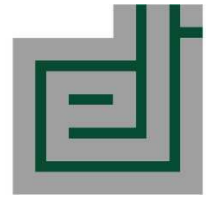




Latvijas
Lauksaimniecības
universitāte

ELEKTRONIKAS UN
DATORZINĀTŅU
INSTITŪTS



projekta

“Robotizētas nezāļu ierobežošanas iekārtas izveide”

NOSLĒGUMA PĀRSKATS

Līguma nr. : 18-00-A01612-000024

Projekta partneri: LLU Augu aizsardzības zinātniskais institūts “Agrihorts”
LLU Tehniskā fakultāte
Elektronikas un datorzinātņu institūts
SIA “Lejasvagaļu dārzs”
J. Lipska saimniecība “Absolūts Ēd”
ZS “Atvases

Projekta īstenošanas periods: 01.01.2019 - 28.02.2021.

Kopējās projekta izmaksas: 472`500 EUR

2021

Saturs

Tekstā lietoto saīsinājumu tabula.....	3
Projekta apraksts un sasniedzamais mērķis	4
Projektā iesaistīto partneru uzdevumi un atbildības jomas	5
1. Iekārtas mobilās platformas un nezāļu iznīcināšanas mehānisko daļu projektēšana un konstruēšana.....	7
1.1. Sākotnējās platformas apraksts	7
1.2. Mobilās platformas pielāgošana autonomai darbībai un nezāļu ierobežošanai	13
1.3. Nezāļu ierobežošanas mehāniskais un lāzera agregāts	24
1.4. Eksperimenti ar lāzera izmantošanu nezāļu ierobežošanai	31
2. Vizuālo datu kopas sagatavošana un anotēšana nezāļu atpazīšanas algoritma apmācībai.....	51
2.1. Augu audzēšana siltumnīcā.....	53
2.2. Fotografēšanas aprīkojums	55
2.3. Fotoattēlu uzņemšana lauka apstākļos	59
2.4. Fotoattēlu anotēšana.....	61
3. Nezāļu atpazīšana un to atrašanās pozīciju noteikšana	63
3.1. Algoritmi augu atpazīšanai	63
3.2. Nezāles atrašanās koordinātu 3D telpā noteikšana.....	67
3.3. Attēlu apstrāde, lai pārbaudītu nezāles iznīcināšanu.....	71
4. Nezāļu ierobežošanas iekārtas pozicionēšanas un orientēšanas moduļu izstrāde	72
4.1. GNNS RTK robota vadīšanas moduļa un algoritmu izstrāde	72
4.2. Vagu virziena atpazīšanas algoritms.....	79
5. Izstrādāto moduļu integrēšana un iekārtas testēšana lauka apstākļos	81
5.1. Atsevišķo mezglu savietošana vienotā iekārtā un sistēmu atklūdošana.....	81
5.2. Robota centrālā vadība.....	88
5.3. Robota vadības grafiskā saskarne	93
5.4. Robota testēšana lauka apstākļos	96
Secinājumi un nākotnes perspektīva	98
Sagatavotās publikācijas, raksti un dalība pasākumos	99

Tekstā lietoto saīsinājumu tabula

LLU	Latvijas Lauksaimniecības universitāte
TF	Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskā fakultāte
EDI	Elektronikas un datorzinātņu institūts
TTL	Tranzistora-tranzistora loģika (vadības signāls)
CPU	Datora centrālais procesors (<i>Central Processing Unit</i>)
GNSS	Globālā navigācijas satelītu sistēma
GPS	Globālā pozicionēšanas sistēma
RTK	Real-time kinematic (Reāllaika kinemātika)
PCB	Iespiedshēmas plate (<i>Printed Circuit Board</i>)
AE	Augu attīstības etaps

Projekta apraksts un sasniedzamais mērķis

Nezāles ir viens no būtiskākajiem faktoriem, kas samazina ražu un palielina ražošanas izmaksas augkopībā, it sevišķi dārzenū, ogu un garšaugu audzēšanā izmantojot bioloģiskās metodes. Manuāla nezāļu ravēšana arī būtiski samazina saimniecības ekonomisko efektivitāti un padara ražošanu atkarīgu no svārstībām darbaspēka tirgū.

Lai arī tirgū ir pieejamas tehnoloģijas, kas daļēji risina nezāļu problēmu (piem., augsnes sagatavošana, starpvagu kultivēšana), tehnoloģijas nezāļu ierobežošanai tuvu kultūraugam joprojām ir izstrādes stadijā arī citās valstīs, tādēļ pamatā tiek izmantota ķīmiska nezāļu ierobežošana - izmantojot pesticīdus, bet bioloģiskajās saimniecībās - roku darbs. Īpaši aktuāli tas ir kultūraugiem, kas slikti konkurē ar nezālēm un ir jutīgi pret mehanizētu apstrādi (piem., burkāni, bietes, redīsi). Lai uzlabotu kultūrauga konkurenci ar nezālēm agrās attīstības stadijās var veikt diedzēšana substrātā un uz lauka izstādīt dēstus. Tas gan ir piemērots tikai atsevišķiem kultūraugiem un ir saistīts ar papildus roku darbu. Līdzīgi ir ar mulčējamo materiālu izmantošanu (piem., plēves, biomasa) – šī metode ir piemērotas tikai daļai no kultūraugiem.

Bioloģiskajās saimniecībās roku darba aizvietošana un ražošanas mehanizācija dotu būtisku ieguldīju ražošanas attīstībai savukārt saimniecībās, kas izmanto pesticīdus būtu iespējams samazināt to lietojumu, kas ir īpaši aktuāli šobrīd, kad ES politika ir vērsta uz pesticīdu apjoma samazināšanu un to izraisīto veselības risku samazināšanu.

Projekta mērķis: izstrādāt nezāļu ierobežošanas iekārtu, kas spēj autonomi pārvietoties pa lauku, identificēt nezāles un atšķirt tās no kultūrauga, kā arī izmantojot augstas enerģijas lāzera vai precīzi pozicionēta mehāniskā agregāta palīdzību, iznīcināt nezāli vai būtiski traucēt tās turpmāko augšanu.

Projektā plānotie rezultāti:

- projekta ietvaros tiks izstrādāta jauna augsti tehnoloģiska iekārta;
- tiks sagatavotas 3 populārās publikācijas nozares izdevumos;
- tiks sagatavotas 2 zinātniskās publikācijas starptautiskos izdevumos;
- projekta otrajā gadā izstrādātā iekārta tiks prezentēta 3 lauku dienās.

Projektā iesaistīto partneru uzdevumi un atbildības jomas

Projekta īstenošanā iesaistīti seši partneri, kuriem tika paredzēti uzdevumi atbilstoši to kompetencei un iepriekšējai pieredzei. Projekta kopējo vadību veica LLU Augu aizsardzības zinātniskais institūts `Agrihorts`, un katrs no partneriem plānoja un realizēja savas aktivitātes atbilstoši kopējam projekta plānam. Zemāk uzskaitīti galvenie projekta ietvaros paveiktie uzdevumu bloki katram partnerim.

LLU Augu aizsardzības zinātniskais institūts `Agrihorts`

Agrihorts veica augu audzēšanu siltumnīcas apstākļos, fotogrāfiju uzņemšanu gan uz lauka, gan siltumnīcā audzētajiem augiem, attēlu apstrāde un anotēšanu. Sadarbībā Tehnisko fakultāti veikti augu apstrādes ar lāzeru eksperimenti. Sadarbībā ar EDI veikti robota navigācijas sistēmas testi. Agrihorts nodrošināja informācijas apmaiņu un aktivitāšu koordinēšanu partneru starpā. Kopā ar pārējiem partneriem veikta iekārtas atsevišķo moduļu un prototipa testēšanu laboratorijās un lauka apstākļos.

