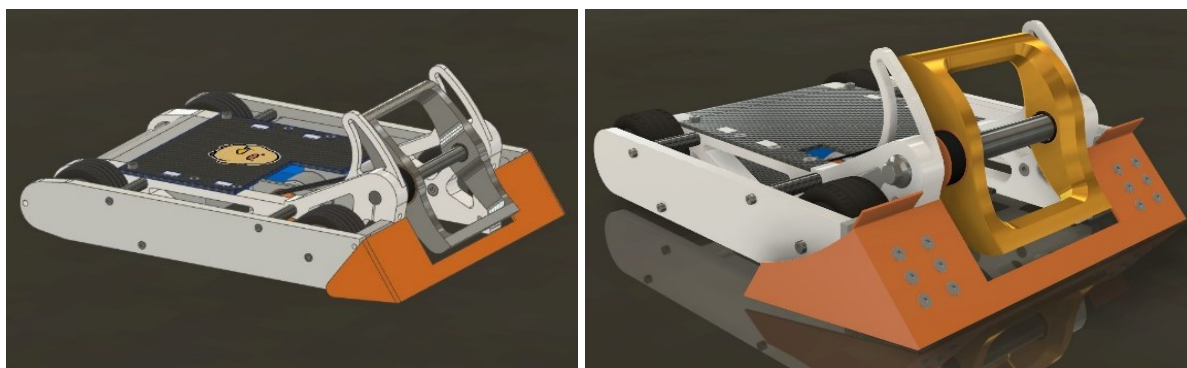
Na slikama 19 do 24 je kronološki prikazan razvoj robota Eggsecutioner od ideje do rezultata odnosno prvog mjesta na najvećem natjecanju borbenih robota u regiji.



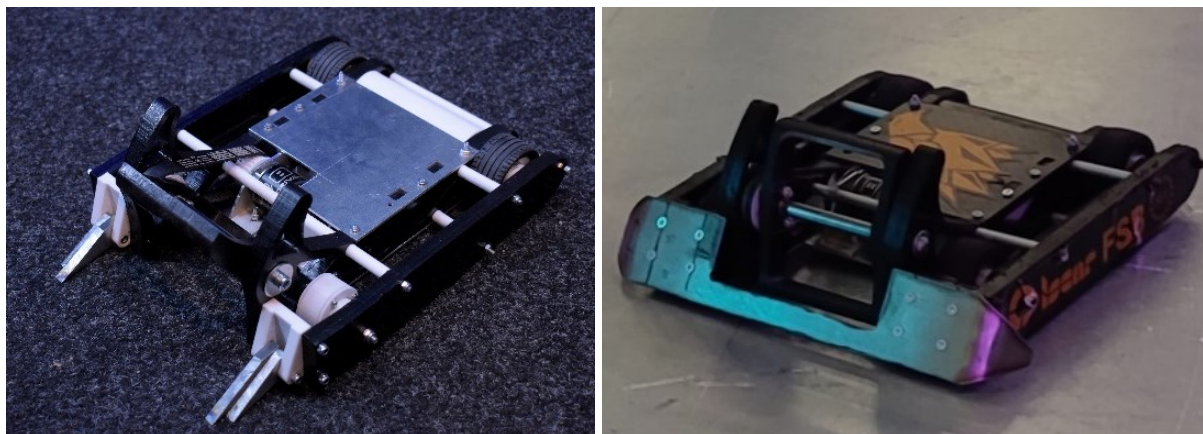
Slika 19. Inspiracija: robot Lynx koji je promijenio scenu u Americi [43 i 44]



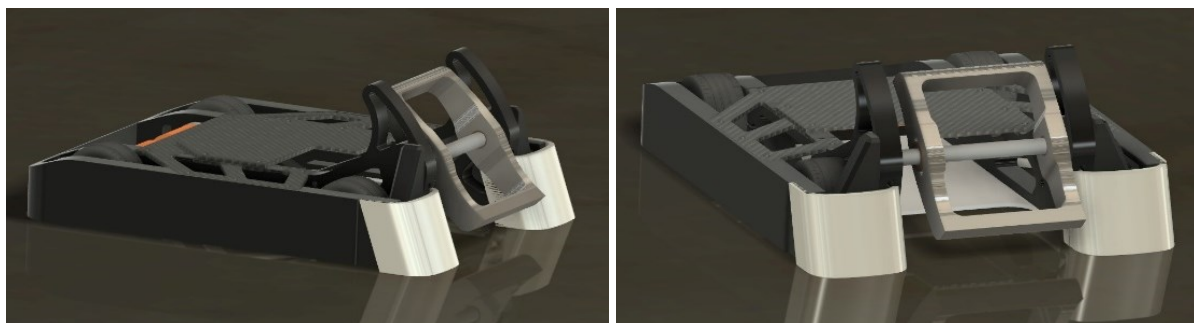
Slika 20. CAD rane verzije Eggsecutionera u kokošjim bojama (konfiguracija s klinovima)



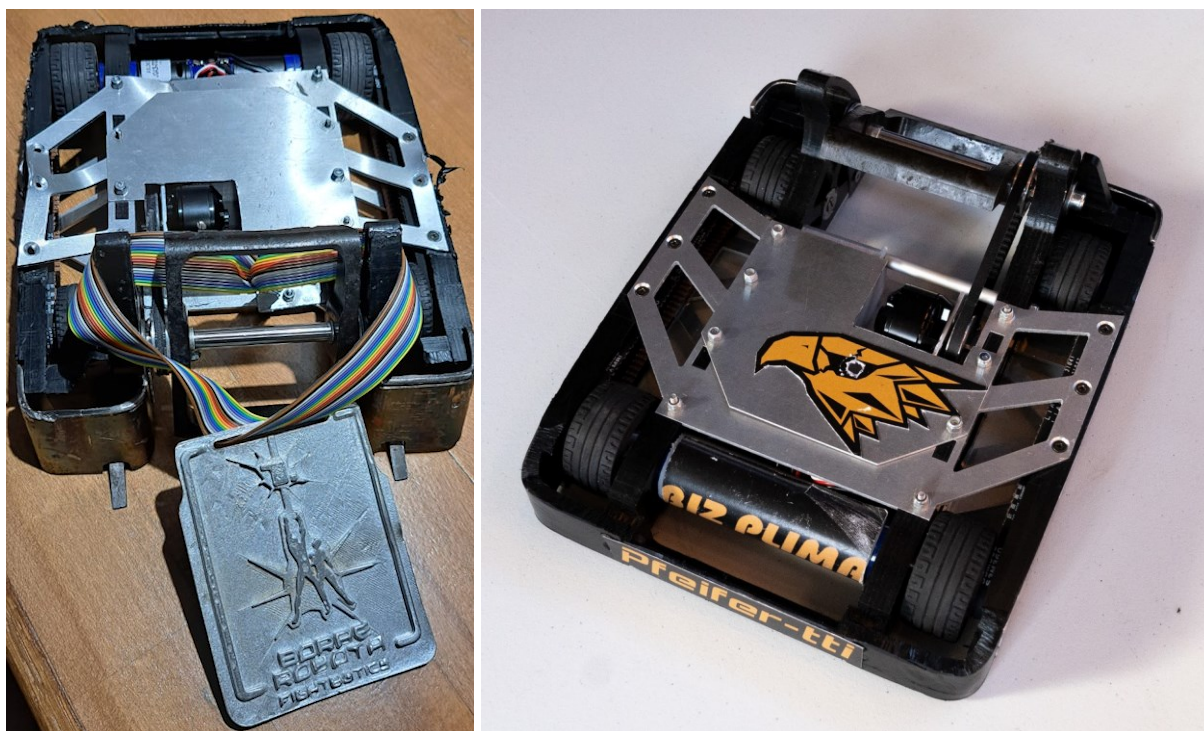
Slika 21. CAD finalne verzije robota Eggsecutioner (konfiguracija s ralicom)



Slika 22. Eggsecutioner_V1 (lijevo) te Eggsecutioner_V2(desno)



Slika 23. Eggsecutioner_V3 koji je pobedio u prosincu 2023.



Slika 24. Eggsecutioner_V3 s medaljom poslje borbi (lijevo) i prije, bez oštećenja (desno)

9.1. Sustav oružja

9.1.1. Odabir dizajna oružja

Kako je po pravilniku natjecanja obavezno korištenje aktivnog oružja [22], nakon istraživanja uspješnih robota, odlučilo se za izradu vertikalca kako su nešto izazovnije konstrukcije od horizontalaca, a i imaju prirodnu prednost nad njima. Također, promatrale su se izvedbe koje koriste široko oružje zbog neiskustva tima u vožnji (lakše ciljanje i obrana).

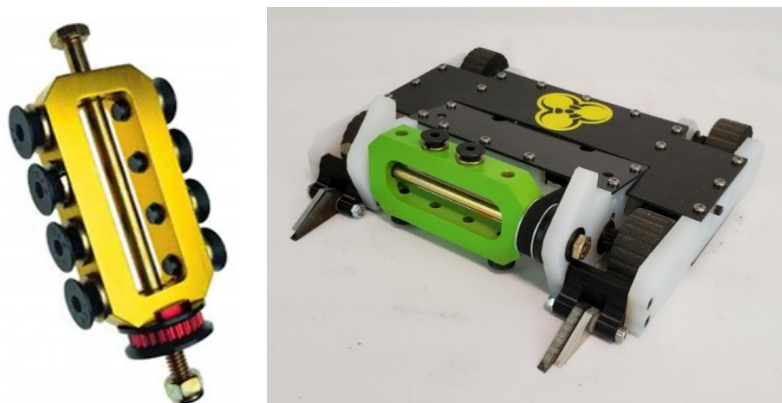
S ciljem povećanja momenta tromosti oružja, uz pravilnikom ograničenu masu oružja i obodnu brzinu, nastoji se rasporediti što više mase oružja na što veći radijus.

Razmotreno je nekoliko oblika oružja, uključujući dizajn u obliku cilindra s pričvršćenim zubima duž oboda (Slika 25. – robot Yeti [45]). Takvo oružje je trebalo biti izrađeno od aluminijske cijevi zatvorene na oba kraja, dok bi se dužinom oboda cilindra pričvrstili zubi od čeličnih umetaka ili bi se koristile potrošene pločice od tvrdog metala za tokarenje. Kod ovog tipa oružja potrebno je dodatno pripaziti na maksimalan zagriz odnosno veličinu udarnog zuba kako ne bi, barem dok se oružje vrti, aluminijski bubanj bio udaran.



Slika 25. Aluminijски bubanj s čeličnim zubima (lijevo) i robot [45] koji ga koristi (desno)

Druga varijanta oružja bi, također, bila izrađena od aluminijske cijevi s udarnim čeličnim ili tvrdometalnim dijelom, ali bi nosivi dio bio kvadratnog profila. Ovakva izvedba, iako ima nešto lošiji moment inercije za istu masu, lakša je za realizaciju jer ne zahtjeva zavarivanje aluminijske cijevi i pomno balansiranje. Slična se oružja često primjenjuju u sportu te nude kao gotov proizvod (Slika 26. – *Fingertech beater bar* [46]).



Slika 26. *beater bar* [46] (lijevo) i robot koji ju koristi (desno)

Na kraju je odabrano monolitno oružje pravokutnog oblika (eng. *eggbeater*) po uzoru na Lynxa. Osim reducirane kompleksnosti naspram navedenih alternativa, ovako izvedeno oružje ima i najveću čvrstoću. Nedostatak je skupa strojna obrada koja se uspjela izrealizirati uz pomoć tvrtke *ISCAR alati* [47] i Laboratoriju za alatne strojeve, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za pomoć pri nabavi alata za OOC se još ističe tvrtka *Pfeifer TTI* [48].

