

Šolski center Celje
Srednja šola za storitvene dejavnosti in logistiko

IZDELAVA RADIJSKO VODENE ROBOTSKÉ KOSILNICE

Raziskovalna naloga

Avtorji:
Klemen Pocajt, 2B4
Andraž Stancer, 2B4

Mentor:
Zoran Jazbinšek, inž. Str. (VS)

Mestna občina Celje, Mladi za Celje
Celje, 2025

Kazalo vsebine

1.	Uvod	5
2.	Opredelitev ciljev in zahtev	5
2.1	Določitev velikosti, teže, moči.....	5
2.2	Izbira namena (terena).....	6
2.3	Doseg daljinskega upravljanja	6
3.	Izbira komponent	6
3.1	Izbor ustreznih motorjev (električni, bencinski)	6
3.2	Kosišče.....	8
4.	Načrtovanje šasije in ohišja	8
4.1	Izbira materialov (kovina, plastika, kompoziti)	8
4.2	Izdelava skic.....	8
4.3	Zagotovitev zaščite pred vremenskimi vplivi	9
5.	Razvoj pogonskega sistema.....	9
5.1	Tip pogona.....	9
5.2	Moč in vrsta motorjev	10
5.3	Prenos moči.....	11
6.	Integracija elektronike in daljinskega upravljanja.....	14
6.1	Izbira krmilnika	14
6.2	Električna vezava.....	15
6.3	Testiranje odzivnosti in dosega daljinskega upravljanja	18
7.	Preizkus zmogljivosti	18
7.1	Testiranje vzdržljivosti baterije in pogona	18
7.2	Izboljšave na podlagi testiranja.....	18
8.	Izdelava končne različice in ohišja.....	20
8.1	Zaščita pred prahom in vodo.....	21
8.2	Ergonomija in varnost	21
8.3	Dokumentacija in možnost serijske proizvodnje	21
8.4	Dokumentiranje vezij, programske kode in mehanskih delov	22
8.5	Izdelava uporabniških navodil in varnostnih priporočil	22
8.6	Izdelava naslednje različice	22
9.	Zaključek.....	24
10.	Viri	25

Kazalo slik

Slika 1: Robot GT155 4x4	5
Slika 2: prvi prototip, kjer smo testirali pogon s štirimi direktnimi motorji	10
Slika 3: preizkus prvega prototipa na travi.....	11
Slika 4: dodatni jekleni obroči na kolesih za izboljšanje trakcije	12
Slika 5: prirobnica in verižnik z verigo na motorju drugega prototipa.....	13
Slika 6: verižnik in veriga na kolesu.....	13
Slika 7: drugi prototip, predmet te naloge: pogon z dvema motorjema preko verige	14
Slika 8: v plastičnem ohišju je nameščeno drobovje za krmiljenje motorjev	14
Slika 9: hoverboard od znotraj: poleg motorjev je vidna baterija (desno) in ESC (levo)	15
Slika 10: poskus uporabe dveh ESC-jev za pogon štirih motorjev s signalom enega sprejemnika	15
Slika 11: blok shema vezave dveh ESC-jev, krmiljenih s servo signalom sprejemnika	16
Slika 12: blok shema krmiljenja dveh ESC-jev s serijsko UART komunikacijo	17
Slika 13: končna verzija, ki se je najbolj izkazala: en ESC z UART povezavo krmili dva motorja.....	18
Slika 14: avtorji drugega prototipa z mentorjem	24
Slika 15: nov, večji robot, ki nastaja z upoštevanjem vseh izkušenj, ki smo jih pridobili z izdelavo prototipa, ki je predmet te naloge	24

Povzetek

Projekt robotske kosilnice je nastal iz potrebe po varni košnji na zahtevnih terenih. Glavni cilj je bil razviti napravo, ki omogoča daljinsko upravljanje in zmanjšuje tveganje za operaterja. V postopku snovanja so bile preučene različne vrste pogona, pri čemer se je električni prenos izkazal za najboljšo izbiro. Uporabljeni so bili krmilniki, motorji in baterija iz hoverboarda, kar je omogočilo nizke stroške in relativno enostavno montažo, hkrati pa nam je ta izbira omogočila predelavo programske opreme, s čimer smo na lahek način optimirali delovanje motorjev. Za izboljšanje zmogljivosti in znižanje obremenitev pogonskega sklopa je bil uveden verižni prenos moči.

Krmilni sistem temelji na modelarski radijski postaji in mikrokrmilniku Arduino Nano, ki omogoča varno in zanesljivo delovanje.

Na podlagi ugotovitev so bile načrtovane izboljšave, kot so alternator, širše kosišče in izboljšana sinhronizacija pogona. Projekt je združil znanja s področja strojništva, elektronike in avtomatizacije ter služi kot kvalitetna osnova za nadaljnji razvoj in izdelavo večje različice robota.

Ključne besede: robot, kosilnica, radijsko vodenje

Summary

The robotic lawnmower project arose from the need for safe mowing in difficult terrain. The main goal was to develop a device that allows remote control and reduced risk for the operator. Various types of drives were studied in the design, with electric transmission proving to be the best choice. We used controllers, motors and batteries from a hoverboard, which allowed for low costs and relatively easy assembly, while at the same time enabled us to perform a software modification, which allowed us to optimize the operation of the motors. To improve performance and reduce the load on the drivetrain, a chain power transmission was introduced.

The control system is based on an RC model radio and an Arduino Nano microcontroller, which ensures safe and reliable operation.

Based on the findings, improvements were envisaged, such as an alternator, a wider cutting area and improved drive synchronization. The project combined knowledge of mechanical engineering, electronics and automation and serves as a good base for further development and a larger version of the robot.

Keywords: robot, lawnmower, radio control

1. Uvod

Do ideje za izdelavo radijsko vodene robotske kosilnice smo prišli iz povsem praktičnih razlogov. Nemalokrat smo »žrtev« košnje preko nepritrjenega trdnega predmeta, kateri lahko ogrozi naše telo. Do ideje smo prišli ob vzdrževanju dovozne ceste do vikenda, ki je sicer makadamska, pa vendar nekajkrat letno potrebuje košnjo, saj se zaradi neuporabe hitro zaraste. Košnja takšne ceste je ne samo neudobna, pač pa tudi nevarna za kosca. V izogib tovrstnim nevarnostim smo se odločili izdelati radijsko vodeno robotsko kosilnico, katerega bi operater lahko upravljal z varne razdalje.