LLU Tehniskā fakultāte

Tehniskā fakultāte veica mehānisko un elektronisko daļu izstrādi, rasēšanu un izgatavošanu, tajā skaitā metāla detaļu metināšanu un elektronisko iespaidshēmu lodēšanu. Veikta centrālās vadības un izpildmehānismu iegultā programmēšana, lietotāja saskarnes izveide prototipa vadīšanai ar planšetes palīdzību. Izgatavots lāzera iedarbības novērtēšanas stands uz roborokas manipulatora UR10 bāzes. Sadarbībā ar EDI veikta navigācijas iekārtu testēšana.

Elektronikas un datorzinātņu institūts (EDI)

EDI veica attēlu anotēšanas rīka izstrādi, augu atpazīšanas algoritmu izstrādi un konvolūciju neironu tīklu apmācību, navigācijas algoritmu izstrādi, kā arī atsevišķo programmatūras bloku kopējās komunikācijas ietvara izveidi. Sadarbībā ar Agrihortu un Tehnisko fakultāti veikta navigācijas iekārtu testēšana. Sadarbībā ar Agrihortu veikta dažādu atpazīšanas algoritma versiju testēšana.

SIA "Lejasvagaļu dārzs"

Saimniecība nodrošināja nepieciešamās platības ar ķirbju un cukīni augiem agrās attīstības stadijās. Tika veikta nepieciešamā augsnes apstrāde un sagatavošana sējai un kultūraugu sēja, veicot to atkārtoti vairākas reizes sezonā. Pēc Agrihorta norādījumiem tika veikta mehāniska vai manuāla nezāļu ierobežošana. Saimniecība arī veica kultūraugu fotografēšanu, izmantojot sagatavoto aprīkojumu. Kopā ar pārējiem partneriem veikta prototipa novērtēšana lauka apstākļos un rekomendāciju sniegšana uzlabojumiem.

J. Lipska saimniecība "Absolūts Ēd"

Saimniecība nodrošināja nepieciešamās platības ar rutku un redīsu augiem agrās attīstības stadijās. Tika veikta nepieciešamā augsnes apstrāde un sagatavošana sējai un kultūraugu sēja, veicot to atkārtoti vairākas reizes sezonā. Pēc Agrihorta norādījumiem tika veikta mehāniska vai manuāla nezāļu ierobežošana. Saimniecība arī veica kultūraugu

fotografēšanu, izmantojot sagatavoto aprīkojumu. Kopā ar pārējiem partneriem veikta prototipa novērtēšana lauka apstākļos un rekomendāciju sniegšana uzlabojumiem.

ZS “Atvases”

Saimniecība nodrošināja nepieciešamās platības ar biešu un burkānu augiem agrās attīstības stadijās. Tika veikta nepieciešamā augsnes apstrāde un sagatavošana sējai un kultūraugu sēja, veicot to atkārtoti vairākas reizes sezonā. Pēc Agrihorta norādījumiem tika veikta mehāniska vai manuāla nezāļu ierobežošana. Saimniecība arī veica kultūraugu fotografēšanu, izmantojot sagatavoto aprīkojumu. Kopā ar pārējiem partneriem veikta prototipa novērtēšana lauka apstākļos un rekomendāciju sniegšana uzlabojumiem.

Papildus augstāk uzskaitītajam, iekārtas atsevišķo moduļu un prototipa dažādas gatavības stadiju testēšanā piedalījās visi zinātniskie partneri, katram sniedzot ieguldījumu savas kompetences sfērā. Partneru starpā notika aktīva komunikācija gan divpusēji, gan iesaistoties vairākiem partneriem, lai risinātu kādu izstrādes aspektu. Ļoti svarīga bija zemnieku saimniecību iesaiste projektā, jo tika sniegti vērtīgi norādījumi par prototipa, kā arī atsevišķo komponentu un tehnoloģiju piemērotību konkrētās saimniecības agrotehniskajām prasībām. Tāpat tika saņemta atgriezeniskā saite par vajadzīgajiem uzlabojumiem fotografēšanas aprīkojumam un fotogrāfiju uzņemšanai kopumā.

Pirmajā sezonā tika aktīvi diskutēts ar saimniecībām par nepieciešamajiem tehniskajiem risinājumiem dažādām kultūraugu sugām, kas tālāk tika ņemts vērā prototipa izstrādē, piemēram, izveidots regulējams riteņu atstatums, lai varētu strādāt ar dažādu kultūraugu rindu atstatumu, kā arī izveidots regulējams ierobežošanas agregātu augstums, kas ļauj strādāt gan ar vagām, gan uz plakana lauka.

Projekta partneru kontaktinformācija:

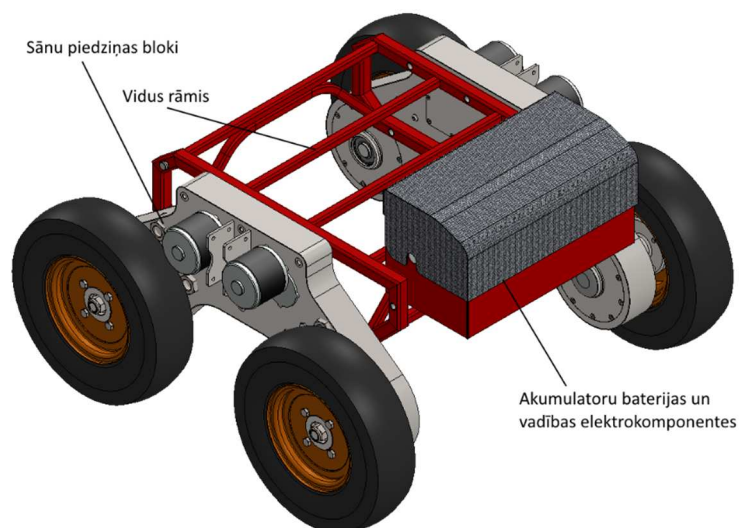
- LLU Augu aizsardzības zinātniskais institūts `Agrihorts`, Jānis Jaško, janis.jasko@llu.lv
- LLU Tehniskā fakultāte, Vitālijs Osadcuks, vitalijs.osadcuks@llu.lv
- Elektronikas un datorzinātņu institūts, Kaspars Sudars, sudars@edi.lv
- SIA “Lejasvagaļu dārzs”, Sanita Vīķe, sanita.vike@inbox.lv
- J. Lipska saimniecība “Absolūts Ēd”, Juris Lipskis, aimx@tvnet.lv
- ZS “Atvases”, Andris Mangulis, andris.mangulis@inbox.lv

1. Iekārtas mobilās platformas un nezāļu iznīcināšanas mehānisko daļu projektēšana un konstruēšana

Nezāļu ierobežošanas iekārta projektēta kā autonoma, pašbraucoša iekārta, kas izstrādāta ar salīdzinoši kompaktiem izmēriem. Iekārtas konstrukcija veidota tā, lai to varētu ērti pielāgot vajadzīgajam dobes platumam. Lai nodrošinātu labu pārgājāmību un vadāmību, izveidota visu riteņu neatkarīga piedziņa, t.i. katru riteni piedzen savs elektromotors. Piedziņas mehānisms izveidots noslēgts, lai nepieļautu apkārtējās vides (lietus, putekļu utt.) nokļūšanu uz piedziņas elementiem.