9.1.2. Konstrukcija oružja tipa *eggbeater*

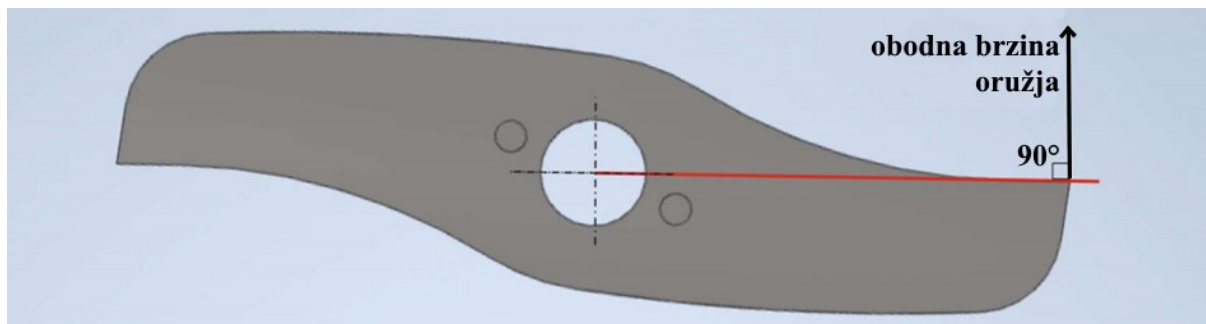
Kod spinnera, glavna svrha motora jest ubrzanje oružja do željene brzine rotacije u što kraćem vremenu. Kroz ovaj proces, oružje akumulira kinetičku energiju koja se pri udaru prenosi na protivničkog robota, nanoseći mu štetu ili ga bacajući u zrak te se proces ponavlja (osim kod pila robota). Konstrukcija oružja utječe direktno na njegovu izdržljivost i učinkovitost prijenosa energije. Faktori poput oblika udarnog brida, brzine vrtnje, broja zuba i brzine kretanja robota netom prije udara igraju ključnu ulogu u optimizaciji prijenosa kinetičke energije.

S dodijeljenom masom od približno 200 g u početnoj fazi konstruiranja, počinju se razmatrati dimenzije oružja. Iako je po pravilniku natjecanja (tada je ukupna masa robota još uvijek bila 1,3 kg) ograničenje mase oružja 400 g, za ovaj tip robota 200 g je sasvim dovoljno.

- ❖ Radijus oružja je određen proračunom obodne brzine vrha oružja, koja je ograničena pravilnikom natjecanja na 75 m/s.
- ❖ Širina oružja je prilagođena prostoru između lijevog i desnog nosača (glavni dio šasije), koji je bio fiksno postavljen radi rasporeda elektroničkih komponenti unutar robota.

Preliminarnim proračunima dolazi se do dimenzija od 75 * 90 mm (širina * visina).

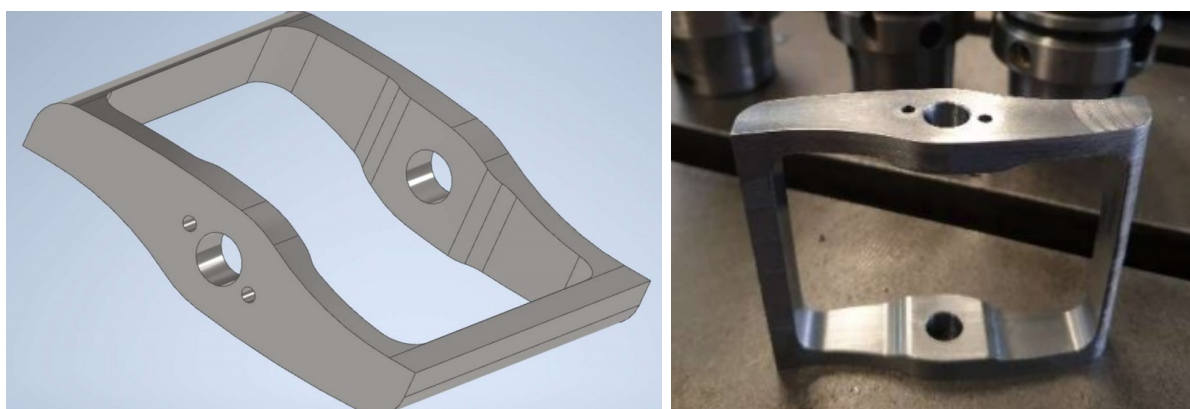
Oružje je oblikovano tako da ima neutralan kut oštrice, tj. da je prednja površina oštrice okomita na obodnu brzinu vrha oružja (Slika 27.). Manji kut oštrice inače bolje zagriža tj. kida materijal, ali je i manje podržan pa prije puca. Veći kut bi bio više postojan.



Slika 27. Napadni kut oštrice oružja

Zbog veće krutosti (i jednostavnosti CNC obrade) koristi se osovina (eng. *dead shaft*). Korištena je kromirana čelična šipka promjera 8 mm i dužine 90 mm koja teži 50-ak grama. Integracijom nje u oružje moglo se uštedjeti na masi osovine u sredini (oružje s ugrađenim vratilom, eng. *live shaft*) te bi se omogućilo korištenje kugličnih ležajeva u glavnim nosačima umjesto kliznih ležajeva na osovini koji smanjuju kritični presjek oružja.

S obzirom na odabir, kao što je vidljivo na slici 28, oružje je oblikovano sa zadebljanjima na kritičnim presjecima te zamaknutim rupama za prihvat remenice u poziciju s najviše okolnog materijala. Slika 32. je primjer puknuća oružja po kritičnom presjeku uslijed nepračenja ovih smjernica, lošeg odabira materijala te dovoljno snažnog udarca.



Slika 28. CAD model oružja (lijevo) i oružje nakon glodanja (desno)

Sljedeći korak pri razmatranju oružja je određivanje broja oštrica (udarajućih zubi) kako bi se osigurao, iskustveno odabran, zadovoljavajući zahvat (eng. *bite*) od 3 do 8 mm. Zahvat predstavlja mjeru dubine kojom oružje teoretski prodire u protivničkog robota tijekom udara i direktno utječe na efikasnost prijenosa energije iz oružja u protivničkog robota. Ovaj parametar ovisi o brzini vrtnje oružja, broju zuba i zbroju putnih brzina oba robota tijekom napada.

Brzina vrtnje pogonskog DC motora bez četkica (snage 500W) od oružja iznosi maksimalno 15 000 okretaja u minuti. Motor je povezan s oružjem preko klinastog remena kako bi bio izoliran od udara, odnosno kako bi se omogućilo proklizavanje. Većinu remenja za natjecanje borbenih robota je donirala tvrtka *SET Bjelovar* [49]. Potrebno je istaknuti i tvrtku *Biz – Plima* [50] koja je također pomogla sa subvencioniranim remenjem te remenicama. Kako je prijenosni omjer remenica približno 1:1 zbog konstrukcijskih ograničenja, kutna brzina oružja je jednaka onoj motora i iznosi $\omega = 1571$ rad/s. U praksi je ipak nešto manja zbog gubitaka na kliznim ležajevima od sinterirane bronzne, odnosno onim s teflonskim premazom koji su više dostupni te za potrebe borbi od 3 min, adekvatni. Točni se okretaji mogu očitati preko frekvencije zvuka.

Za potrebe proračuna zahvata prema jednadžbi (1), uzeti su navedeni podatci uz pretpostavku gibanja robota svojom maksimalnom brzinom (zbog velike akceleracije) koja iznosi $v_x = 2,25$ m/s i stacionarnog protivnika (što je kritični slučaj):

$$d_{max} = (v_x + v_y) * \Delta t = (v_x + v_y) * \frac{2 * \pi}{(n * \omega)} =$$

$$= (2,25 + 0) * \frac{2\pi}{2 * 1571} = 0,0045 \text{ m} = 4,5 \text{ mm} \quad (1)$$

gdje su:

d_{max} – maksimalni zahvat, m

v_x – brzina prvog robota, m/s

v_y – brzina drugog robota, m/s

Δt – vrijeme potrebno da zub prođe kroz fiksnu točku rotacije, s

ω – kutna brzina, rad/s

n – broj oštrica.

Korištenjem simetričnog oružja s dvije oštrice, maksimalni zahvat iznosi 4,5 mm.

Kinetička energija oružja je izračunata po formuli (2) pomoću podataka iz programskog paketa *Autodesk Inventor* [49] u kojem je cijeli robot modeliran. Očitana masa oružja iznosi $m = 207$ g, a moment tromosti oko osi rotacije koja prolazi kroz ležajna mjesta iznosi $I = 0,0001917$ kgm².

$$E_k = I * \frac{\omega^2}{2} = 0,0001917 * \frac{1571^2}{2} = 236,57 \text{ J} \quad (2)$$

gdje su:

E_k – rotacijska kinetička energija, J

I – moment tromosti oko osi rotacije oružja, kgm²

ω – kutna brzina, rad/s.

Izračunata kinetička energija od 236 J je ekvivalent energiji pištoljskog metka kalibra 8 mm. Za podignuti neprijateljskog robota od 1,5 kg u zrak, iskustveno je potrebno ne više od 30J uspješno prenesene energije. Jednadžba (3) to dalje ilustrira:

$$E_p = m * g * h = 1,5 * 9,81 * 1 = 14.715 \text{ J} \quad (3)$$

gdje su:

E_p – potencijalna energija, J

m – masa tj. inercija robota, kg

g – ubrzanje sile teže, m/s²

h – visina krova arene od njenog poda, m.

Oružje je podložno udarnim opterećenjima te je iz tog razloga za izradu oružja odabran čelik za cementiranje, 16MnCr5. Ovaj čelik nakon cementiranja zadržava visoku žilavost jezgre i pruža zadovoljavajuću tvrdoću površine.

9.1.3. Moguća poboljšanja sustava oružja

Nakon tri natjecanja i više od 100 udaraca, oružje je u dobrom stanju. Krična geometrija i materijal su zadovoljili sva očekivanja. Kada se kategorija povisila na 1,5 kg, sav se višak mase mogao iskoristiti na oružje, ali novo nije bilo moguće izraditi na fakultetu uslijed renovacija. Kasnije je tim Judge&Jury nabavio hobistički CNC te je za iduće natjecanje, osim povećanja dimenzija tj. mase, plan napraviti asimetrično oružje sa sekundarnom oštricom na protutuugu.

S obzirom na velike gubitke na kliznim ležajevima, umjesto da se oružje vrti na 15 000 okretaja u minuti što rezultira s maksimalno dopuštenom obodnom brzinom od 75 m/s, vrti se sa svega 12 000 okretaja u minuti. Obodna brzina je vrlo bitna prilikom udaraca vertikalaca oružjem na oružje budući da onaj s većom zadaje udarac te je standardna praksa među kompetitivnim *beetleweight* vertikalcima (što je i slučaj kod robota Lynx) da se oružje okreće na čak 20 000 okretaja u minuti. Nadomještati brzinu vrtnje oružja multiplikacijom s motora tj. prijenosnim omjerom je nepoželjno budući da se tada gubi na ubrzanju (uz to je na Eggsecutioneru nemoguće zbog dimenzija šasije i svojstava remena) pa je plan koristiti DC motor bez četkica s većom snagom tj. Kv-om što će za bateriju jednakog broja ćelija i nazivnog napona prirodno rezultirati većim okretajima oružja.