2. Opredelitev ciljev in zahtev

2.1 Določitev velikosti, teže, moči

Za razvoj izdelka smo uporabili izkušnje in informacije, ki so bile na voljo ob izdelavi že obstoječih podobnih izdelkov. Osredotočili smo se v glavnem na tri izdelke, ki so nastali na slovenskih tleh: predelava komercialno dostopnega vrtnega avtonomnega robota, izdelava robota GT155 4x4, pri katerem je sodeloval naš mentor, in pa izdelava radijsko vodene kosilnice, ki je bila sestavljena iz vrtno kosilnice in dveh pogonskih sklopov t.i. električne rolke (hoverboard), pri kateri smo dobili idejo glede izvedbe pogonskega sklopa, in ga kasneje na eni točki razvoja tudi v enaki obliki uporabili. To so bili naši stebri, iz katerih smo črpali navdih in začetno idejo, pomagali pa so nam tudi pri idejah za tehnično izvedbo. Vendar pa so testiranja pokazala, da določene tehnične rešitve niso najboljše, zato smo pri svojem izdelku ubrali svojo pot.



Slika 1: Robot GT155 4x4

Za začetek projekta in prvi prototip smo bolj kot na velikost in moč naprave gledali na to, kaj imamo na razpolago za čim lažji in čim cenejši začetek dela. Izbrali smo vrtno kosilnico, katere ohišje smo uporabili kot šasijo, kar se je kasneje izkazalo kot odlična izbira za hiter začetek, a žal s precej nizkim potencialom kar se tiče dejanske uporabnosti.

2.2 Izbira namena (terena)

Robotska kosilnica, ki je tema tega projekta je namenjena predvsem kot t. i. »proof of concept«, služi kot prototip, in ni namenjena dejanski redni uporabi. Služi pa kot odlična osnova za pridobitev izkušenj za izdelavo izboljšane verzije, ki bo v dejanski uporabi. Šasija prototipa je sicer namenjena delu v zahtevnih okoliščinah, zaradi česar smo dali velik poudarek na vozne lastnosti, vendar bi za ta namen morali uporabiti motor s prisilnim mazanjem, ki bi omogočal varno delovanje pri večjih bočnih in vzdolžnih nagibih. Ker smo pri izdelavi uporabili komponente, ki so nam lahko dosegljive, smo menjavo motorja s takšnim, ki varno deluje tudi z večjimi nagibi, pustili kot potencialno nadaljnjo nadgradnjo.

2.3 Doseg daljinskega upravljanja

Ker v prvi vrsti delamo s strojnimi elementi, smo elektronski del poenostavili do skrajnosti. V prvi vrsti je varnostni vidik, vendar smo uporabili komercialno dostopne elemente. Doseg signala mora biti daljši od razdalje vidnega nadzora, naprava pa se mora v primeru nezanesljivega vodenja (prazna baterija, nezanesljiv radijski signal,..) odzvati z alarmom ali brezpogojno zaustavitvijo. Zaradi teh pogojev smo nizkocenovno in relativno enostavno možnost uporabe PlayStation 3 kontrolerja in Arduino ESP32 modula opustili. Ta kombinacija je sicer izjemno fleksibilna in cenovno ugodna, a ker deluje preko Bluetooth povezave, omogoča povezavo le do razdalje 10 m, kar je za zanesljivo vodenje tako velikega stroja nezadostno.

3. Izbira komponent

3.1 Izbor ustreznih motorjev (električni, bencinski)

Pogonski sklop predstavlja precejšen delež stroškov pri izdelavi. Za pogon noža smo uporabili bencinski motor, ki nam je bil na voljo – imeli smo ga na zalogi v skladišču, skupaj z ohišjem kosilnice. Pogon vozila in prenos na kolesa je v primeru

bencinskega pogona precej kompliciran, težak in okoren. Na voljo imamo še hidravlični ali električni prenos.

Za hidravlični prenos bi potrebovali hidravlično črpalko z jermenskim prenosom, električne krmilne ventile, 2 ali 4 hidravlične motorje, tlačni krmilni ventil in rezervoar za hidravlično tekočino. Glavne prednosti in slabosti hidravličnega prenosa:

- Cena,
- masa,
- velikost izvedbe,
- kompliciranost napeljave,
- kompliciranost krmiljenja,
- dosegljivost komponent na trgu,
- moč prenosov,
- kontrola hitrosti,
- potreba po rednem servisiranju,
- možnost mehanskih poškodb in staranja cevi,
- pogon deluje samo kadar motor deluje.

Električni prenos ima povsem drugačne lastnosti, in ob ogledu projekta »Hoverboard hack« je postalo jasno, da lahko celoten pogonski sklop izvedemo izjemno poceni, kljub temu pa imamo na voljo precejšnje moči in hitrosti. Slabosti in prednosti hoverboard pogona:

- Cena (celoten pogonski sklop stane manj kot 100 eur, v našem primeru celo 60 eur za rabljen hoverboard),
- masa (najtežje komponente so motorji in baterija),
- fleksibilnost vgradnje (med komponentami tečejo električne žice, ne hidravlične cevi),
- velikost vgradnje (motorji so hkrati tudi kolesa),
- enostavnost krmiljenja,
- lahka dosegljivost komponent, sploh na trgu rabljenih hoverboardov,
- moč prenosov (kasneje se je izkazalo, da je direktni pogon premalo zmogljiv),
- kontrola hitrosti in občutljivost na vhodni signal se prosto programira,
- ni potrebe po rednem servisiranju,

- električne žice se dajo enostavno skriti in zaščititi pred mehanskimi poškodbami,
- deluje neodvisno od bencinskega motorja.