Projekta laikā sākotnējie pētījumi, augu paraugu fotografēšana veikta uz jau iepriekš LLU izstrādātas robotizētas platformas. Tomēr apzinot potenciālās pilnveidošanas iespējas, sākotnējās platformas vietā uzprojektēta un izveidota jauna platforma, kura tālāk aprīkota ar visiem nepieciešamajiem elementiem nezāļu atpazīšanas un ierobežošanas funkciju veikšanai.

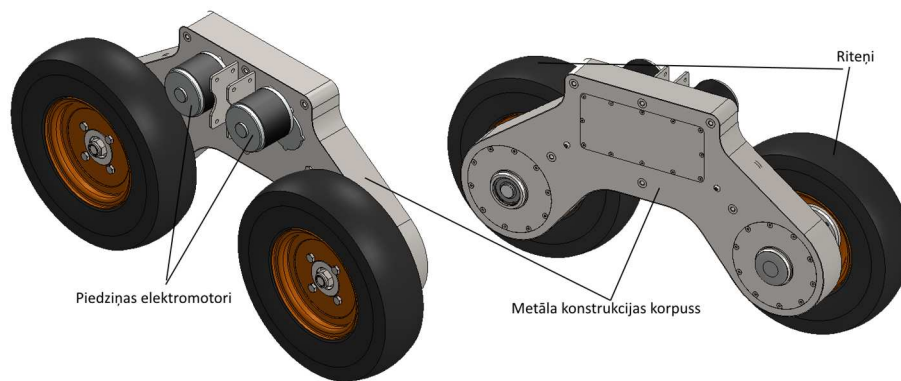
1.1. Sākotnējās platformas apraksts



1. att. Sākotnējās platformas kopskats

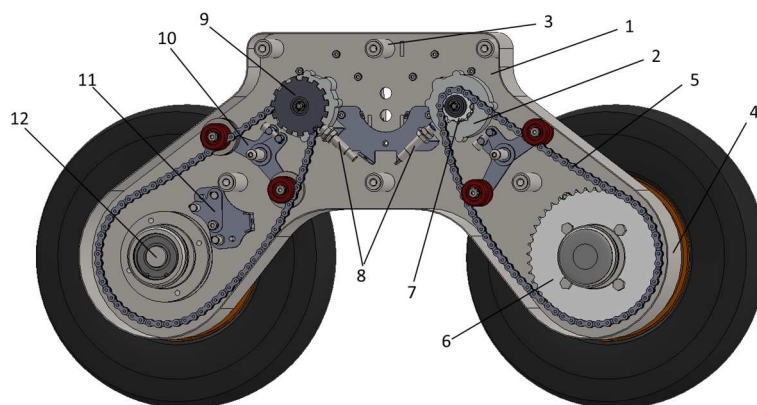
Sākotnējās platformas konstrukcijas pamatā bija divi neatkarīgi sānu piedziņas bloki, kas savā starpā sastiprināti ar metāla konstrukcijas rāmi. Pie metāla konstrukcijas rāmja pieskrūvēts nodalījums platformas akumulatora bateriju un elektrovadības elementu nostiprināšanai.

Platformas sānu bloku pamatā ir no metāla izgatavots korpuss, kurā ievietoti visi piedziņas pārvada elementi. Korpusā iegultņotas divas asis, uz kurām stiprinās piedziņas riteņi, savukārt korpusa augšdaļā ir izveidotas vietas piedziņas elektromotoru nostiprināšanai.



2. att. Sānu bloki

Katra riteņu piedziņa tiek nodrošināta ar ķēdes pārvadu no sava līdzstrāvas elektromotora. Elektromotori, savukārt nekustīgi pieskrūvēti sānu bloku korpusam. Riteņu asis divos lodīšu gultņos iegultņoti speciāli izveidotos gultņu korpusos.



3. att. **Sānu bloka konstrukcija:** 1 – Sānu bloku pamatne; 2 – Elektromotori ar reduktoriem; 3 – Pamatņu stiprinājuma elementi; 4 – Apvalki; 5 – Piedziņas ķēdes; 6 – Lielā piedziņas zvaigznīte; 7 – Mazā piedziņas zvaigznīte; 8 – Rotācijas ātruma sensori; 9 – Apgriezienu zobu disks; 10 – Ķēžu spriegotājmehānisms; 11 – Bremžu mehānisms; 12 – Piedziņas ass.

Analizējot platformas izmantošanas, kā arī apkopes un remonta iespējas, noteiktas vairākas konstrukcijas uzlabošanas iespējas, kas arī iestrādātas nākamajā platformas konstrukcijā. Galvenās šīs konstrukcijas nepilnības noteiktas sekojošos elementos.

Pirmkārt **ķēdes spriegošanas** iespējas. Kā zināms, ekspluatācijas laikā ķēde var stiepties, kas izsauc nepieciešamību periodiski pārbaudīt ķēdes spriegojumu, kā arī nepieciešamības gadījumā, to nospriegot. Šajā konstrukcijā izveidots spriegošanas mehānisms sānu bloku iekšpusē ar salīdzinoši neērtu piekļūšanas iespēju. Tāpat korekta spriegošanas mehānisma izveide paredz, ka ķēde tiek spriegota tajā ķēdes posmā, kas nav noslogots. Tomēr šīs platformas konstrukcija paredzēta braukšanai abos virzienos, līdz ar to, atkarībā no braukšanas virziena tiks nospriegots viens vai otrs ķēdes posms. Ar esošo ķēdes spriegošanas mehānismu, tika mēģināts nodrošināt korektu ķēdes spriegojumu neatkarīgi no platformas braukšanas virziena, tomēr platformas virziena maiņa izsauca spriegošanas mehānisma pārvietošanos ar troksni. Nākamajā platformas versijā šis spriegošanas mehānisms tiks aizstāts ar pavisam savādāku spriegošanas konstrukciju.

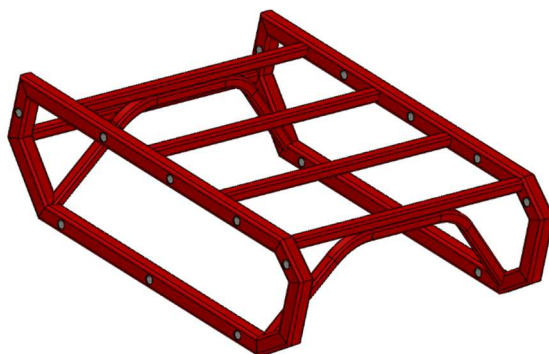
Bremžu mehānisms. Šajā platformas konstrukcijā bija izstrādāts lentu bremžu mehānisms, tomēr sākotnējā platformas ekspluatācija parādīja, ka bremžu mehānismam nav būtiskas lomas. Sakarā ar to, ka izvēlēti elektromotori ar reduktoriem, tad platformas kustība bez elektromotoru piedziņas ir aprūtināta. Elektromotori ar reduktoriem praktiski nobremzē platformu, un tas ir pietiekoši, lai platformu noturētu vajadzīgajā vietā pat uz nelieliem slīpumiem. Tādēļ nākamajā platformas versijā bremžu mehānismi netiks uzstādīti, tomēr kā papildus iespēja tā netiek izslēgta.



4. att. Bremžu mehānisms.