Motori nisu bili prilagođavani udarnim opterećenjima. Inače se prilagodba izvodi rastavljanjem motora i pažljivim prekrivanjem magneta epoksidnom smolom (eng. *battle harden*) što umanjuje šanse katastrofalnog kvara uslijed borbe zbog pucanja magneta elektromotora.

9.1.4. Primjeri štete na oružju

Slika 29. prikazuje sadašnje stanje oružja nakon više od jakih 100 udara. Također, obje oštrice oružja su poprilično potrošene, posebice sami rubovi koji su primali udace od horizontalaca.



Slika 29. Deformirano oružje s Eggsecutionera_V3



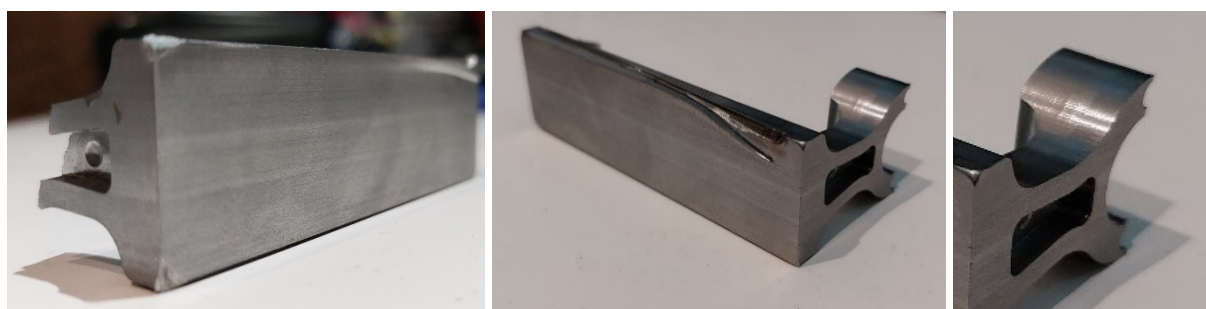
Slika 30. Detalj otkrhnute oštrice s Eggsecutionera_V3

Kako oružje rotira velikom brzinom, vibracije su popriličan problem pa je prvo glodano oružje, zbog loših tolerancija, bilo potrebno izbalansirati. To se ostvarilo skidanjem materijala turpijom na težem od dva kraka s unutrašnje strane udarnog brida gdje se tvrda udarna površina ne narušava. To je oružje bilo korišteno (i oštećeno) samo na Penzioneru 2023. godine (Slika 31.).



Slika 31. Izbalansirano oružje s Penzionera

Slika 32. prikazuje puknuto oružje glodano iz (relativno) tvrdog, nezakaljenog, alatnog čelika. S obzirom na to da je materijal zarezan, zna se da je cementirano oružje na Eggsecutioneru tvrđe (uz to i žilavije). Količina materijala tj. *mesa* oko kritičnog presjeka nije zadovoljavajuća.



Slika 32. Neprijateljsko oružje koje je Eggsecutioner_V3 pukao i zarezao punom dužinom

9.2. Sustav pogona

9.2.1. Pogon na sva četiri kotača

Pogonski sustav je rađen po uzoru na Lynxa i zapravo je, uz vještu vožnju, njegova najjača točka. Kada bi taj odabir trebali opravdati: s dva kotača, pogotovo ako pravac osovine prolazi težištem robota, okretnost je najveća, ali takva okretnost otežava upravljivost, koja je ionako smanjena kod kompetitivnih vertikalaca zbog značajnog utjecaja giroskopskog efekta. Osim olakšanog upravljanja, četiri kotača ipak dolaze s određenom sigurnosnom zalihom kako je uvjet za eliminaciju nekontrolirano upravljanje što gubitak jednog od dva kotača podrazumijeva. Naposljetku, (bez magneta koji bi povećali trenje) s četiri kotača proklizavanje je manje nego s dva pa je samim tim akceleracija veća što omogućava robotu da brzo reagira tijekom borbe te da osigura učinkovit zahvat oružja s minimalnim zaletom.

Da masa nije ograničavajući faktor, tim više u ovakvom složenom robotu koji nastoji puno toga obavljati dobro, pogon na sva četiri kotača bi idealno bio izveden s četiri neovisna pogonska motora, gdje svaki pogoni svoj pojedini kotač. Međutim, konfiguracija koja se za dane zahtjeve pokazala najboljom je ona s dva elektromotora s četkicama i integriranim reduktorima koji pogone druga dva kotača remenskim prijenosom.

Brzina kretanja robota se računa prema jednadžbi (4):

$$v_x = s * n = 2 * \pi * r * n = 0,043,2 * \pi * 1\ 000 = 2,25 \text{ m/s} \quad (4)$$

gdje su:

v_x – brzina prvog robota, m/s

s – put tj. opseg kotača, m

n – broj okretaja kotača, /s.

Maksimalna brzina robota iznosi 2,25 m/s ili 8,1 km/h što možda ne zvuči impresivno brzo, ali bi proporcionalno odgovaralo automobilu koji vozi 200 km/h. Također, u areni veličine dijagonale 2,8 m, to je dovoljno brzo da bude granično neupravljivo. Smjernice nalažu da robot mora moći proći dijagonalom arene unutar dvije sekunde inače ne samo da je u nepovoljnom položaju s obzirom na konkurenciju, već je i karakteristično tromo (te nezabavno) za upravljati.

9.2.2. Prijenos momenta

Prijenos momenta s pogonskih kotača na ostale može se ostvariti na više načina s tim da je u ovoj težinskoj kategoriji remenje najzastupljenije.

- ❖ Tarenice mogu biti dobar odabir ako se koristi DC motor bez četkica koji radi na visokim okretajima i onda, bez reduktora, direktno se vratilom malog promjera vrti u kontaktu s kotačem znatno većeg promjera. Takva izvedba štedi na masi, izolira motor od šokova i služi kao reduktor što je posebno bitno kod DC motora bez četkica koji, ako nisu popraćeni senzorikom, mogu kretati u različitim trenucima što onemogućava kontrolirano pravocrtno gibanje. Taj utjecaj je zanemariv ako postoji velika redukcija, jer je tada ta razlika u okretajima na motoru svega par stupnjeva na izlaznom vratilu.
- ❖ Zupčanici i lančani prijenos se koriste za više specijalizirane primjene.
- ❖ Razmatran je bio i nekonvencionalni način prijenosa momenta pomoću užeta (eng. *capstan drive*) tj. žice od poliamida (silk za pecanje). Žica bi se spojila u beskonačni krug, a trenje za prijenos momenta bi se osiguralo omotavanjem žice oko kolotura dovoljnim brojem namotaja. Ovakav pristup je iznimno male mase, međutim, realizacija je kompliciranija.
- ❖ Na kraju je odabrano zupčasto remenje zbog jednostavnosti i prihvatljive mase. Direktno su pogonjeni stražnji kotači pa s prednjima povezani remenom. Potrebno je pripaziti da direktno pogonjeni kotači budu dobro zaštićeni kako ne bi bili udareni ili deformacijom oklopa zakočeni. Zbog upravo tog rizika, mnogi se odlučuju potpuno izolirati motore, a moment na sve kotače osigurati remenom (Slika 33. je primjer izoliranih motora).



Slika 33. Konfiguracija pogona s motorom u sredini kod robota Lynx [44]

9.2.3. Materijal gume

Za podloge natjecateljske arene od čelika, kotači s gumenom oblogom imali su najviše smisla. Kako bi se odabrala prikladna guma, razmatrani su razni gumeni materijali i proizvodi;

- ❖ Lijevani dvokomponentni ili jednokomponentni gumeni materijali su standard na *NHRLU*. Kako se lijevanje vrši u 3D printane kalupe, proizvedena guma je oblikom prilagođena robotu i ujedno zadržava najbolja svojstva, ali je realizacija komplicirana.
- ❖ Dobra alternativa su gume 3D printane iz TPUa (eng. *Thermoplastic PolyUrethane*) koje izvrsno upijaju udare pa čak i direktne udarce te su, kao i sama tehnologija 3D printanja, maksimalno prilagodljive.
- ❖ Prihvaćeno rješenje su LEGO gume jer predstavljaju izvrstan kompromis između prijanjanja (veće trenje kod mekših guma) i otpornosti na trošenje (manja deformacija kod tvrdih guma). Katalog LEGO guma [51] je raznolik, i opsežan te se mnoge mogu jeftino nabaviti na stranicama poput BrickLinka [52]. Preporuka je razmotriti i potencijalno koristiti upravo neku od njih zbog jednostavnosti izvedbe i nabave. Konkretno je odabrana guma 43,2x22 ZR kako najbolje odgovara gabaritima robota.

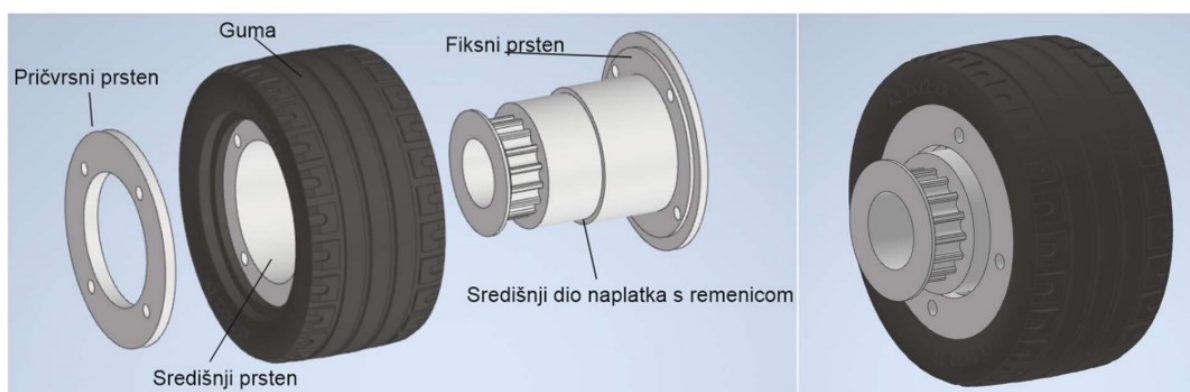
Bez obzira o kojoj je gumi riječ, potrebno je obratiti pažnju na deformabilnost i prijenos sila. Bolje je kad guma ima mekanu ispunu pa prilikom udara vratila ili osovine pogonskih motora nisu opterećene kako je dopušteno robotu da naliže svojejom kompletnom konstrukcijom. Ukoliko je felga izvedena bez ispune kao što je slučaj na *Eggsecutioner_V1* (Slika 35.), utoliko odabrana guma, zbog nešto većeg bočnog zida, pruža (zadovoljavajuću) deformabilnost tj. onu veću od 4 mm što je (preporuka za) udaljenost od donje ploče do tla (eng. *ground clearance*).



Slika 34. LEGO gume 43.2x22 ZR

9.2.4. Naplatci

Za Eggsecutionera_V1 naplatci tj. felge su bili inspirirani postojećim rješenjima za montažu automobilske gume. Izrađeni su 3D printanjem tri dijela. Centralni dio naplatka služi za ugradnju na elektromotor te se na njemu nalazi remenica i prvi, fiksni prsten. Pritezanje na vratilo elektromotora se vrši radijalno preko utičnog vijka za podešavanje. Središnji prsten naplatka služi kao odstoynik za gumu, osiguravajući joj oblik i deformabilnost (ali nema ispunu do vrha) te pomoću njega i zadnjeg, pričvrsnog prstena, guma se ugrađuje na naplatak. Guma se steže između pričvrsnog prstena i fiksnog prstena na centralnom dijelu pomoću aksijalna četiri vijka. Rješenje, iako tehnički zanimljivo, suviše je kompleksno i krhko za ovu primjenu.