3.2 Kosišče

Za čim enostavnejšo in čim cenejšo izvedbo smo uporabili kar ohišje, motor in rezilo vrtno rotacijske kosilnice. Uporabili smo ohišje kosilnice z motorjem ki je zaribal, motor in nož pa smo uporabili od samohodne kosilnice, kateri je odpovedal prenosni del pogona. Ohišje smo obnovili, motor pa očistili, zamenjali smo tudi svečko, olje in zračni filter. Tako smo do teh komponent z izjemo stroškov vzdrževanja in obnove prišli tako rekoč brezplačno.

Za izdelavo drugega prototipa (z ločeno šasijo) smo uporabili isti motor, a drugo, bolj kompaktno ohišje, ki smo ga prav tako dobili brezplačno – na zalogi smo imeli še kosilnico, kateri je zaribal motor.

4. Načrtovanje šasije in ohišja

4.1 Izbira materialov (kovina, plastika, kompoziti)

Za izdelavo šasije smo izbrali jeklene profile, ki so močni, cenovno dostopni, in jih lahko obdelujemo brez visokotehnološkega orodja. Po pregledu zahtev smo se odločili za uporabo kvadratnih profilov zunanjih dimenzij 40x40 mm z debelino stene 2 mm.

4.2 Izdelava skic

Za izdelavo šasije smo narisali kvadratni okvir, dovolj velik, da objame ohišje vrtno kosilnice. Nanjo smo dorisali tudi noge, ki služijo kot nosilci osi za kolesa. Izkušnje s prvim prototipom, ki je imel za kolesa hoverboard motorje, so pokazale, da so motorji sicer več kot dovolj zmogljivi in hitri, imajo pa težave z navorom za speljevanje, kadar je kosilnica v težkem položaju – primanjkuje navora kadar se motor ne vrti. Hkrati smo pri preizkusu prvega prototipa zaznali tudi pomanjkanje oprijema na zahtevnem terenu, zato smo se odločili uporabiti večja kolesa, gnana z verižnim reduktorskim prenosom.

Pri izdelavi drugega prototipa, ki je predmet te naloge, smo najprej izdelali kvadratni okvir velikosti 600 x 500 mm. Nanj smo privarili 200 mm dolge noge, na koncu katerih smo namestili 180 mm dolge osi premera 14 mm. Na osi smo vrezali navoje, ki služijo privitju uležajenja koles. Kolesa smo izbrali takšna, da vsebujejo pnevmatike, in imajo vgrajene ležaje. To nam je omogočilo optimiranje oprijema z nastavljanjem tlaka v pnevmatikah, že vgrajeni ležaji pa so nam poenostavili montažo koles na šasijo.

4.3 Zagotovitev zaščite pred vremenskimi vplivi

Ker je vsaka kosilnica izpostavljena nepravilnostim, ki povzročajo močno korozijo, smo tako ohišje kosilnice kot okvir robota najprej obrusili in očistili, premazali s pretvornikom rje, in dvakrat premazali z barvo Hammerite, ki nudi zelo stabilno zaščito pred mehanskimi in kemičnimi vplivi okolja. Ohišje kosilnice smo pobarvali v zeleno, okvir pa v sivo. Tako se že po barvi loči katera komponenta je plod našega lastnega razvoja, in kateri del je zamenljiv z drugimi komponentami.

5. Razvoj pogonskega sistema

5.1 Tip pogona

Glede pogona smo najprej razmišljali o uporabi gosenic. Po raziskavi trga smo videli, da bi le te predstavljale veliko večino stroška, tako da smo to idejo opustili, in se osredotočili na kolesni pogon.

Glede pogona nismo razmišljali o kompromisih. Celoten vozni podstavek mora biti enostaven, robusten, močan in zanesljiv. Krmilni mehanizem s spremenljivim kotom koles je zato odpadel, odločili smo se za t.i. skid steer (tank steer), torej ločeno krmiljenje hitrosti levih ter desnih koles, katerih geometrija ostaja v vseh pogojih delovanja nespremenjena.

Ker sta bencinski in hidravlični pogon že ob tehtanju prednosti in slabosti v sami začetni fazi načrtovanja odpadla, smo se osredotočili na električni pogon. Potrebujemo dva ločena kanala krmiljenja za levo in desno stran. Pogon mora biti mehansko ločen na dva sklopa, vsaka komponenta pa mora biti lahko dosegljiva na trgu.

5.2 Moč in vrsta motorjev

V ožjem izboru so bili štiri tipi motorjev: 250W 24V DC motor z vgrajenim reduktorjem in izhodnim verižnikom, enak motor z vgrajeno izhodno gredjo na katero pride neposredno nameščeno kolo, 500 W 24 V DC motor s kotnim prenosom, kot se uporablja na invalidskih vozičkih, ter BLDC motor, ki se uporablja v hoverboardu.

Po tehtanju možnosti so bile prve tri opcije v veliki prednosti zaradi samega tipa krmiljenja. DC krmilniki so cenovno dostopni, zanesljivi in enostavni. Vse opcije delujejo na 24 V, kar pomeni delo z nizkimi napetostmi. Delovali bi tudi z 12 V, kar zadeve še poenostavi. Zataknilo pa se je pri nabavni ceni. Motorji invalidskih vozičkov so novi cenovno gledano hud zalogaj, tudi rabljeni se redko dobijo za manj od 250 € na kos. Naš cilj je bil narediti enostavnega robota, ki ne bi bil cenovno prezahteven. Prvi dve izvedenki sta sicer cenejši, vendar prvi zahteva verižni pogon, ki tudi ni zanemarljiv strošek, sam motor pa ima ceno od 80 € po kosu naprej, bi pa zato lahko uporabili samo en motor za vsako stran. Druga opcija (motor z neposredno nameščenim kolesom) je sicer zelo fleksibilna opcija, in se ga da na zelo enostaven način uporabiti pri katerikoli izvedbi šasije, vendar pa je največja ovira ponovno cena. Nakup štirih motorjev in pripadajočih koles bi nas stal več kot 400 €. Zato smo se odločili uporabiti BLDC motorje, ki jih sicer najdemo na hoverboardu.