Riteņu griešanās ātruma noteikšana. Riteņu griešanās ātrumu nepieciešams noteikt, lai varētu vadīt un nodrošināt atbilstošu elektromotoru jaudu konkrētiem riteņu saķeres apstākļiem. Platformas konstrukcijā bija ieplānots, ka riteņiem, kam ir labāka saķere, tiks pievadīts lielāks griezes moments, nekā tiem, kam ir sliktāka saķere. Esošā konstrukcija paredzēja salīdzinoši dārgu apgriezienu devēju uzstādīšanu, kā arī speciālu izciļņu disku uzstādīšanu uz elektromotora izejošās vārpstas. Nākamās versijas platformai, principiāli šī funkcija tiks atstāta, tomēr konstruktīvais izpildījums ir vienkāršots un uzlabots.

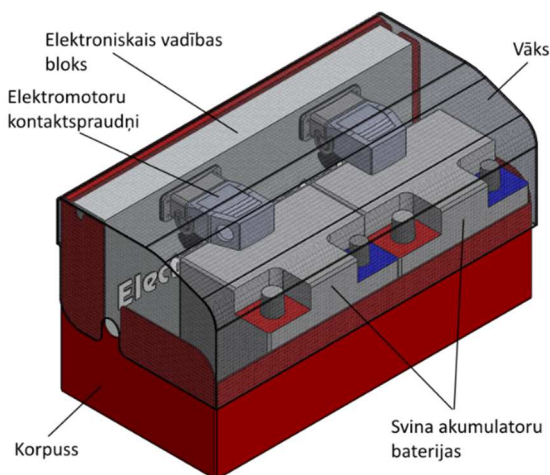
Vidusrāmja konstrukcija. Sākotnējā izpildījumā vidusrāmis izveidots kā neizjaucams, sametinātu profilu rāmis.



5. att. Vidus rāmja konstrukcija

Lai šādā izpildījumā izmainītu sānu bloku atstatumu, jeb t.i., lai pielāgotu platformu atšķirīgam dobes platumam, nepieciešams nomainīt visu rāmi. Gadījumos, ja potenciālajā saimniecībā tiek izmantoti dažādi dobes platumi, tas nav ērti no iekārtas izmantošanas viedokļa. Šī iemesla dēļ jaunās platforma konstruēta ar pavisam atšķirīgu un daudz ērtāku iespēju izmainīt starpvalu attālumu.

Akumulatoru baterijas, centrālais vadības bloks un atsevišķu elektromotoru vadības bloki novietoti kopējā kastē un piestiprināti pie vidusrāmja.



6. att. Platformas elektrokomponentes

Šajā konstrukcijā izmantoti svina skābes akumulatoru baterijas, kas ir salīdzinoši lēti un vienkārši, tomēr, ja aplūko tos no enerģijas blīvuma attiecībā pret baterijas masu, tad šis nav pats piemērotākais variants. Tādēļ jaunās konstrukcijas platformā izmantoti LiPO4 akumulatoru baterijas.

Autonomās platformas izpildījums uz projekta sākumu dots sekojošā attēlā:



7. att. V1 Platformas izskats uz projekta sākumu

Platformas tehniskie rasējumi šai versijai netiks uzrādīti, jo jaunās platformas konstrukcija lielākai daļai elementu ir atšķirīga no šīs sākotnējās versijas.

Lai ar esošo platformu varētu veikt projektā sākotnēji iepiņānotos eksperimentus, kas pamatā bija augu fotografēšana, jeb augu datubāzes uzņemšana, esošā platforma tika aprīkota ar palīgaprīkojumu. Tika izveidots korpuss papildus akumulatoru, augu attēlu uzņemšanas datora, sprieguma pārveidotāju u.c komponentu novietošanai, kā arī platformas apakšdaļā

izveidota konstrukcija fotografēšanas kameras un papildus apgaismojuma uzstādīšanai. Tāpat platformas priekšpusē izveidots regulējams stiprinājums priekšējās kameras novietošanai.

Papildus aprīkojuma izgatavošana un uzstādīšana parādīta sekojošos attēlos:

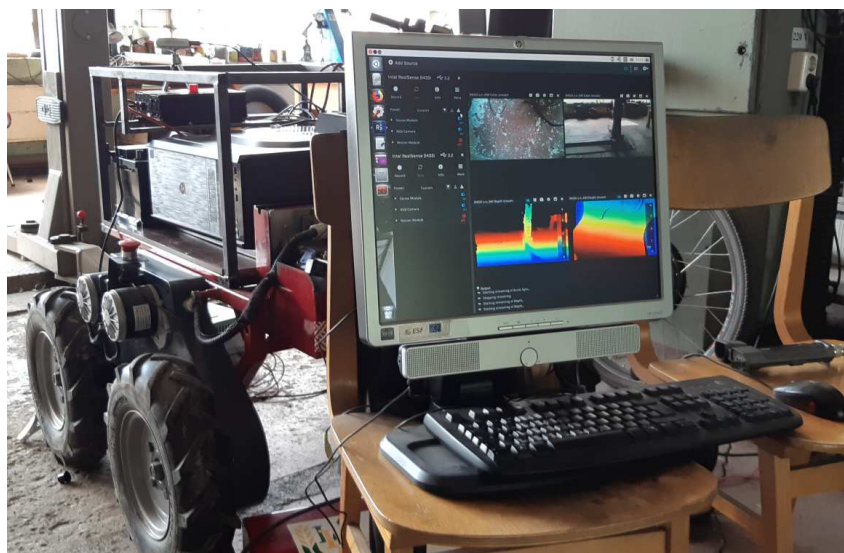


8. att. Kameras un apgaismojuma stiprināšanas rāmja izveide



9. att. Korpusa izveide papildaprīkojuma novietošanai.

Iekārtu salāgošana un kameru testēšana laboratorijas apstākļos parādīta sekojošā attēlā:



10. att. Augu fotografēšanas kameru salāgošana un pārbaude



11. att. Sākotnējā platforma, kas pielāgota kultūraugu fotografēšanai.

Šādi izskatījās sākotnējā platforma, kad tā bija pielāgota kultūraugu fotografēšanai. Visas elektrokomponentes novietotas no atmosfēras apstākļiem pasargātā korpusā. Papildus uzstādītais akumulators ļauj fotografēšanas funkciju, kā arī fotogrāfiju saglabāšanu nodrošināt autonomi bez ārēja sprieguma padeves. Platformas priekšpusē novietotā kamera paredzēta, lai var uzņemt attēlus no vagas, pa kuru tiek braukts, tādā veidā, dodot iespēju pilnveidot vagas atpazīšanas funkciju. Sākotnējās platformas vadība notika ar distances vadības pulti, kas šajā gadījumā bija viedtālrunis ar atbilstošu aplikāciju. Platformas aprīkojuma korpusā tika uzstādīts arī monitors, kas lauka apstākļos ļāva kontrolēt un pārraudzīt augu fotogrāfiju uzņemšanas procesu.

Sākotnējās platformas noslēdzošajā izmantošanas posmā, tās konstrukcija tika papildināta ar saules baterijām, papildus enerģijas iegūšanai. Šādā izpildījumā ievērojami palielinājās platformas ekspluatācijas laiks bez papildus uzlādēšanas.