Slika 35. Prva verzija naplatka [20]

U idućoj iteraciji 3D printan naplatak se trebao, u teoriji, samokočno držati na aluminijskom, tokarenom konusu, no u praksi, (čak uz Loctite ljepilo za vijke) bi popustio. Ta verzija je, doduše, značajna kako se su se s njom krenuli koristiti naplatci s punom ispunom gume.

Dalje, prateći pravilo KSS (eng. *Keep it Simple Stupid*), u zadnjoj se iteraciji naplatak izveo kao sendvič konstrukcija. Aluminijski konus je dodatno pojednostavljen na oblik tokarenog diska s radijalnom rupom (urezan fini navoj) za utični vijak te još dvije aksijalne rupe (veći vijci nego ranije) za prihvat 3D printanog djela s tijelom, ispunom i remenicom (Slika 34. i Slika 36.).

Prednji kotač je sve vrijeme konceptualno nepromijenjen; Printani naplatak, nalik onom pogonskom, je konzolno montiran s glavnih nosača na kliznom ležaju i nešto dužem M3 vijku kako bi se kotač izolirao od bočnog oklopa (zbog elastične deformacije kod udara). Kao klizni ležaj za naplatak od PETGa (eng. *PoliEtilen Tereftalat Glikol*), koristila se aluminijska cijev ili polimerni IGUSov klizni ležaj (sponzorirano skupa s kromiranom šipkom za osovinu oružja od tvrtke HENNLICH [53]).

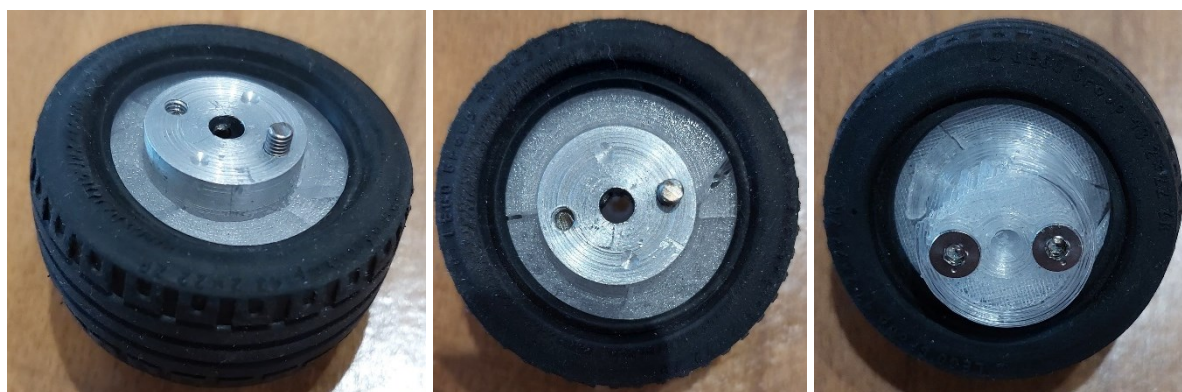
9.2.5. Moguća poboljšanja pogona

Za iduće iterativno poboljšavanje, planirane su izmjene na naplaticima u svrhu smanjena mase, veće pouzdanosti te lakšeg servisiranja. Namjera je očuvati punu ispunu gume kako bi se mogli koristiti magneti, čime se poboljšavaju vozne karakteristike (bitno tim više kako planirana brža rotacija oružja rezultira utjecajnijim giroskopskim efektom), istovremeno pazeći na opterećenje motora, budući da se za pogon koriste motori s četkicama snage 20 W koji pri pokretanju troše značajnu struju. Guma će se lijepiti na naplatak, a njen bok (eng. *tire sidewall*) odstraniti.

9.2.6. Primjeri štete na pogonskom sustavu

Redovito bi se, na starijim verzijama Eggsecutionera, onesposobio pogon zbog relativno izloženih stražnjih kotača te šasije odnosno bočnog oklopa koji nije bio dobro izveden. Čak i bez direktnog udara koji bi onesposobio pogonski motor ili printani naplatak, deformacija oklopa bi onemogućila slobodnu rotaciju pogonskog kotača pa tako i cijele pogonske strane (više o tome u poglavlju 9.3.6. Primjeri štete na sistemu šasije).

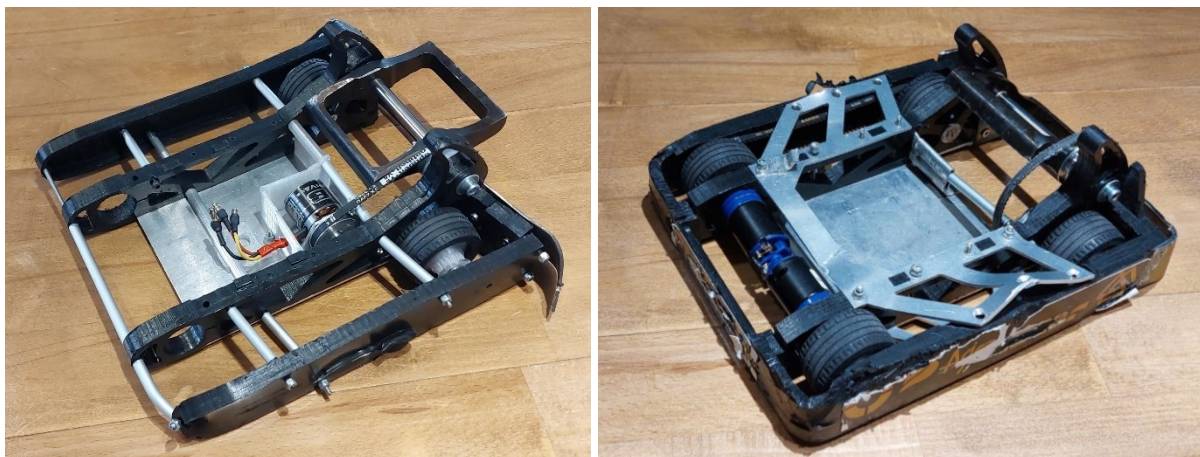
Na slici 36. je primjer oštećenja na kotaču nakon direktnog udara. Zadan udarac je bio dovoljno snažan da smično presiječe jedan od aksijalnih vijaka te je motor trajno ošteti, ali je i takav naplatak dovoljno dobro funkcionirao do kraja runde.



Slika 36. Oštećen kotač s Eggsecutionera_V3 nakon direktnog udara

9.3. Konstrukcija šasije

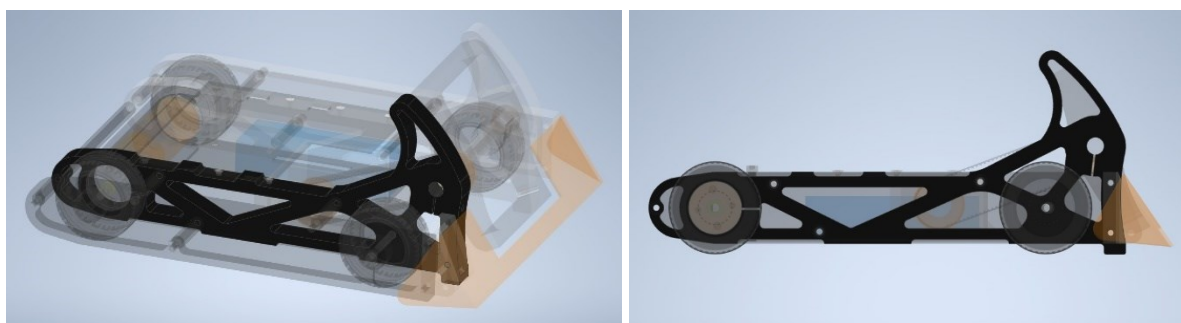
Slika 37, 38 i 39. uspoređuje praznu šasiju Eggsecutionera_V3 i Penzionera, tj. svih dotadašnjih robota budući da sama šasija, do zadnjeg natjecanja, gotovo nije bila mijenjana. Općenito su razlike među dvjema verzijama proizašle iz potpuno promijenjenog ablativnog oklopa.



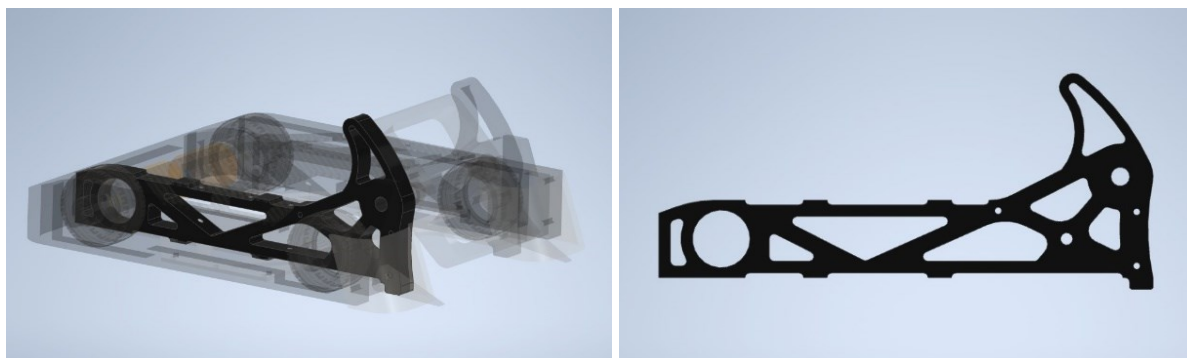
Slika 37. Prazan Penzioner (lijevo) i Eggsecutioner_V3 (desno)

9.3.1. Glavni nosači

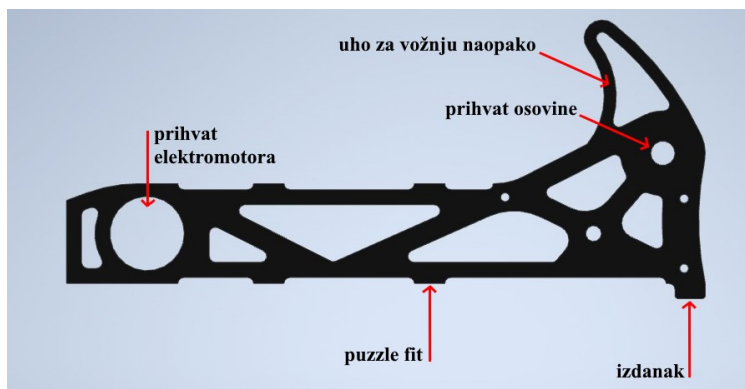
Osnovni strukturalni dio robota čini glavni okvir, a sastoji se od dva nosača na koje se ostale komponente pričvršćuju. Odabrani konstrukcijski materijal je polietilen (PE 100 RC), a korišten je zbog svoje visoke žilavosti, otpornosti na pukotine i male gustoće. Nosači su glodani iz ploče debljine 12 mm koja je sponzorirana od tvrtke *AgruTrade* [54].