Slika 2: prvi prototip, kjer smo testirali pogon s štirimi direktnimi motorji



Slika 3: preizkus prvega prototipa na travi

Tak pogon se je na prototipu pri delovanju na nezahtevnem terenu izkazal kot zelo zmogljiv, saj vsak motor zmore do 350 W moči, kar teoretično pomeni skupno do 1.4 kW pogonske moči, to pa je več kot dovolj za predvideno maso samega robota, ki ne presega 50 kilogramov

5.3 Prenos moči

Testi na terenu so pokazali precej slabosti direktnega pogona z motorji v kolesih, najbolj pereči so bili naslednji:

- Dolga medosna razdalja, kar ob primerni višini košnje pomeni veliko možnost za nased,
- Kljub dolgi medosni razdalji je naletni kot majhen, kar onemogoča plezanje kosilnice čez višjo oviro,
- Ozka kolesa ob mehkem terenu omogočajo posedanje
- Majhna kolesa težko prevozijo ovire,
- Komplicirani pogonski sistem, saj moramo krmiliti 4 motorje, od katerih morata biti po dva in dva sinhronizirana,

Navor motorjev pri startu z mesta je precej nizek, kar naredi počasno plezanje robota čez oviro precej težje; kadar se motorji vrtijo z zadostno hitrostjo, je moči več kot dovolj, vendar motorji niso narejeni za obratovanje pri izjemno nizkih vrtilnih hitrostih.

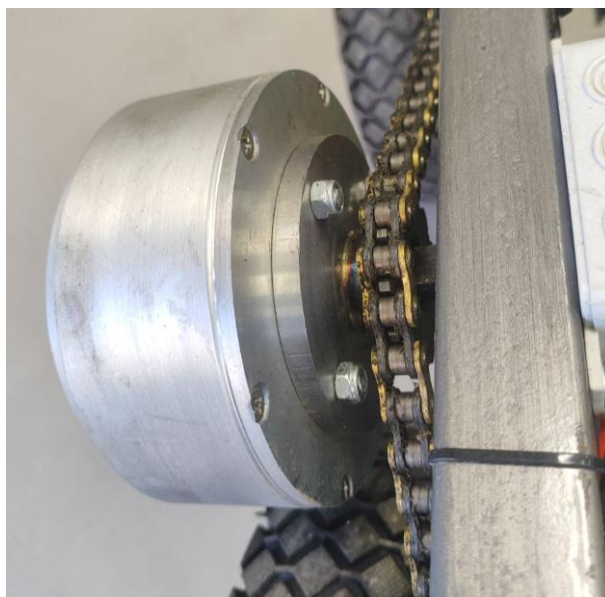
Poskusili smo dodati jeklene obroče z zobmi, ki bi izboljšali oprijem na mehkem terenu, vendar so se lastnosti kljub temu izkazale kot nezadovoljive, hkrati pa so ostali določeni problemi nerešeni. To rešitev smo kasneje opustili.



Slika 4: dodatni jekleni obroči na kolesih za izboljšanje trakcije

Odločili smo se narediti radikalno spremembo in na drugi prototip namestiti štiri večja kolesa s širšimi pnevmatikami, s čimer smo ubili več muh na en mah: skrajšali smo medosno razdaljo, nova kolesa so večja, širša, z uporabo pnevmatik smo izboljšali prilagajanje terenu in sam oprijem, hkrati pa smo z uporabo verižnega prenosa lahko pogonski sistem elektronsko precej poenostavili, saj sta robotu ostala samo dva pogonska motorja, sinhronizacija prednjih in zadnjih koles pa je rešena mehansko, z verigo. Z verižnim prenosom je robot pridobil tudi reduktor, kar omogoča precej ugodnejše pogoje ob počasnih zahtevnih manevrih, hkrati pa motorji pri nižjih hitrostih precej manj obremenjujejo krmilnike in baterijo.

Zobnike smo kupili v trgovini z rezervnimi deli za mopede. Izdelali smo prirobnici, na kateri smo navarili verižnika mopeda Tomos APN6 z 10 zobmi, na kolesa pa smo namestili plastične distančnike, na katere smo namestili verižnike istega modela mopeda s 34 zobmi. Uporabili smo tudi verige, namenjeni istemu modelu mopeda.



Slika 5: prirobnica in verižnik z verigo na motorju drugega prototipa



Slika 6: verižnik in veriga na kolesu

Distančnike in prirobnice smo izdelali na šolski stružnici. Takšen prenos ima najmanj tri pomembne prednosti: za pogon vseh štirih koles lahko uporabimo le dva elektromotorja, kar precej poenostavi krmilni sistem ter ker ne potrebujemo še dveh motorjev, še enega krmilnika in še ene baterije, olajša celotno izvedbo pogonskega sklopa; večja kolesa nudijo bistveno boljši oprijem in boljše vozne lastnosti ob vožnji čez ovire, reduktorski prenos pa omogoči bistveno več navora pri speljevanju kljub temu, da uporabljamo pol manj elektromotorjev.



Slika 7: drugi prototip, predmet te naloge: pogon z dvema motorjema preko verige



Slika 8: v plastičnem ohišju je nameščeno drobovje za krmiljenje motorjev

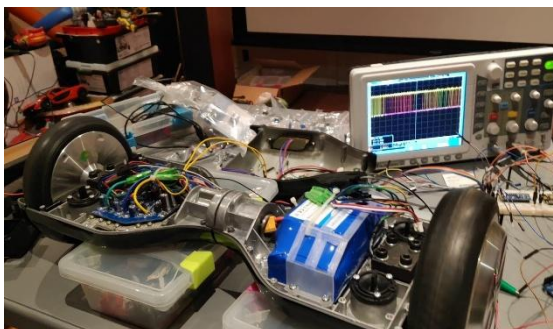
6. Integracija elektronike in daljinskega upravljanja

Za upravljanje smo izbrali modelarsko radijsko postajo, ki smo jo kupili na kitajskem spletnem portalu Aliexpress. Postaja uporablja standardne izhodne signale, in omogoča zvezno krmiljenje do 7 kanalov, radijska zveza je kodirana, seže pa dlje kot potrebujemo.