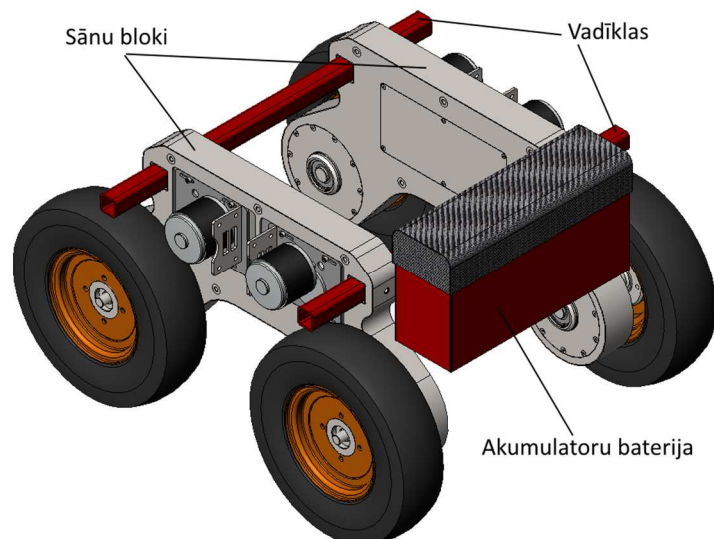


12. att. Ar saules enerģijas paneli aprīkota platforma.

1.2. Mobilās platformas pielāgošana autonomai darbībai un nezāļu ierobežošanai

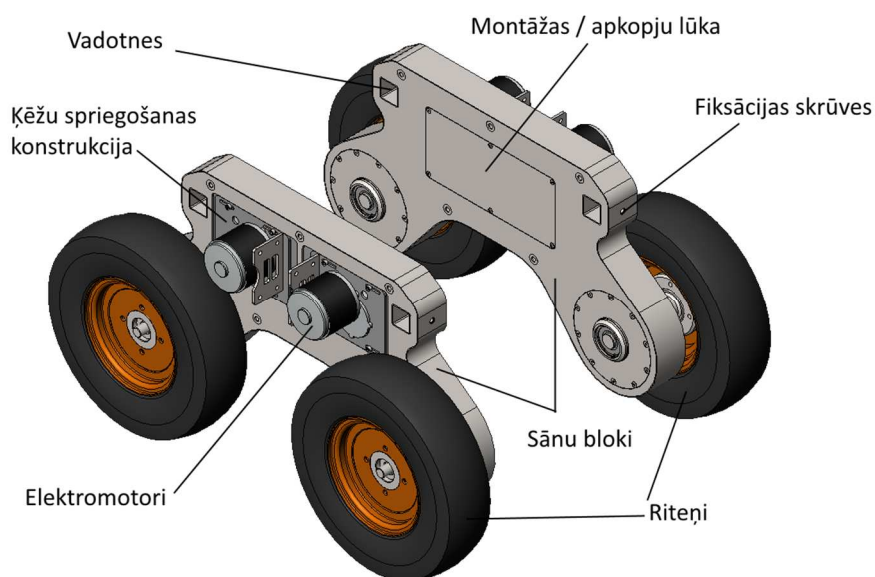
Paralēli sākotnējās platformas pilnveidošanai un izmantošanai, notika darbs pie uzlabotās nezāļu ierobežošanas platformas (V2) izstrādes. Tika izstrādāta jaunas konstrukcijas platforma, kas tāpat kā sākotnējā platformas versija, sastāvēja no diviem patstāvīgiem sānu blokiem. Atšķirībā no pirmās versijas, šai platformai, sānu bloki nebija pieskrūvējami pie vidusrāmja, bet gan tie sastiprināti ar divām sijām, kas ļauj ērti izmainīt sānu bloku savstarpējo atstatumu.

Lai šādu regulēšanas konstrukciju vārētu īstenot, tika ieviestas izmaiņas arī pašu sānu bloku konstrukcijās. Sānu blokos tika ieprojektētas vadotnes platformas sijām. Priekšstatam sekojošajā attēlā parādīts jaunās platformas (braucošās daļas) kopskats, un detalizācija tiks izklāstīta aiz tās.

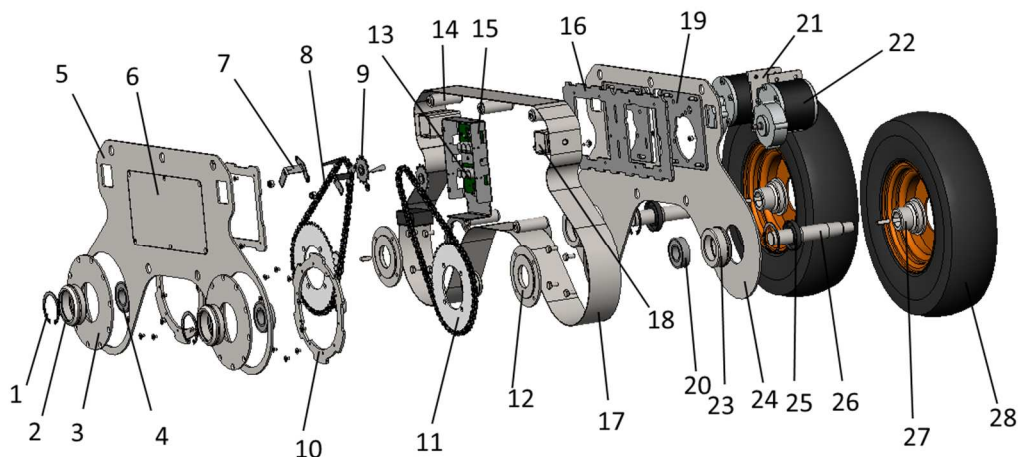


13. att. Jaunās platformas (V2) braucošās daļas konstrukcija

Kā redzams attēlā, platformas sānu bloki vairs nav pieskrūvēti nemainīga platuma vidusrāmim, bet gan nostiprināti uz divām vadīklām. Platformas platumu var viegli pielāgot. Maksimālās platformas platumu nosaka vadīklu garums. Platformas sānu bloku fiksāciju uz vadīklām nodrošina ar speciāli izveidotu kontrējošo skrūvju palīdzību, kas iestrādātas sānu blokos. Līdz ar to arī pašu sānu bloku konstrukcija ir ievērojami pamainījusies, salīdzinot ar sākotnējo V1 versiju.



14. att. Sānu bloku kopskats.



15. att. **Sānu bloka detalizācija:** 1. – Sprostgredzens; 2., 23. – Gultņu korpusi; 3. – Iekšējie rumbu vāki; 4., 20. – Gultnis; 5. – Bloka iekšējais sāns; 6. – Montāžas lūka; 7 – Apgriezienu devēja kronšteins; 8 – Ķēde; 9. – Dzenošais ķēžrats; 10. – Rumbu vāka kronšteins; 11. – Dzītais ķēžrats; 12. – Dzītā ķēžrata rumba; 13. – Elektromotoru draiveri; 14. – Sānu malu stiprinājuma elementi; 15. – Draiveru kronšteins; 16 – Elektromotoru vadotņu kronšteins; 17 – Sānu bloka apvalks; 18. – Vadotnes; 19. – Elektromotoru kronšteini / vadotnes; 24. – Bloka ārējais sāns; 25. – Blīvslēgs; 26. – Riteņa vārpsta; 27. – Riteņa rumba; 28. – Ritenis.

No visām iepriekšējā attēlā redzamajām detaļām, kā standartizēti izstrādājumi, kuri atbilstoši specifikācijai atrasti un iegādāti ir: elektromotori ar reduktoriem, abi piedziņas ķēžrati, ķēde, kā arī dažādi standartizēti izstrādājumi (skrūves, uzgriežņi, gultņi, sprostgredzeni, blīvslēgi, kā arī riepas un diski. Pārējās visas sastāvdaļas ir izprojektētas, uzrasētas un pasūtītas izgatavošanai vai izgatavotas paša spēkiem. Liela daļa elementu atbilstoši rasējumam izgriezti ar lāzergriešanas paņēmieni no S235 markas tērauda, atsevišķas detaļas izgrieztas no DC-01 tērauda loksnēm. Savukārt piedziņas vārpsta, gultņu korpusi, riteņu rumbas u.c. elementi izvirpoti no atbilstošu materiālu apaļdzelzs stieņiem vai biežsienu caurulēm. Piedziņas vārpstas materiāls C45 tērauds.