Slika 38. Nosači sa Penzionera

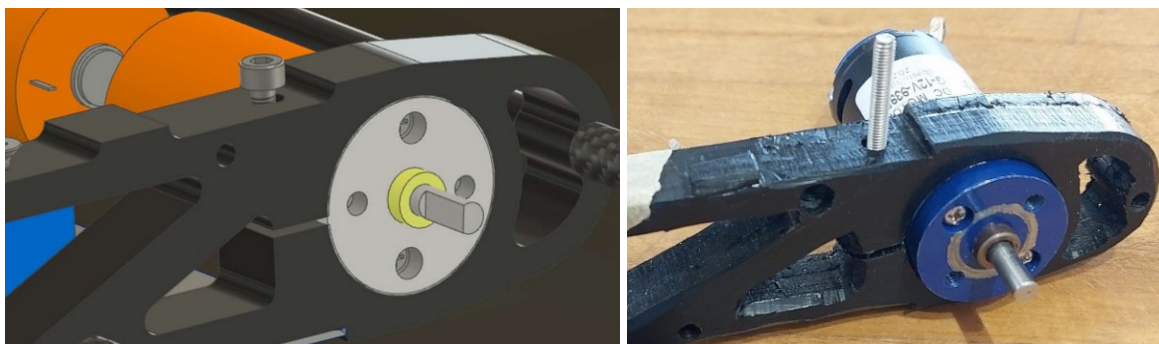


Slika 39. Nosači sa Eggsecutionera_V3



Slika 40. Nosač s naznačenim geometrijsko-funkcijskim značajkama

- ❖ Glodanjem su nosači poprilično olakšani pomoću trokutaste potporne strukture tj. triangulacije u smjerovima najvećih opterećenja koji su intuitivno određeni.
- ❖ Na donjem dijelu glavnog nosača nalazi se izdanak osmišljen za apsorpciju sile udara. Ovaj izdanak, kličući se po podlozi, omogućuje učinkovit prijenos energije u protivničkog robota prilikom udaranja oružjem, a onemogućuje prijelaz naprezanja (kroz kotače do motora) i zaranjanje tj. tendenciju robota da radi kolut u naprijed.
- ❖ Gornji dio glavnog nosača produžen je u obliku uha, s ciljem odmicanja robota od poda tijekom vožnje naopako. To omogućuje robotu da oružje okreće i prilikom kretanja u invertiranom položaju za što inače nema dovoljno momenta. Povratak u uspravni položaj je postignut udarom u protivnika ili zid arene kako se udarac u toj orijentaciji (zbog drugačijeg smjera rotacije) ne uzemljuje već robot sebe, umjesto protivnika, diže u zrak.
- ❖ Pogonski elektromotor sa svojim kućištem reduktora i osovina oružja (kromirana čelična osovina oružja promjera 8 mm) su čvrsto pričvršćeni na konstrukciju glavnih nosača zahvaljujući procijepu i pritezanju istog vijkom (poput obujmicom). Ovaj pristup ojačava spoj motora i robota, povećava krutost i istovremeno umanjuje masu robota za težinu drugih razmatranih držača elektromotora dok, možda i najbitnije, ostaje dostupan za servisiranje.



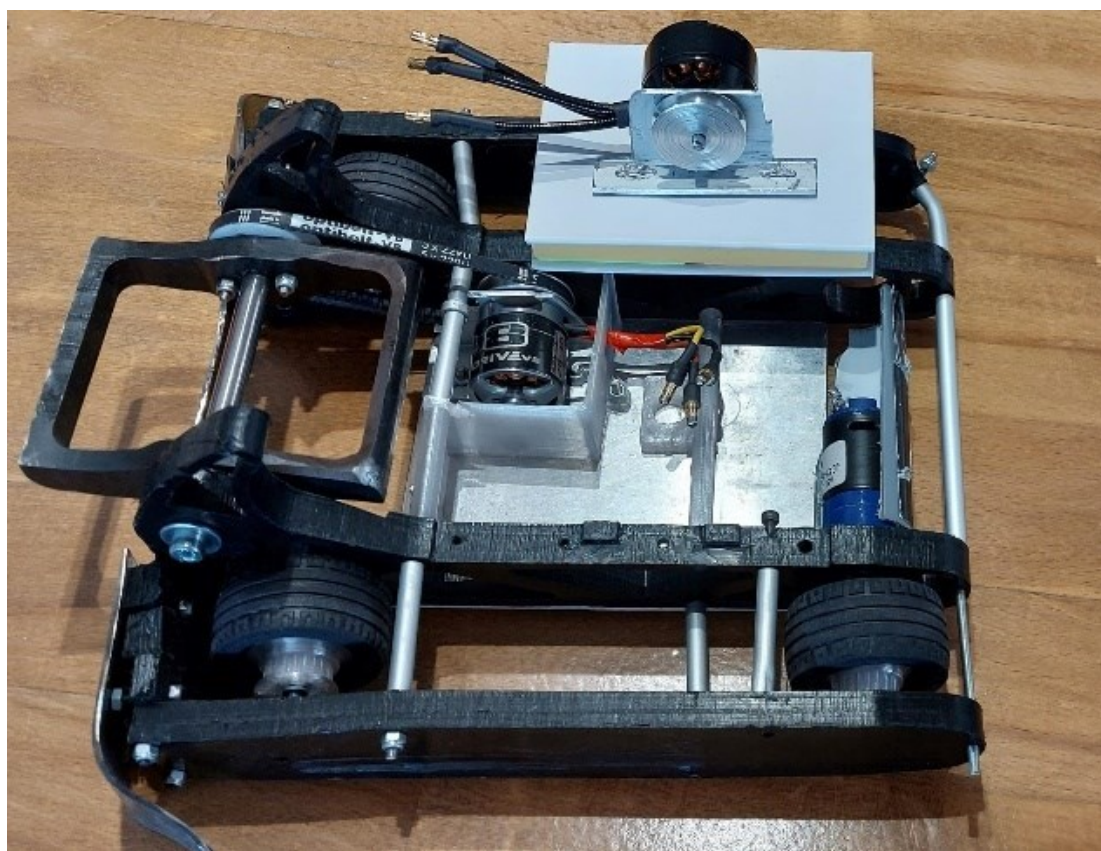
Slika 41. CAD prihvat motora (lijevo) i zapravo (desno)

9.3.2. Pregrade unutar konstrukcije

Nosač motora oružja je aluminijski L profil i preko njegovog pomicanja se zateže klinasti remen. Takav nosač je dovoljno je krut, lagan te dobro odvodi toplinu što se pokazalo potrebnim usprkos činjenici da je motor velikim dijelom izložen zraku (i strujanju s oružja). Motor je orijentiran tako da radijalna sila od remena djeluje na što manjem konzolnom kraku (Slika 42.).

Pregrada za bateriju je 2 mm 3D printan dio iz PETGa. Fizički odvaja bateriju kako pravilnik nalaže zbog mjera predostrožnosti o LiPo požarima. U odvojak se zbog amortizacije još stavlja traka na čičak, a u istu svrhu je bila korištena i brtva za prozore. Usprkos svojoj maloj masi, pregrada je poprilično komplicirane geometrije kako, uz navedeno, još odvaja elektroniku od vanjskog dijela robota pored motora ili oružja te pridržava glavni prekidač (eng. *kill switch*).

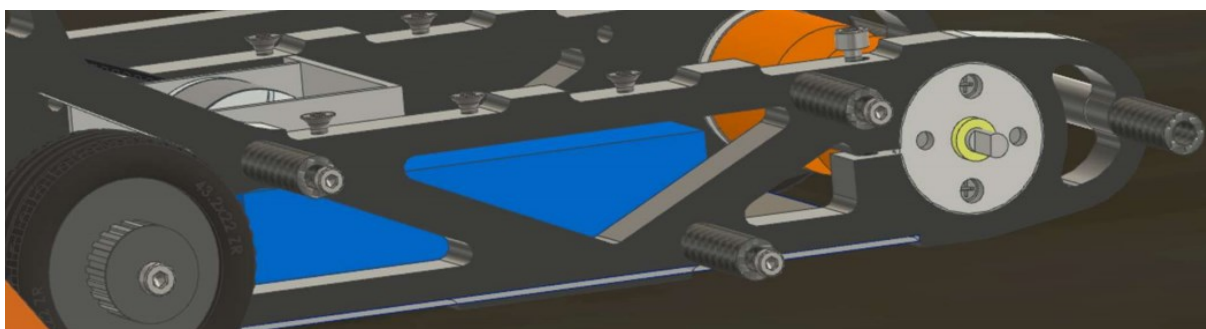
Stražnji poklopac elektromotora je za Eggsecutionera_V1 bio također printan iz PETGa i sprječava ispadanje žica i elektroničkih komponenti izvan robota. Dio bi uslijed udara pukao pa je za Penzionera zamijenjen polipropilenskom (PP) odvodnom cijevi odgovarajućeg promjera. Njegova funkcija nije primarno oklop, kako tu funkciju preuzima navojna šipka iza.



Slika 42. Pregled unutrašnjosti Penzionera

9.3.3. Ukrute od navojnih šipki

Ukrute su osmišljene tako da prolaze cijelim robotom i pridržavaju bočni potrošni oklop. Stezanjem matica na navojnu šipku oko koje je karbonska cijev (*Decathlon*ovi štapovi za zmajevu) se, s vrlo malim utroškom mase, objedinjuje robot. Zbog problema sa zapinjanjem i savijanjem navojnih šipki prilikom montaže i servisiranja ideja se napustila za treće natjecanje (tj. *Eggsecutioner_V3*) u korist samostojećih bokova, spojenih s ostatkom šasije na najkrućim mjestima što je bila dobra odluka, međutim novo rješenje teži više (Slika 43.).



Slika 43. Bočne ukrute od navojnih šipki

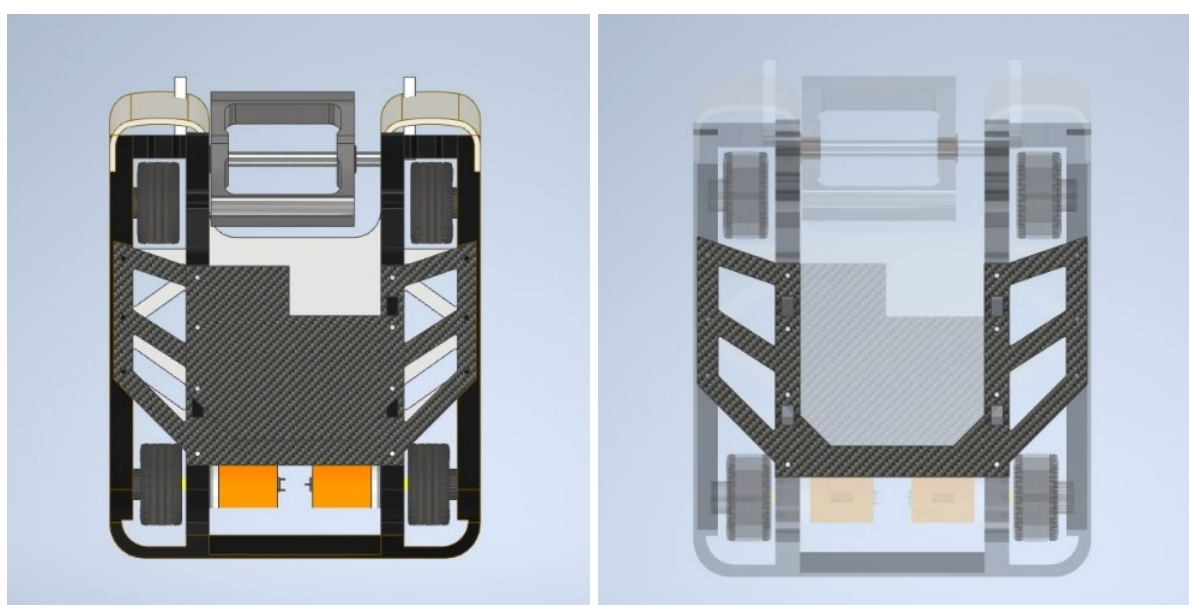
9.3.4. Gornja i donja ploča

Gornja i donjoj ploča su prošle niz iteracija, no oduvijek su bile koncipirane kao puzzle (eng. *puzzle fit*) kako bi se postigla veća krutost i olakšalo sastavljanje robota (što je posebno važno s obzirom na ciljano modularnost i brzo servisiranje). Koriste se aluminijske i karbonske ploče različitih debljina. Ova strategija omogućuje fleksibilnu raspodjelu mase tj. prilagodbu različitim protivnicima. Na primjer, protiv oružja tipa *overhead saw* (pila robot koji, nakon imobilizacije, napada napada bateriju), ideja je postaviti deblju aluminijsku ploču na vrh, dok će inače poslužiti tanja karbonska ploča. Takav sistem najviše dolazi do izražaja kada se nastoji koristiti velika ralica (eng. *wedge*) protiv horizontalaca, kada je velik i težak štiti naprijed obavezan, a oklop gore gotovo nebitan. Iako bi se idealno koristila ploča magnezija radi masene optimizacije pločastih dijelova, kako je pomalo egzotičan materijal, nije se nabavio za borbe.