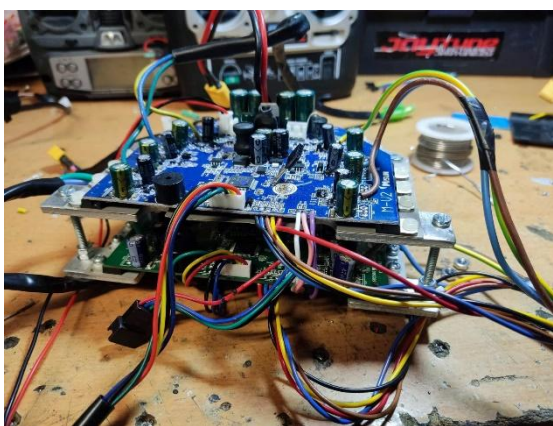
6.1 Izbira krmilnika

Pogonski sklop smo obdržali enak kot smo ga vzeli s hoverboarda: to pomeni, da smo vse komponente – motorja, ESC krmilnik (electronic speed controller) in baterijo – vzeli s hoverboarda. Ker pa hoverboard deluje s pomočjo senzorjev glede na nagib, mi pa smo potrebovali delovanje motorjev glede na vhodni signal z radijskega sprejemnika, smo morali prirediti programsko opremo krmilnika

motorjev, in sicer smo uporabili dobro poznani odprtokodni projekt »Hoverboard Hack FOC«. Pri tem delu nam je močno pomagal mentor.



Slika 9: hoverboard od znotraj: poleg motorjev je vidna baterija (desno) in ESC (levo)

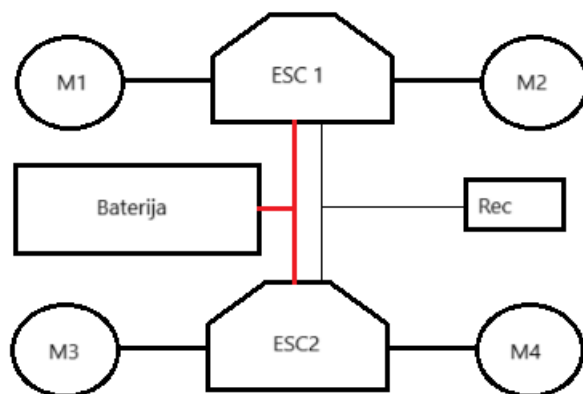


Slika 10: poskus uporabe dveh ESC-jev za pogon štirih motorjev s signalom enega sprejemnika

6.2 Električna vezava

Za krmiljenje smo se odločili uporabiti modelarski radijski oddajnik. O drugih opcijah nismo niti resno razmišljali, saj je to univerzalna naprava, ki nudi ogromno možnosti, hkrati pa ne stane veliko, saj na trgu obstaja ogromno cenenih modelov. Izhodni signal je standardiziran, omogoča pa zanesljivo povezavo.

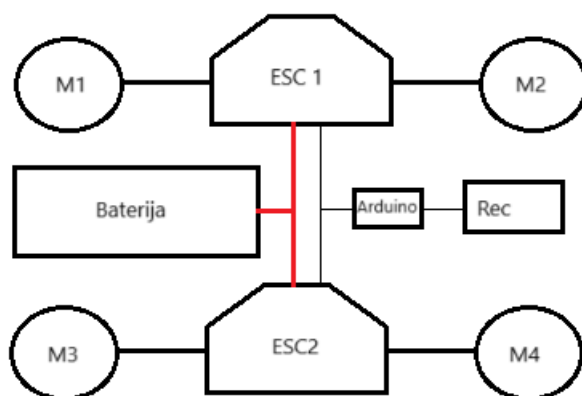
Najprej smo uporabili dva ESC krmilnika, katera sta sprejemala servo signal neposredno s sprejemnika. Ta izvedba se ni najbolje obnesla, saj je pri večjih obremenitvah motorjev prihajalo do nadležnih in nevarnih motenj, hkrati pa ni vsebovala dovolj varnostnih funkcij za izklop v primeru izgube signala ali podobne nevarnosti.



Slika 11: blok shema vezave dveh ESC-jev, krmiljenih s servo signalom sprejemnika

Ker se direktna povezava med radijskim sprejemnikom in krmilnikom ni izkazala za najbolj zanesljivo, dodati pa smo želeli še varnostno funkcijo, ki bi v primeru odpovedi katerekoli komponente delovanje robota ustavila, smo se odločili, da komunikacijo izvedemo preko serijskega UART vodila. Ker tovrstne komunikacije modelarski sprejemnik ne zmore, smo uporabili Arduino Nano, ki s pomočjo relativno enostavne programske kode zajame signala radijskega sprejemnika, in podatke o trenutnih legah nadzornih ročk pošlje krmilniku motorjev. Določili smo skrajne vhodne vrednosti, hkrati pa nadzorujemo tudi neuporabljene kanale, in če se katera vrednost znajde izven dovoljenih vrednosti, ali pa signal z neuporabljenega kanala (ki sicer nima fail-safe funkcije) izgine, se oba motorja takoj ustavita. Prav tako smo krmilnika motorjev sprogramirali tako, da se v primeru, da se serijska komunikacija ustavi, motorja ustavita, ustavita se pa tudi ob zaznavi prazne baterije. Ob tem se sproži tudi akustično opozorilo preko vgrajenega piskača. Serijska komunikacija je v zahtevnejših okoljih načeloma robustnejša, saj motnja pri prenosu podatka pomeni izgubo podatkovnega paketa, in ESC čaka na naslednjega, ki ga zmore pravilno razbrati. Izvedba se je izkazala kot zelo zanesljiva, zanesljivost delovanja in vodenja robota je neodvisna od obremenitve motorjev in nihanj napetosti baterije. Pojavila pa se je druga težava, in sicer nesinhronost motorjev. Motorje sta ESC-ja krmilila v t.i. »speed mode«, torej sta krmilila hitrost vrtenja ne glede na navor. In ker so kolesa občasno delovala nesinhrono, je eno kolo pričelo s pogonom malo prej, drugo malo kasneje, kar se med samo vožnjo sicer ni čutilo, do večje težave pa je prišlo na mestu, saj je eno kolo ustavilo malo prej, drugo malo kasneje, zaradi česar so bili motorji na mestu obremenjeni in tako pod visokimi tokovi, saj bi se vsak motor rad »parkiral« v