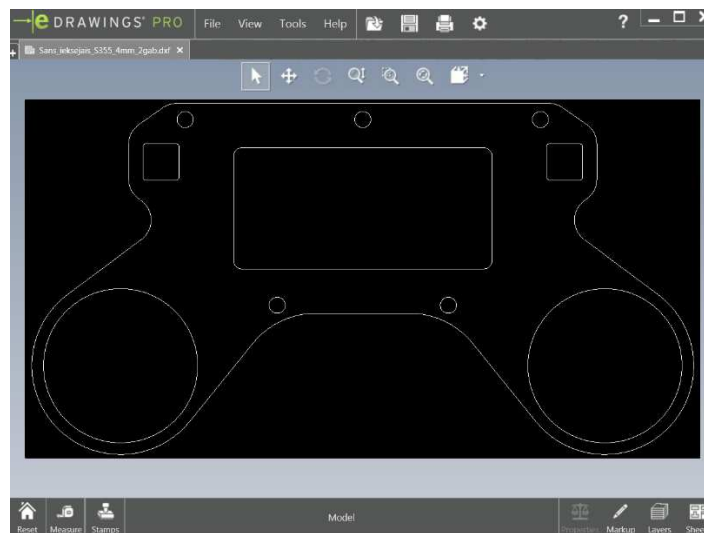
Konstrukcijas izgatavošanas galvenie etapi ir sekojoši. Sākotnēji visi elementi tiek uzprojektēti, uzrasēti un izveidots kopsalikuma rasējums, kurā rūpīgi novērtēts detaļu salāgojums, atstarpes starp detaļām, kā arī dažādu simetrijas asu un plakņu savstarpējais novietojums. Kopsalikuma rasējumā visas detaļas tiek izvietotas un saliktas tām paredzētajās vietās. Atsevišķi detaļu izmēri tiek piekorigēti, paredzot dažādas detaļu deformācijas, konstrukcijas sametināšanas laikā. Kā arī tiek ievērtētas iespējamās detaļu izmēru izmaiņas pēc virsmu krāsošanas vai aizsargpārklājuma uznešanas.

Tālāk visas uzrasētās detaļas tiek sagrupētas vairākās daļās:

- Standartizētie elementi;
- Lāzerējamās detaļas
- Virpojamās / frēzējamās detaļas.

Atbilstoši detaļu tālākās izgatavošanas prasībām, tiek sagatavoti rasējumu faili atbilstošajos formātos. Piemēram, ar lāzergriešanu paredzēto detaļu izgatavošanai tiek sagatavoti DXF formāta faili atbilstošajos skatos. Faila nosaukums tiek atbilstoši marķēts. Pēc

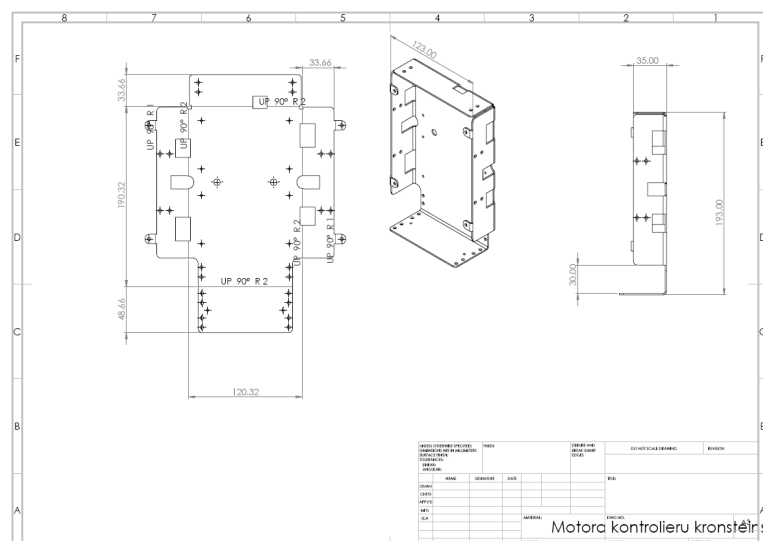
faila nosaukuma iespējams noteikt kas tā ir par detaļu, no kāda materiāla tā jāizgatavo, cik biežam jābūt materiālam, kā arī kāds ir izgatavojamo detaļu skaits. Ja pēc lāzergriešanas detaļu paredzēts vēl locīt, tad papildus DXF formāta failam, katrai detaļai vēl izstrādā rasējumu, kurā norādīta galvenā informācija, kas attiecas uz detaļu locīšanu. Parasti šādu informāciju detaļu izgatavotājam iesniedz PDF formāta failos. Savukārt, detaļām, kuras tiek izgatavotas virpošanas vai frēzēšanas ceļā, tiek izstrādāts atbilstoša detalizējuma rasējums vairākos skatos, lai pēc tā būtu iespējams konkrēto detaļu izgatavot. Atsevišķu detaļu rasējumu vai specifisko formātu failu attēli parādīti sekojošos attēlos:



16. att. DXF formāta faila paraugs, pēc kā tiek izgatavotas detaļas ar lāzergriešanas paņēmieni.

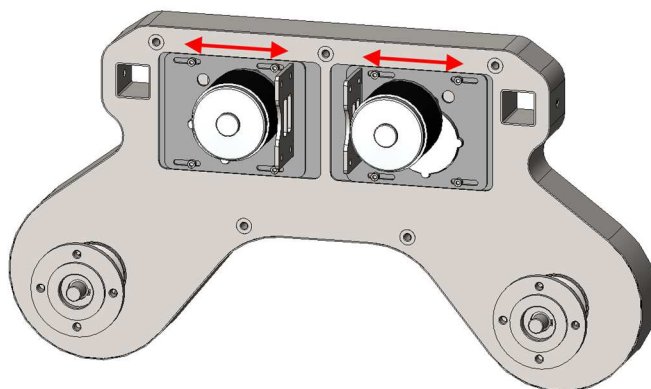
Konkrētā detaļa ir sānu bloka iekšējā mala. Pēc šī faila saturošās informācijas ir iespējams noteikt nepieciešamās griezuma līnijas, savukārt informācija par materiāla marķu un biežumu tiek iekļauta nosaukumā, piemēram – “Sans_ieksejais_S355_4 mm_2gab”.

Locīšanai paredzēto detaļu izgatavošanai papildus tiek sagatavots rasējums ar locīšanas līnijām.