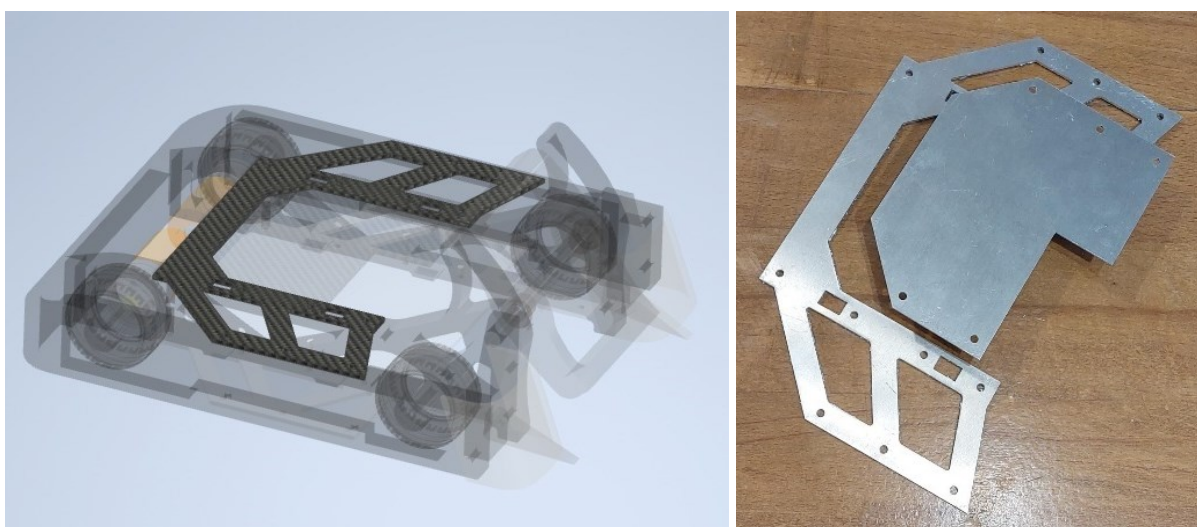
Promjena gornje ploče s *Penzionera* (Slika 44.) na *Eggsecutioner_V3* (Slika 46.) uključuje drugačiju geometriju te podjelu ploče na dva dijela, što omogućava brže uklanjanje središnjeg dijela između borbi zbog lakšeg servisiranja i to bez oštećivanja navoja u plastičnim dijelovima ili narušavanja samokočnih matica. Ovakav koncept pruža brz i olakšan pristup elektrici, što je posebice bitno zbog zamjene baterije između svake runde.



Slika 44. CAD gornjeg poklopca Penzionera (lijevo) i zapravo (desno)

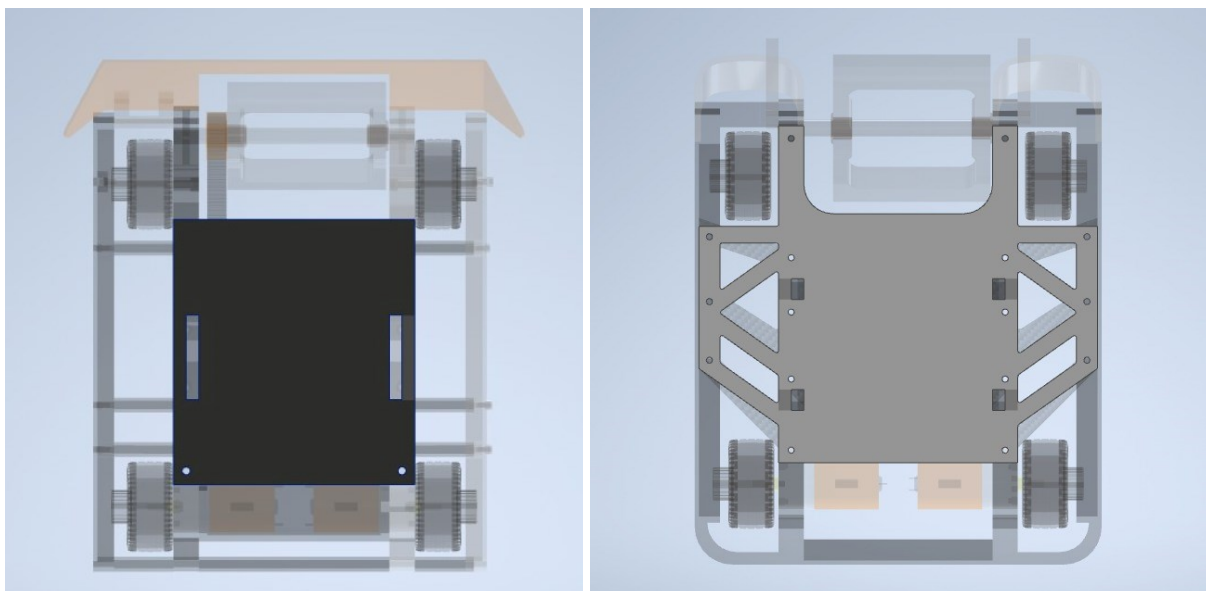


Slika 45. CAD sklop gornjeg poklopca na Eggsecutioneru_V3

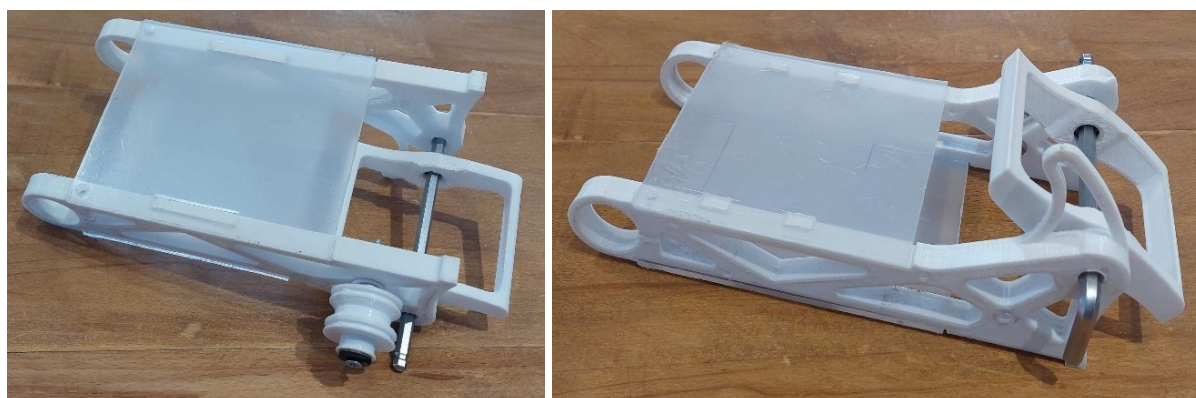


Slika 46. CAD gornjeg poklopca Eggsecutionera_V3 (lijevo) i zapravo (desno)

Osim promjena donje ploče zbog drugačijih puzala s nosača ili geometrije te nešto kraće šasije, dodani su produžetci pored oružja zbog povećavanja krutosti i sprečavanja defleksije prednjeg dijela u put oružja. Ploča ne smije biti olakšana u sredini zbog pravila o sigurnosti elektronike inače bi i tanak sloj plastike na izbušenu ploču bio dovoljan.



Slika 47. Usporedba donje ploče na Penzioneru (lijevo) i Eggsecutioneru_V2 (desno)



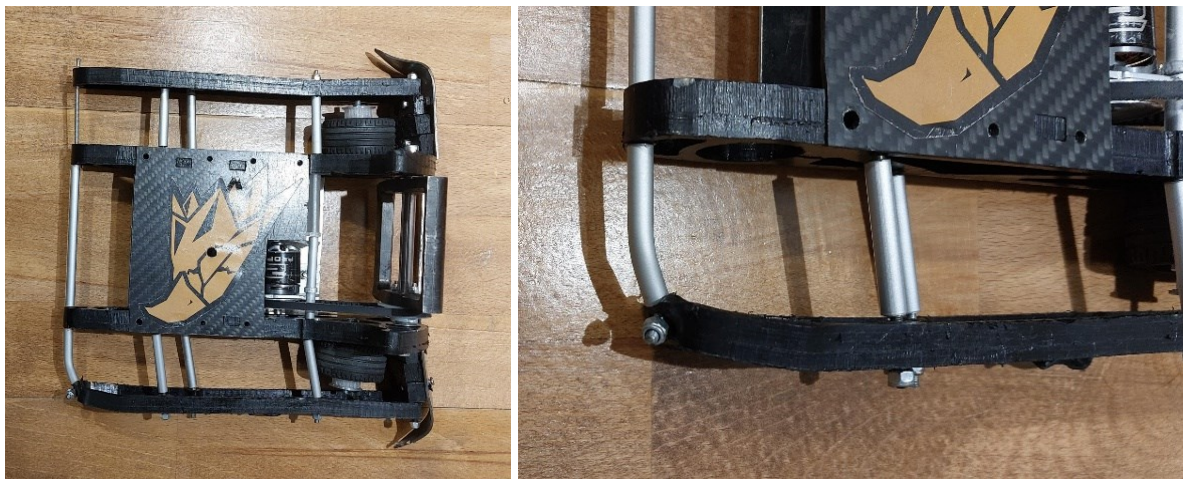
Slika 48. Ručno rezane ploče iz tacne za hranu složene na prvi 3D print robota

9.3.5. Moguća poboljšanja šasije

Dodatna poboljšanja gornjeg poklopca su potrebna kako bi se smanjila količina vijka koje je potrebno u potpunosti odviti pri servisiranju. Jedan od razmatranih načina za postizanje toga je korištenje rupe u obliku ključanice (eng. *keyhole sliding mechanism*) te je u tom slučaju vijke potrebno samo otpustiti prije nego što je poklopac slobodan i pristup bateriji osiguran.