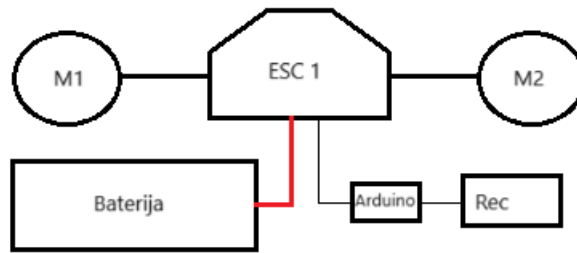
pozicijo, katero mu je ESC določil v trenutku, ko je prejel komando za zaustavitev. Tako je na mestu vsak motor vlekel v svojo smer, celotni pogonski sklop je ob tem porabljal tudi 6 A toka, kar je po nepotrebnem praznilo baterijo in segrevalo motorje in krmilnika z več kot 200 W moči.



Slika 12: blok shema krmiljenja dveh ESC-jev s serijsko UART komunikacijo

Prva rešitev za to težavo je prišla v obliki reprogramiranja enega krmilnika v »torque mode«, kar je prineslo nove težave v obliki trakcije, saj pri nizkih hitrostih tista os zaradi nizkega navora ni pripomogla dosti k pogonu, pri zdrsu pogonskega kolesa na tej osi pa je pripomogla celo k nekontrolirani izgubi smeri, saj kolo zaradi nekontrolirane hitrosti oprijema samo od sebe ni več vzpostavilo. Na zahtevnejšem terenu se je ta izvedba slabo obnesla.

Druga rešitev je prišla šele v naslednji verziji kosilnice v obliki mehanske sinhronizacije. Za to rešitev smo uporabili samo en ESC in dva motorja, razporeditev navora med kolesa pa smo rešili s pogonskima verigama. To je prineslo ne samo ugodnosti v mehanskem smislu (večji navor, večja kolesa, večja okretnost zaradi krajše medosne razdalje), pač pa tudi bistveno izboljšanje delovanja v elektronskem smislu. Uporabljamo samo en ESC, kar precej zmanjša kompleksnost naprave, samo dva motorja, gnana preko prenosa, pa precej zmanjšata porabo elektrike, kar še posebej velja pri počasnih gibih, kjer uporabljeni motorji ne slovijo po zelo visokem izkoristku, in kjer so učinki slabe sinhronizacije motorjev med seboj bili še posebej očitni.



Slika 13: končna verzija, ki se je najbolje izkazala: en ESC z UART povezavo krmili dva motorja

6.3 Testiranje odzivnosti in dosega daljinskega upravljanja

Testiranje dosega je potekalo bolj za šalo kot zares, saj nismo pričakovali kakršnihkoli težav z motnjami ali samim dosegom, in naše domneve so se tudi potrdile. Zanesljivo lahko rečemo, da je na večjih razdaljah precej večja ovira orientacija operaterja kot pa sam doseg radijske zveze.

7. Preizkus zmogljivosti

7.1 Testiranje vzdržljivosti baterije in pogona

Eden ključnih elementov robotske kosilnice je njen pogonski sistem in vzdržljivost baterije. Preverili smo, kako se kosilnica obnese pri košnji večjih površin. Eno polnjenje baterije omogoča do 45 minut delovanja pri srednje zahtevnem terenu. Ta čas se lahko na hribovitem terenu z visoko travo močno zmanjša, pri zelo hribovitem terenu tudi na manj kot 15 minut. To je pomemben podatek, ki nam je močno koristil pri načrtovanju naslednje izvedenke. Avtonomijo bi lahko podaljšali z dodatno baterijo ali z vgradnjo alternatorja, vendar ne ena ne druga rešitev ne nudi izboljšanja stanja brez kompromisa: dodatna baterija poveča maso in dvigne težišče, vgradnja alternatorja pa vpliva na moč motorja, ki poganja nož.

7.2 Izboljšave na podlagi testiranja

Na podlagi rezultatov testiranja rezalne zmogljivosti in vzdržljivosti baterije je mogoče identificirati področja, kjer so potrebne izboljšave. Najbolj očitne možne prilagoditve so optimizacija rezil za boljši in bolj enakomeren rez in nadgradnja baterij ali vgradnja alternatorja za daljšo avtonomijo.

Izboljšav noža se (razen brušenja) nismo lotili, tu gre za pomemben varnostni vidik, pri katerem nismo hoteli sklepati kompromisov.

Testiranja naše kosilnice so nam omogočile vpogled v vse možne pomanjkljivosti naprave pri delu na terenu. Iz stališča operaterja bi si zaželeli več izboljšav, ki jih bi bilo mogoče izvesti v prihodnje. Te pomanjkljivosti smo zabeležili, in tiste, ki so očitne in hkrati izvedljive, so:

Širina košnje; stroj je precej širši od širine košnje; to pomeni, da del trave po vozni širini ostaja nepokošen, hkrati pa je nemogoče kositi povsem do roba npr. robnika ali stene. To težavo je mogoče rešiti na več načinov, vendar nobeden izmed njih ni brez kompromisov. Najbolj učinkovit bi bil v obliki spremembe geometrije podvozja, vendar bi s tem močno vplivali na okretnost. Drugi, precej zahtevnejši a učinkovitejši, bi bil v obliki namestitve »trimmerja« na vsako stran pred prednjima ali za zadnjima kolesoma. Za to bi morali uporabiti dele baterijske kosilnice na nitko, vendar bi ta rešitev precej vplivala na avtonomijo, saj bi energijo za svoje delovanje črpala iz baterije za pogon koles, hkrati pa se pojavi tudi vprašanje varnosti takšne namestitve.

Hitrost pomika med delom in med prevozom na lokacijo dela; Med delom je hitrost primerna, prav tako je primerna občutljivost komand za premik, vendar je sama vožnja do lokacije košnje precej počasna. Ko smo maksimalno hitrost motorjev dvignili z 200 na 400 rpm, se je vožnja do lokacije košnje precej pospešila, vendar so s tem komande za premik postale precej občutljivejše, kar je negativno vplivalo na natančnost košnje.