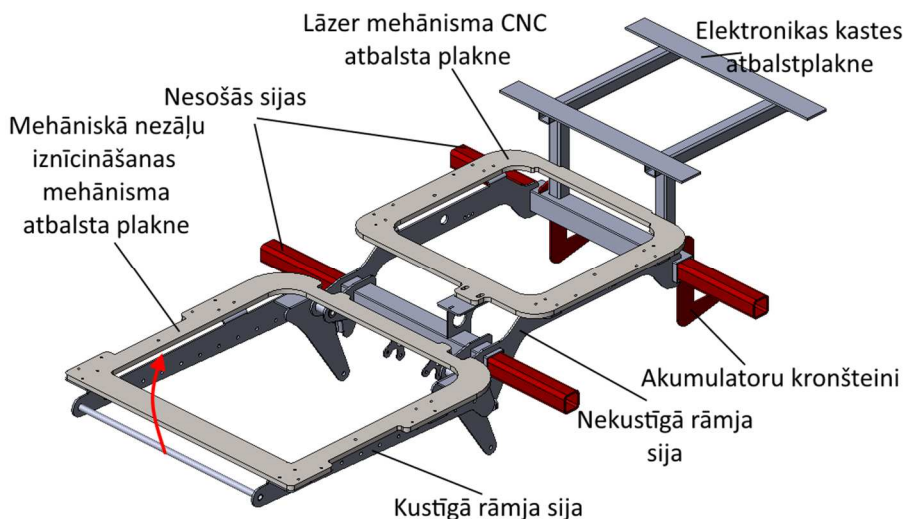
17. att. Rasējuma faili detaļām, kuras paredzēts locīt.

Apskatot sānu bloku konstrukciju, redzami vēl vairāki būtiski konstruktīvi uzlabojumi, salīdzinot ar iepriekšējās versijas platformas konstrukciju. Tā, piemēram, izveidots daudz praktiskāks un vienkāršāks dzenošo ķēžu spriegošanas mehānisms. Ķēžu spriegošana tiek organizēta pārvietojot elektromotorus kopā ar to stiprināšanas kronšteiniem pa speciālām vadvirsmām. Šāds tehniskais risinājums nodrošina daudz vienkāršāku piekļūšanu pie spriegošanas elementiem. Spriegošanu iespējams realizēt no ārpuses, līdz ar to nav pat jānoskrūvē nekādi vāki. Tāpat šāds spriegošanas paņēmieni ļauj vienlīdz labi platformu ekspluatēt abos braukšanas virzienos.



18. att. Ķēžu spriegošanas paņēmieni

Sānu bloki nostiprināti uz divām kvadrātcaurules profila biezsienas sijām. Šīs sijas tiek izmantotas arī visu pārējo elementu stiprināšanai. Tā, piemēram, uz sijām tiek nostiprināts centrālais CNC mehānismu atbalsta rāmis (skatīt attēlā).



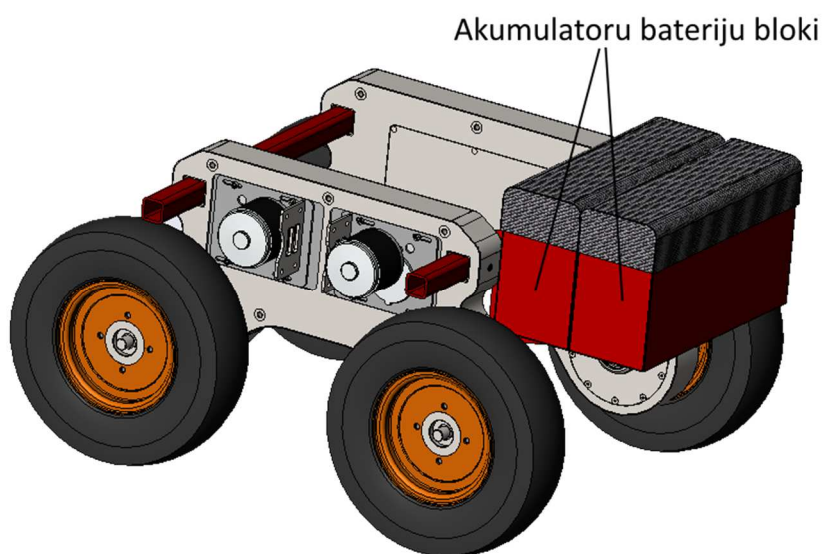
19. att. CNC mehānismu atbalsta rāmis

CNC Mehānismu atbalsta rāmis izveidots divdaļīgs. Viena daļa ir nosacīti nekustīga. Tā tiek nostiprināta uz atbalsta sijām. Uz nekustīgās rāmja daļas izveidota lāzera mehānisma CNC atbalsta plakne, kas izgatavota no 10 mm biezas tērauda loksnes. Uz šīs atbalsta plaknes tiek stiprināts CNC mehānisms, kas nodrošina nezāļu iznīcināšanas lāzera kustību trijās plaknēs. Atbalsta plakne nodrošina stabilu pamatni, pie kā pieskrūvēt CNC mehānismu.

Atbalsta rāmja otra daļa izveidota kustīga, jeb sagāžama uz augšu. Uz šīs rāmja daļas pieskrūvēta mehāniskā nezāļu iznīcināšanas CNC mehānisma atbalsta plakne. Rāmja priekšējā daļa izveidota sagāžama uz augšu tā iemesla dēļ, lai iekārtas transportēšanas laikā iespējams iegūt kompaktākus platformas izmērus.

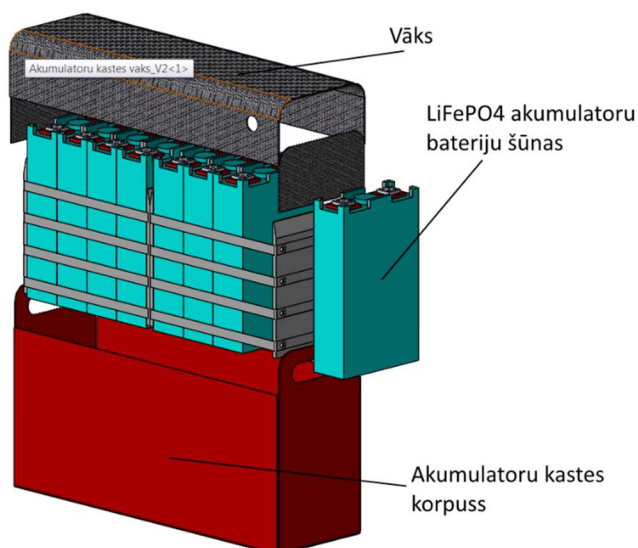
Tāpat pie nekustīgā rāmja piestiprināts arī rāmis akumulatoru bateriju, kā arī elektroniskās vadības elementu kastes nostiprināšanai. Nezāļu iznīcināšanas robota platformai ir uzstādīti divi atsevišķi akumulatoru bloki. Abi bloki novietoti viens pie otra un robota platformas vienā pusē. Katrā akumulatoru baterijas blokā ir ievietotas virknē slēgtas astoņas akumulatoru šūnas jeb divi komplekti pa 4 šūnām. Katra komplekta nominālais spriegums 12 V un ietilpība 100 Ah. Tā kā šūnas saslēgtas virknē, tad kopējais katra akumulatora bloka nominālais spriegums ir 24 V un ietilpība 100 Ah.

Abi akumulatoru bateriju bloki novietoti platformas vienā pusē. Šāds izvietojums izvēlēts tādēļ, lai līdzsvarotu slodzi uz platformas riteņiem, jo platformas otrā pusē novietots CNC mehānisms ar mehānisko nezāļu iznīcinātāju. Katrs akumulatoru bloks darbinā savā sistēmu, tā, piemēram, viens akumulatoru bloks paredzēts platformas piedziņas mehānisma darbināšanai, t.i. elektromotoru, motoru draiveru un centrālā vadības bloka darbināšanai. Savukārt otrs akumulatoru bloks nodrošina elektroapgādi CNC mehānismiem, to draiveriem, lāzera nezāļu iznīcināšanas iekārtas darbībai, kā arī kultūraugu atpazīnēja vadības elementu darbībai.