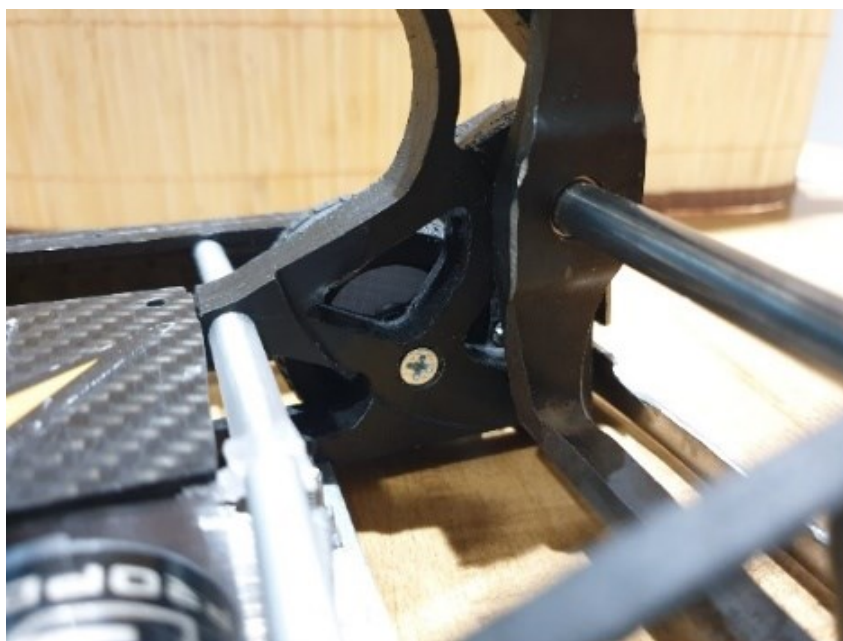
9.3.6. Primjeri štete na sistemu šasije

Slika 49. prikazuje deformiranu šasiju na Penzioneru nakon snažnog udarca horizontalca. Ukrute nisu ispunjavale svoju zadaću i držale bočni potrošni oklop na sigurnoj udaljenosti od pogonskih elemenata nego ih je dapače više puta oklop zablokiralo svojom deformacijom.



Slika 49. Slika deformirane šasije Penzionera (lijevo) i detalj (desno)

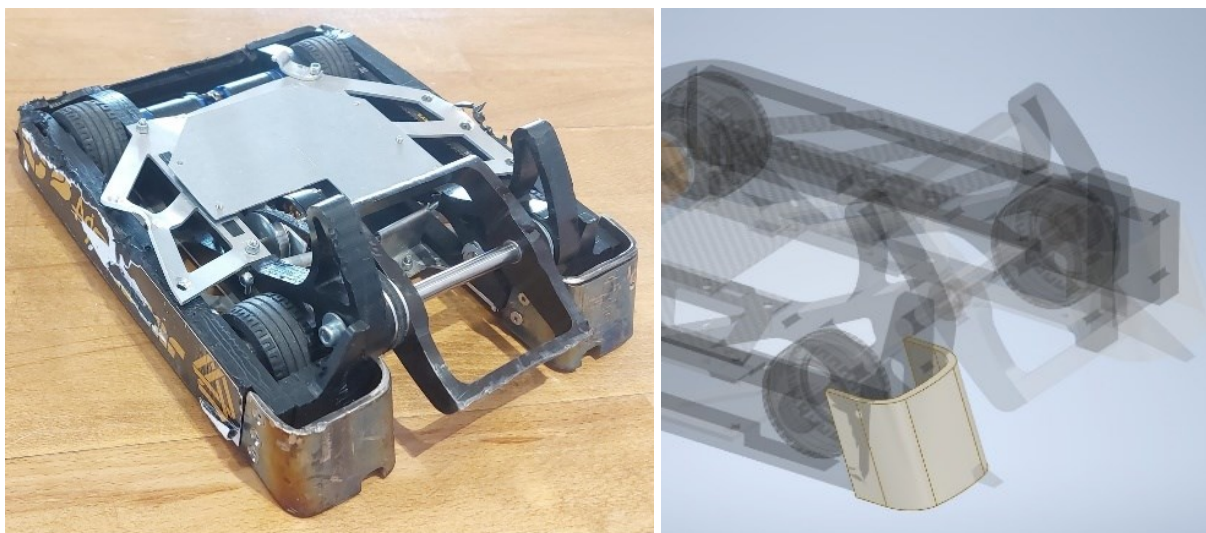
Zanimljivo je vidjeti na slici 50. prorez u nosaču koji je nastao na Penzioneru kako prednji kraj nije bio dovoljno krut za jake udarce horizontalca koji su dovoljno elastično deformirali šasiju da je oružje, gotovo kao glodalica, samo sebe zarezalo do poliranog sjaja. Zbog toga su na donji poklopac Eggsecutionera_V3 dodani produžetci.



Slika 50. Oštećenje od vlastitog oružja na nosaču Penzionera

S obzirom na to da je gustoća titanija $4,5 \text{ g/cm}^3$, a čelika $7,8 \text{ g/cm}^3$ te je između drugog i trećeg natjecanja povećano ograničenje na masu robota s 1,3 kg na 1,5 kg, tako je i bilo prostora (odnosno mase) za primijeniti ovakav oklop s tim da je i potpuno promijenjen njegov oblik.

Odluka o korištenju oklopa poput branika je donesena primarno kako bi se spriječilo otkidanje ralice ukoliko bi je horizontalac (ne)zgodno uhvatio, a kao dodatna prednost, ujedno se dio olakšao za masu središnjeg dijela ralice. Nimalo zanemarivo, ovakva izvedba može biti stalna (kako je put oružja do protivnika nesmetan) čime se gubi prilagodljivost odnosno mogućnost manipulacije raspoloživom masom, ali se ujediniu olakšava (fizički i psihički) servisiranje između rundi (Slika 52.).



Slika 52. Branici s Eggsecutionera_V3 (lijevo) i njihov CAD model (desno)

Dobro izvedena geometrija branika i klinova neće samo podići neprijatelja, smanjujući mu sposobnosti vožnje i istovremeno se izmičući neprijateljskom oružju, već će i povećati zahvat vlastitog oružja, što u praksi rezultira jačim udarcima zbog boljeg prijenosa energije.

9.4.2. Klinovi

Klinovi (eng. *wedgelets*) su glavni način potkopavanja pod neprijatelja. Kako bi bolje obavljali svoju zadaću, redovito su osmišljeni tako da se kližu po podu uslijed svoje težine ili im se čak umjetno povećava sila pritiskanja. Rizik s njima je zapinjanje na oštećenja i prijelaze poda arene. Nisu mijenjani, a rađeni su iz ostatka čelika za cementiranje koji je bio korišten za oružje.

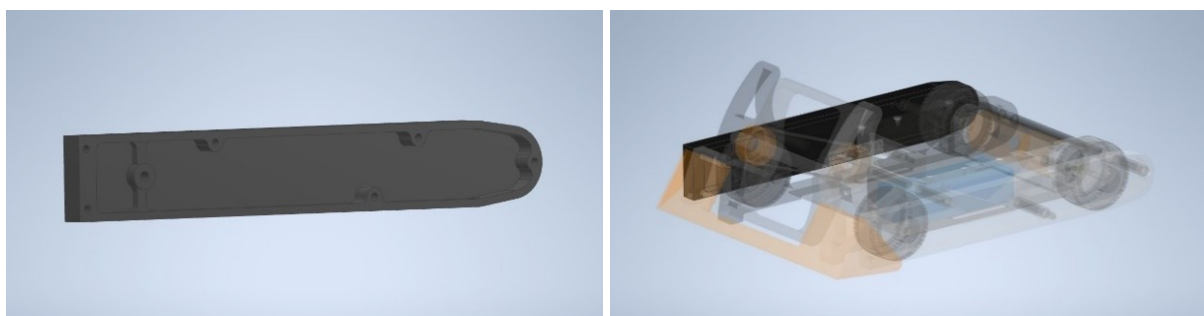


Slika 53. Klinovi na robotu (lijevo) i simulacija podkopavanja (desno)

9.4.3. Bočni potrošni oklop

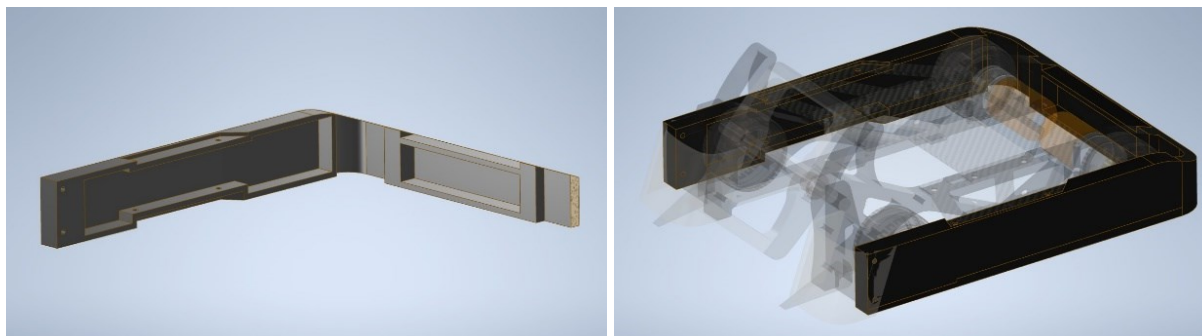
Bočni potrošni oklop je rađen, kao i šasija, iz ploče polietilena PE 100 RC s tim da je glodan (eng. *pocket milling*) zbog olakšavanja. Nema rupe tj. triangulaciju kao glavni nosač kako bi se spriječio prodor stranih tijela u unutrašnjost robota i uklonilo povoljno mjesto protivnicima za udariti. Nastoji se zadržati debljina ploče obratka na obrubu (12 mm) koji komadu daje krutost što za dodatnu prednost ima stvaranje džepa tj. obilnog zračnog jaza između oklopa i unutarnjih komponenata. Debljina oklopa na stanjenom djelu iznosi svega 2 mm.

Eggsecutioner_V1 i V2 te Penzioner imaju gotovo identične bočne oklope. Svoju zadaću su dobro obavljali, samo su ukrute tj. odstojnici na kojima su montirani, bili manjkavi (Slika 54.).



Slika 54. Penzionerov CAD bočnog potrošnog oklopa (lijevo) te na sklopu (desno)

Eggsecutioner_V3 primjenjuje oklop koji je originalno trebao biti izrađen iz jednog komada, ali je zbog jednostavnosti glodanja podijeljen na tri dijela, čime se njihova izmjena po potrebi u periodu servisiranja na natjecanjima vjerojatno ubrzala (Slika 55.). Oklop više nije pridržavan ukrutama već zapravo krutim točkama na glavnom nosaču i objema pločama.



Slika 55. Eggsecutionerov_V3 CAD potrošnog oklopa (lijevo) na sklopu (desno)



Slika 13. Rezerve ablativnog oklopa za Penzionera (lijevo) i Eggsecutionera_V3 (desno)

9.4.4. Moguća poboljšanja oklopa

Masa dodijeljena sustavu oklopa na Eggsecutioneru_V3 je iznenađujuće velika te će se za iduće natjecanje nastojati smanjiti, tim više kako svaki skinuti gram s oklopa ide u oružje.

Istražit će se dodatci iz kompozitnih materijali poput kevlara i karbon-kevlara budući da su dobro služili drugim natjecateljima te se mogu provući pod dekorativnu masu po pravilniku.

9.4.5. Primjeri štete na oklopu

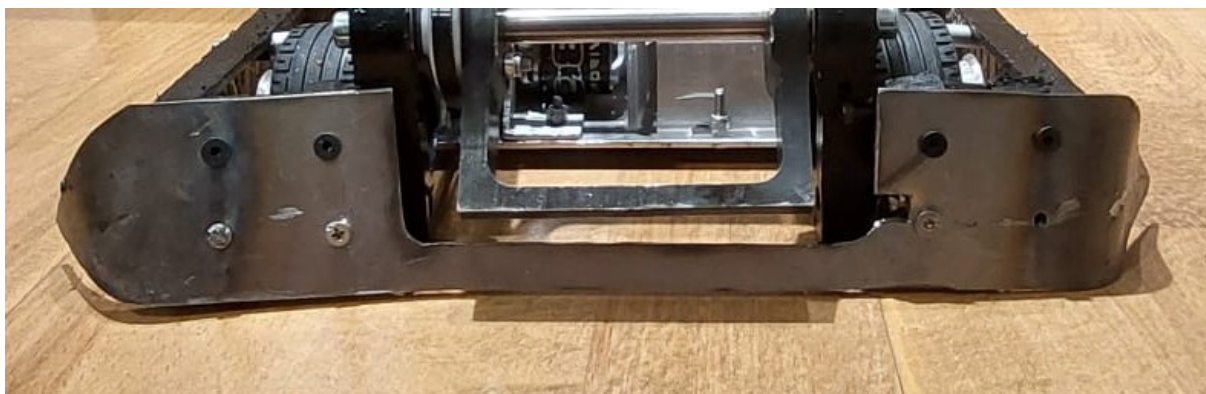
Slika 56. prikazuje učinkovitost oklopa i njegovo ispunjavanje svrhe (deformiranje i niska točka tališta) nakon udarca horizontalca. Bočni udarac je prouzrokovao zanemarivu štetu. Udarac zadnjeg kraja je ponovno deformirao ukrotu od navojnih šipki i čak je pogonski motor zbog njega i stradao. Cijela šasija je zamaknuta od velikih sila koje su na nju djelovale.