Avtonomija pogonskega sklopa; ker je pogon koles napajan iz baterije, je zaloga energije omejena; to pomeni, da je pred košnjo potrebno baterijo napolniti, sama košnja pa lahko po nezahtevnem terenu traja do 45 minut. To pomanjkljivost je možno omiliti z uporabo dodatne baterije, ki bi avtonomijo podaljšala na približno eno uro, ali pa z uporabo alternatorja, pri čemer bi avtonomijo omejevala samo še velikost rezervoarja za gorivo, a bi s tem precej narasla tako masa, kot tudi kompleksnost kosilnice. Ker pogonski sklop deluje z nazivno napetostjo 36 V, vsi lahko dostopni alternatorji pa delujejo z 12 ali 24 V, bi morali uporabiti na novo razvit regulator, ali pa celo povsem lastno konstrukcijo alternatorja.

Zahtevnost čiščenja; ob košnji kosilnica naleti na več vrst nečistoč. To so vodne kapljice, blato, prah in koščki trave. Glede čiščenja so najbolj pereči koščki trave, ki se zalepijo na verigi. Verigi sta mastni, in mazivo deluje kot lepilo. V izogib tej težavi

smo poskusili verigi očistiti, za mazivo pa uporabiti nelepljiv sprej za mazanje verig z voskom. Rešitev se je izkazala kot le delno uspešno, saj so se koščki manj pogosto lepili na verigi, a delno težava ostaja nerešena. Zaradi bližine elektronskih komponent visokotlačno čiščenje odpade.

Hrupnost; kosilnica sicer ustreza normativom in ni nič glasnejša kot običajna vrtna kosilnica, s katere kosišče in bencinski motor tudi izvirata. Za zmanjšanje hrupnosti smo poskusili uporabiti tudi drugačen tip izpušnega dušilca, vendar se je ta rešitev izkazala kot le delno uspešno, saj se velik del hrupa proizvede zaradi vrtenja noža in ne direktno s plini iz izpuha. Zmanjšanje vrtilne hitrosti motorja sicer precej pripomore k zmanjšanju hrupnosti, vendar negativno vpliva na moč motorja in s tem na kvaliteto in hitrost košnje.

Prilagajanje višine košnje; v različnih situacijah bi prav prišla možnost prilagajanja višine košnje. To bi lahko dosegli na več načinov, nekateri so precej udobnejši in praktični, drugi precej bolj »mehanski«: lahko bi npr. na gred bencinskega motorja (nad nož) dodajali različno debele distančnike, lahko bi preizkusili kolesa različnih dimenzij, lahko pa bi skonstruirali mehanizem, ki bi v šasiji (voznem podstavku) spreminjal pozicijo kosišča skupaj z motorjem in nožem.

Delo ob visokem nagibu; motorji z mazanjem z oblivanjem so precej občutljivi na nivo olja ter na delovanje z večjimi nagibi. Za namene dela z večjimi nagibi bi lahko mazanje rešili z uporabo motorja s prisilnim mazanjem, torej z oljni črpalko. To bi sicer zahtevalo večji finančni vložek, vendar bi omogočilo povsem nove razsežnosti dela. Šasija in pogon sta namreč sposobna premagovati izjemno zahtevne terene, kar smo (z ugasnjenim motorjem) tudi preizkusili.

Težave ob dolgotrajni hrambi; Ob dolgotrajni hrambi lahko pride do težav z baterijo. BMS (battery management system) je namreč pod napetostjo tudi kadar je baterija odklopljena od porabnikov, kar pospeši samopraznjenje baterijskega paketa. Možnosti za spopad s to težavo je več, najbolj elegantna je imeti robota kadar ni v uporabi konstantno priključenega na omrežni polnilnik.

8. Izdelava končne različice in ohišja

Po zaključenih testiranjih in možnih izboljšavah je sledila debata o izdelavi končne različice robotske kosilnice. Pomembno je, da je ohišje zasnovano tako, da

zagotavlja optimalno zaščito notranjih komponent pred mehanskimi poškodbami in vremenskimi vplivi, hkrati pa odpravi prej omenjene pomanjkljivosti. Pri izbiri materialov in komponent moramo upoštevati njihovo trpežnost, odpornost proti koroziji ter odpornost na vibracije. Oblikovanje ohišja ne vpliva zgolj na estetiko naprave, temveč tudi na njeno ceno, zahtevnost izdelave, vzdržljivost in funkcionalnost.

8.1 Zaščita pred prahom in vodo

Ker je robotska kosilnica med delom izpostavljena zahtevnim pogojem, je pri konstruiranju in izdelavi potrebno misliti tudi na odpornost na prah, vodo in druge tujke. Tesnila, gumijaste obloge in posebni premazi pomagajo preprečiti vdor vlage v električne komponente, kar bistveno izboljša trdoživost komponent in s tem celotne naprave. Prav tako je treba upoštevati enostavnost čiščenja, da bi preprečili morebitne poškodbe zaradi dolgotrajne izpostavljenosti vlagi ter kemičnim učinkom pokošene trave med hrambo.

8.2 Ergonomija in varnost

Pri oblikovanju robotske kosilnice je pomembno upoštevati tudi ergonomijo in varnostne standarde. Naprava mora biti zasnovana tako, da omogoča enostavno uporabo in minimalno vzdrževanje, ter da dolgotrajna hramba ne vpliva na njeno funkcionalnost. Varnostni mehanizmi, kot so tipka za takojšnjo zaustavitev naprave in mehanizem za preprečevanje nenamernega zagona, so ključni za preprečevanje nesreč. Pomembne so tudi varnostne oznake, ki operaterja opozarjajo na nevarnost. Prav tako mora robotska kosilnica izpolnjevati regulativne zahteve, ki zagotavljajo varno uporabo tako za ljudi kot za domače živali. Te regulative so npr. omejitve hrupa in uporaba kodirane radijske povezave na javno dostopnih frekvencah, kar smo mi zagotovili z uporabo »consumer grade« komponent, ki so prosto dostopne na trgu.

8.3 Dokumentacija in možnost serijske proizvodnje

Za uspešno serijsko proizvodnjo robotske kosilnice je ključnega pomena natančna in celovita dokumentacija. Ta vključuje tehnične načrte, električne diagrame, programsko kodo ter mehanične specifikacije naprave. Dokumentacija omogoča ponovljivost proizvodnje in olajša servisiranje ter nadgradnje izdelka. Žal pa je

konkurenca z vzhoda tako agresivna, da bi bili po naših izračunih z našim izdelkom na trgu povsem nekonkurenčni, zato smo o možnosti serijske proizvodnje razmišljali zgolj hipotetično, precej bolj pa smo se osredotočili na načrtovanje naslednje, izboljšane različice, ki ne bo služila le kot predmet raziskave, pač bo predvidoma tudi v dejanski uporabi.

8.4 Dokumentiranje vezij, programske kode in mehanskih delov

Podrobna dokumentacija vezij in programske kode zagotavlja, da je delovanje robotske kosilnice jasno razumljivo, kar precej olajša nadaljnji razvoj in morebitna popravila. Medtem ko je mehanska izvedba precej očitna, in se jo da na naslednji različici v praksi precej prilagoditi, je električna izvedba krmilnih sistemov precej manj fleksibilna. Mi smo se naslonili na odprtokodni projekt Hoverboard Hack FOC, kar nam je prihranilo ogromno dela, ali pa celo sploh omogočilo, da motorja krmilimo v načinu za krmiljenje hitrosti (speed control). Praktično vsi komercialno dosegljivi BLDC krmilniki namreč krmilijo navor, kar je za našega robota veliko manj uporabno.

8.5 Izdelava uporabniških navodil in varnostnih priporočil

Uporabniška navodila so ključnega pomena za enostavno uporabo robotske kosilnice. Morajo biti jasna, razumljiva in vsebovati slike ali diagrame, ki prikazujejo pravilno namestitev in uporabo naprave. Varnostna priporočila pa zagotavljajo, da uporabniki razumejo tveganja in pravilno ravnajo z napravo, da bi se izognili poškodbam ali škodovanju okolju. Novejša različica robota bo imela nameščene varnostna opozorila in oznake, opremljena pa bo tudi z rumenimi utripajočimi lučmi.

8.6 Izdelava naslednje različice

Skonstruirali, izdelali in preizkusili smo uspešen prototip, ki ni le preizkus koncepta, ampak gre za delujoč stroj. Naslednja različica bo vsebovala vse funkcije, ki so se pri prototipu izkazale kot uspešne in uporabne, hkrati pa zajema tudi določene rešitve težav oz. pomanjkljivosti, ki so se pojavile pri prototipu:

Širina košnje: prototip je s širino košnje 55 cm in širino stroja 98 cm le pogojno uporaben na večjih površinah, k temu pripomore še dejstvo, da je širina stroja precej večja od širine košnje. Naslednja različica bo namesto kosišča vrtno kosilnice imela kosišče vrtnega traktorja s širino košnje 96 cm, širina celotnega stroja pa bo 130

cm. Ne le, da bo širina košnje predstavljala večji delež širine stroja, tudi sama košnja bo z večjo širino kosišča potekala hitreje.

Avtonomija pogonskega sklopa: drugačna konstrukcija stroja, večja višina in jermenski prenos zaradi pogona dveh nožev omogoča uporabo avtomobilskega alternatorja z avtomobila Fiat Punto 1.2, ki skrbi za zagotavljanje energije za delovanje elektromotorjev. Za svoje delovanje alternator potrebuje tudi pomožni 12 V akumulator, zaradi nizke mase in skromnih dimenzij smo uporabili akumulator za skuter. Pri tem delu smo naleteli na težavo, da alternator proizvaja elektriko z napetostjo 14 V, motorji pa za svoje delovanje potrebujejo precej višjo napetost. Zato smo uporabili 400 W DC-DC boost konverter, ki 14 V z alternatorja in pomožnega svinčenega akumulatorja spremeni v 42 V, kar je dovolj za polnjenje pogonskih baterij. Boost konverter ima še dve zelo uporabni funkciji: omejevanje izhodnega toka in izklop pri določeni napetosti. Omejevanje smo nastavili za 5 A (cca 200 W), napetost izklopa pa na 13 V, kar nam konverter pri neaktivnem alternatorju izključi s čimer ohrani pomožni akumulator, takoj ko se le ta zažene, pa prične s polnjenjem baterije.

Prilagajanje višine košnje: konstrukcija, ki drži kosišče in alternator, je ločena od voznega podstavka, in omogoča tristopenjsko nastavitve lege v šasiji in s tem nastavitve višine košnje.

Težave s samopraznjenjem ob dolgotrajni hrambi: robot bo imel nameščeno 3 W solarno celico, ki bo nadomestila izgube energije, vendar bo treba v tem primeru skrbeti za to, da robot ne bo shranjen v trajno temnem prostoru (npr. v kleti, strojni lopi,...).



Slika 14: avtorji drugega prototipa z mentorjem



Slika 15: nov, večji robot, ki nastaja z upoštevanjem vseh izkušenj, ki smo jih pridobili z izdelavo prototipa, ki je predmet te naloge

9. Zaključek

Projekt izdelave robotske kosilnice je projekt z izrazito interdisciplinarnostjo. Združuje znanja s področja pogonskih motorjev, strojništva, elektronike in varstva pri delu. Projekt je s pavzami trajal več kot eno leto, v tem času smo dobili ogromno idej za tehnične rešitve, katere smo potem tudi preizkusili in ovrednotili. Naš robot se je kot testna platforma izkazal odlično, z delom na njem smo preizkusili nekatere rešitve, in rezultati teh preizkusov so v trenutku pisanja naloge že koristno uporabljeni na naslednji, povečani izvedenki robotske kosilnice.

10. Viri

1. GITHUB: HOVERBOARD HACK FOC. [Online]. [11. 1. 2025; 21:00]
Dostopno na spletnem naslovu: <https://github.com/EFeru/hoverboard-firmware-hack-FOC>