Slika 56. Oštećenja na potrošnom oklopu Penzionera nakon borbe s horizontalcom

Slika 57. prikazuje štetu na ralici izrađenoj iz iste titanijske ploče, ali brušene na 1,5 mm debljine zahvaljujući tvrtki *CutTech* [58]. Kako je ralica bila izrađena za drugo natjecanje kada je dopuštena masa robota bila 1,3 kg, na zadnjem je Penzioner opet težio upravo toliko.

Prilikom pokušaja udaranja oružjem na oružje s horizontalcom, titanijska ralica je praktički odrezana. Taj udarac je deformirao čitavu šasiju pa i elastično deformirao glavne oklope dovoljno da robot oružjem zarezne sam sebe.



Slika 57. Šteta na ralici Penzionera

Na Eggsecutioneru_V3 sva šteta, posebice ona na branicima, je primarno kozmetička (Slika 58.). Kroz natjecateljsku ljestvicu se penjao neporažen sve do četvrtfinala kada se osovina oružja otpustila te se čitav sklop oružja razletio pri visokim okretajima. Nakon pobjede u ljestvici robota s jednim porazom (eng. *losers bracket*), Eggsecutioner_V3 se u finalu ponovno borio protiv istog robota iz četvrtfinala gdje ga je prvo jednom, pa onda još jednom, pobijedio.



Slika 58. Potpuno zanemariva šteta na Eggsecutioneru_V3

Slika 59. prikazuje štetu na gornjem poklopcu koja je rezultat nesretnog udara kada je Eggsecutioner_V3 odbacio neprijatelja na sebe. Zadnji desni pogonski motor je tada stradao.



Slika 59. Šteta na Eggsecutioneru_V3

9.5. FINANCIJSKI ASPEKTI

9.5.1. Sponzori tima Judge&Jury

Izrada borbenog robota je izazovan proces gdje faza istraživanja i konstruiranja traje najduže, no ključna je faza ona u kojoj tek kreće većina problema: faza izgradnje robota tj. praktične realizacije projekta. Ne samo da su borbe robota relativno skup sport zbog elektronike koja se tretira kao potrošna robota te tjera do svojih granica u rundama od tri minute, već je i nabava konstrukcijskih materijala te njihova obrada komplicirana i nerijetko skupa. Za samu izradu robota, također je potreban i prostor za okupljanje i rad, dostatno opremljen mnogim alatima.

Kako su same borbe atraktivne, a angažiranost studenata tim više, entuzijazam tima pri javljanju raznim sponzorima se mnogostruko nagradio. Kako tim čini grupa bliskih prijatelja, a ne tvrtka ili udruga, nije moguće jednostavno tražiti novac pa se odlučilo tražiti sponzorstvo prije nabave svega što je svakako bilo potrebno. Velika je većina tvrtki bila voljna sponzorirati tim pa čak i nastaviti suradnju nakon natjecanja te se redom broje: *Agru Croatia Trade* [54], *Asio* [56], *Biz – Plima* [50], *Crom* [57], *Cuttech* [58], *Hennlich* [53], *Iscar alati* [47], *Imbus* [59], *Pfeifer – TTI* [48], *SET Bjelovar* [49], *Forch* [60] i FSB. Uz to, kroz ovaj, sada višegodišnji, projekt tim je sakupio gotovo zavidnu kolekciju alata, dio kojeg je također donacija raznih sponzora. Kako je u međuvremenu kupljena i hobistička CNC glodalica koja je sposobna obrađivati čelik, za iduće natjecanje postoji planovi u vidu ne samo u ovom radu navedenih poboljšanja Eggsecutionera, već i konstruiranju novih, dosad neviđenih, borbenih robota.

9.5.2. Fightbotics subvencionirane komponente

Izrada robota može biti financijski zahtjevna, ali sudjelovanje na natjecanju Fightbotics omogućuje pristup subvencioniranim komponentama za svako glavno natjecanje (krajem godine dok je ono ljeti polusezonsko). Ovo uključuje elektroniku i usluga rezanja.

Materijali, pogotovo egzotični kakvi se često koriste u borbama zbog ekstremnih zahtjeva za svojstva, teže se mogu naći, ali je tim više traženje sponzora opravdano i (općenito) primljeno od strane firmi s entuzijazmom. Usluge obrade jesu problem, pogotovo one glodanja i zato je dobar dio rada na robotu prilagodba realnim mogućnostima, no uvijek se može naći način: bilo kroz udrugu mehatroničara, katedru s faksa, pojedinačnih i voljnih firmi, radionica (poput *makerspace*), pomoć nekog kolege s faksa ili nekog od susjeda koji ima potreban alat.

10. ZAKLJUČAK

Kroz pregled različitih tipova borbenih robota, njihovih funkcija i principa dizajniranja, ovaj završni rad pruža detaljan uvid u dinamiku borbi robota. Nastoje se prikazati početci razvoja i aktualan trenutak scene borbi robota u Hrvatskoj, vođen perspektivom pobjedničkog tima Judge&Jury na natjecanju Fightbotics i ključnog od njihovih robota – Eggsecutionera.

Istražen je cjelovit razvoj originalnog robota težine 1,5 kg s vertikalno okretnim oružjem i pogonom na sva četiri kotača, od njegove inicijalne ideje do uspjeha na natjecanjima. Analizom napadačkih i pogonskih sustava, šasije i oklopa, nastoji se pružiti uvid u razmišljanja, konstruiranje i evoluciju rješenja koja se potkrjepljuje mnoštvom slika, osvrtom na primjere konkretnih oštećenja i prijedlozima za danju optimizaciju.

Cilj rada je poslužiti kao inspiracija ili koristan resurs za kompetitivne natjecatelje i pridonijeti unaprjeđenju razumijevanja učinkovite izrade borbenih robota, time doprinoseći općem razvoju ovog uzbudljivog sporta.

LITERATURA

- [1] <https://www.riobotz.com/riobotz-combot-tutorial>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/BattleBots>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [3] <https://battlebots.fandom.com/wiki/Chomp>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [4] <https://battlebots.fandom.com/wiki/Orbitron>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [5] <https://wiki.nhrl.io/wiki/index.php/DeepMelt>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [6] <https://marcthorpe.com/robot-wars/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_Wars_\(TV_series\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_Wars_(TV_series)) , Pristupljeno: 2024-01-25
- [8] <https://www.fightingrobots.co.uk/content/22-fra>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [9] <https://battlebots.com/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [10] https://king-of-bots.fandom.com/wiki/King_of_Bots, Pristupljeno: 2024-01-25
- [11] <https://youtu.be/L-1QWonwngM?si=rdc83fAoYPuhR5T9>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [12] <https://www.buildersdb.com/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [13] https://www.robotcombatevents.com/event_map, Pristupljeno: 2024-01-25
- [14] <https://bristolbotbuilders.com/calendar.html#map>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [15] <https://www.youtube.com/@NHRL>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [16] <https://discord.com/invite/nhrl>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [17] <https://wiki.nhrl.io/wiki/index.php/NHRL>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [18] <https://fightbotics.com/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[19] Spaček N. "Projektiranje borbenog robota za FIGHTBOTICS natjecanje." Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.

<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:365498>

[20] Zadavec F. "Konstrukcija oružja borbenog robota." Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:926370>

[21] <https://apps.unizg.hr/rektorova-nagrada/index.php/javno/radovi/1788/preuzmi>

[22] <https://fightbotics.fsb.hr/pravilnik>, Pristupljeno: 2024-01-25

[23] <https://battlebots.fandom.com/wiki/Mammoth>, Pristupljeno: 2024-01-25

[24] https://battlebots.fandom.com/wiki/Team_Danby?file=

[Foxic_wedgedown.png](#), Pristupljeno: 2024-01-25

[25] <https://www.facebook.com/JoesBots>, Pristupljeno: 2024-01-25

[26] <https://www.youtube.com/@fightbotics894/featured>, Pristupljeno: 2024-01-25

[27] <https://ultimate-robot-archive.fandom.com/wiki/Mixtape>, Pristupljeno: 2024-01-25

[28] <https://ultimate-robot-archive.fandom.com/wiki/Billy>, Pristupljeno: 2024-01-25

[29] <https://medium.com/@dand7923/nhrl-championship-countdown-day-12-bb828cc80f10>, Pristupljeno: 2024-01-25

[30] https://wiki.nhrl.io/wiki/index.php/Silent_Spring, Pristupljeno: 2024-01-25

[31] <https://justcuzrobotics.com/shop/p/ssp-robot-kit>, Pristupljeno: 2024-01-25

[32] <https://www.botkits.com/products/d2-combat-robot>, Pristupljeno: 2024-01-25

[33] <https://repeat-robotics.com/buy/pbk/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[34] <https://absolutechaosrobotics.bigcartel.com/product/jolt-3lb-combat-robot-kit>, Pristupljeno: 2024-01-25

[35] <https://kitbots.com/shop/ols/products/weta-x-beetleweight>, Pristupljeno: 2024-01-25

- [36] <https://itgresa.com/product/beetleweight-chassis-kit-black-frost/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [37] <https://www.fingertechrobotics.com/proddetail.php?prod=ft-3lb-beater-bot>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [38] <https://justcuzrobotics.com/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [39] <https://www.youtube.com/channel/UCsoZN2VwWJbJ30y2e2sfmnw>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [40] <https://m.facebook.com/teamimmersionrobotics/posts/2407834156131390/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [41] Kickin' Bot: An Illustrated Guide to Building Combat Robots. Imahara, G., 528 pages, Wiley, 2003.
- [42] <https://discord.com/invite/oota>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [43] <https://ultimate-robot-archive.fandom.com/wiki/Lynx>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [44] <https://www.youtube.com/@IbaLabs>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [45] <https://battlebots.fandom.com/wiki/Yeti>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [46] <https://www.fingertechrobotics.com/proddetail.php?prod=ft-3lb-beater-bar-assy>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [47] <https://www.iscar.hr/index.aspx/countryid/21/lang/hr>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [48] <https://www.pfeifer-tti.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [49] <https://set-bjelovar.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [50] <https://www.bizplima.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [51] <http://wheels.sariel.pl/>, Pristupljeno: 2024-01-25
- [52] <https://www.bricklink.com/v2/main.page>, Pristupljeno: 2024-01-25

[53] <https://www.hennlich.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[54] <https://www.agru.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[55] <https://battlebots.fandom.com/wiki/Blip>, Pristupljeno: 2024-01-25

[56] <https://www.asio.cz/en/croatia>, Pristupljeno: 2024-01-25

[57] <https://crom.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[58] <https://cuttech.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[59] <http://www.imbus.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25

[60] <https://www.foerch.hr/>, Pristupljeno: 2024-01-25