20. att. Akumulatoru bateriju bloku novietojums uz robota platformas.

Katrs akumulatoru bloks ir atsevišķi noņemams, kā arī to var atsevišķi atvienot no elektroķēdes. Arī akumulatoru uzlāde notiek atsevišķi pa akumulatoru blokiem, lietojot ārēji pieslēdzamu 24 V līdzstrāvas impulsu lādētāju.



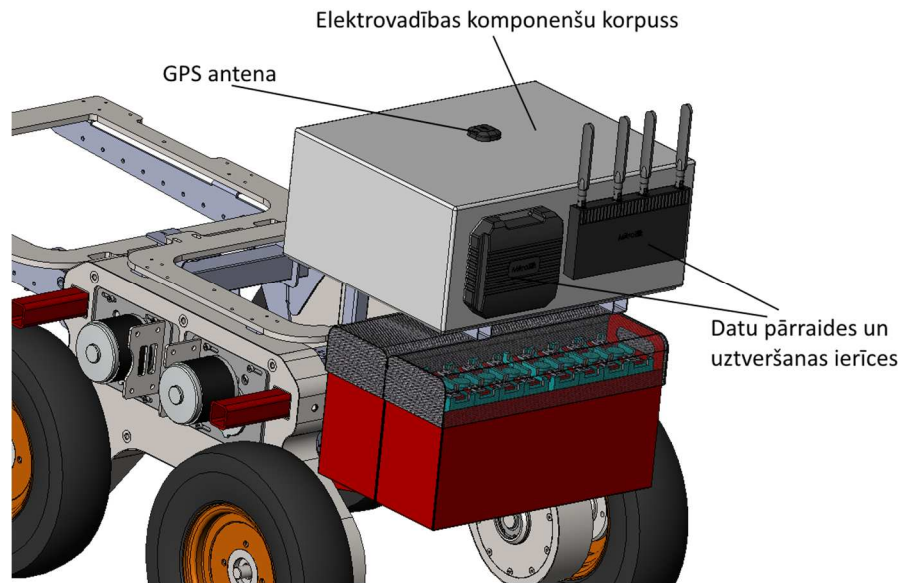
21. att. Akumulatora bateriju bloka sastāvdaļas

Akumulatoru bateriju lādētājs parādīts sekojošā attēlā. Lādētājs ir pieslēdzams 220 V tīklam un atsevišķi katram akumulatoru baterijas blokam.



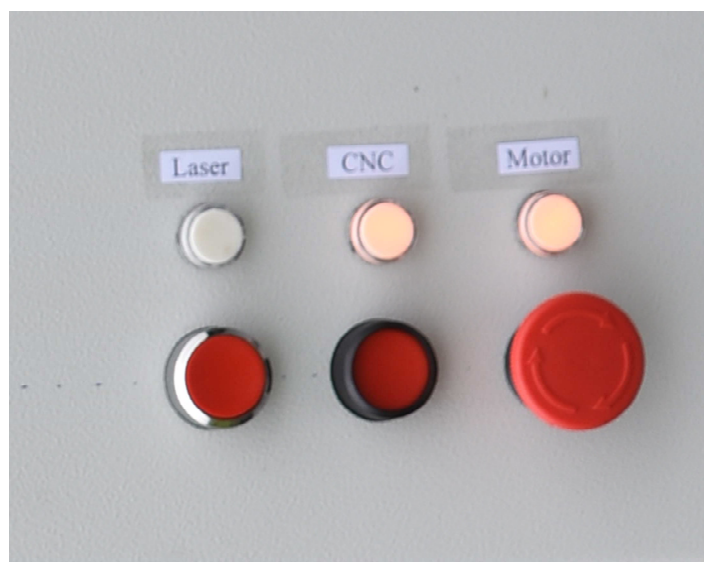
22. Att. Akumulatoru bateriju lādētājs POW 24V 20A -D1

Pēc tehniskās specifikācijas šis lādētājs paredzēts konkrētā akumulatora veida lādēšanai un lādēšanas spriegums atbilst akumulatoru bloka nominālajam spriegumam. Akumulatora lādētājs nav piestiprināts robota platformai, bet gan tas atrodas robota platformas paredzētajā lādēšanas vietā. Tādā veidā nav nepieciešamība visu darba laiku vadāt līdz lielu smagumu, kuru faktiski izmanto tikai lādēšanas laikā.



23. Att. Elektro vadības komponentu kaste

Virs akumulatoru bateriju blokiem izveidots rāmis elektro vadības kastes stiprināšanai. Par elektro vadības kasti izmantota standarta elektroinstalācijas kaste. Šajā kastē ievietoti gan sprieguma pārveidotāji, gan CNC mehānismu visu sešu motoru draiveri, gan dators, kas atbild par kultūraugu atpazīšanu un CNC mehānismu vadīšanu, gan arī platformas sānu bloku centrālā vadības plate, kas dod signālus uz motoru draiveriem. Robota platformas ieslēgšanai uz elektro vadības kastes novietotas trīs pogas.



24. att. Robota platformas ieslēgšanas pogas

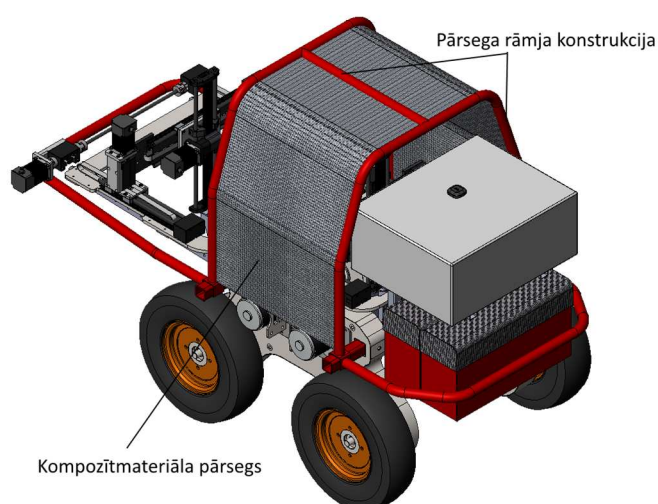
Atsevišķa poga izveidota lāzera nezāļu iznīcināšanas mehānisma elektroapgādei, jeb kā drošības elements, lai iekārtas demonstrēšanas laikā būtu iespēja atslēgt iekārtas lāzeri. Otra poga padod spriegumu uz CNC mehānismiem un to vadības draiveriem. Savukārt, trešā poga, kas izveidota kā drošības poga, paredzēta sprieguma padevei un atslēgšanai no piedziņas elementiem – elektromotoriem. Sistēmas kļūmes vai nesankcionētu darbību gadījumā,

iespējams nospiegt šo pogu un iekārta automātiski apstājās. Prasība pēc šāda drošības elementa ir jebkuram autonomam pašgājēj mehānismam.

Pie elektrovadības kastes (no ārpusē) piemontēti arī rūteri un viena no GPS antenām. Elementu pievienošana kastes ārpusē vairāk saistīts ar pārraidīto signālu labāku uztveršanu un pārraidi.

Bez GPS antenas, kas uzmontēta uz elektrovadības kastes, robota platformai uzstādīta vēl viena GPS antena. Divu antenu novietojums uz platformas, ļauj precīzāk pozicionēt platformu dabā.

Iekārtas projektēšanas noslēgumā, tika izstrādāts pārsegs, kas paredzēts iekārtas darbīgo daļu aizsargāšanai no nelabvēlīgiem apkārtējās vides faktoriem.

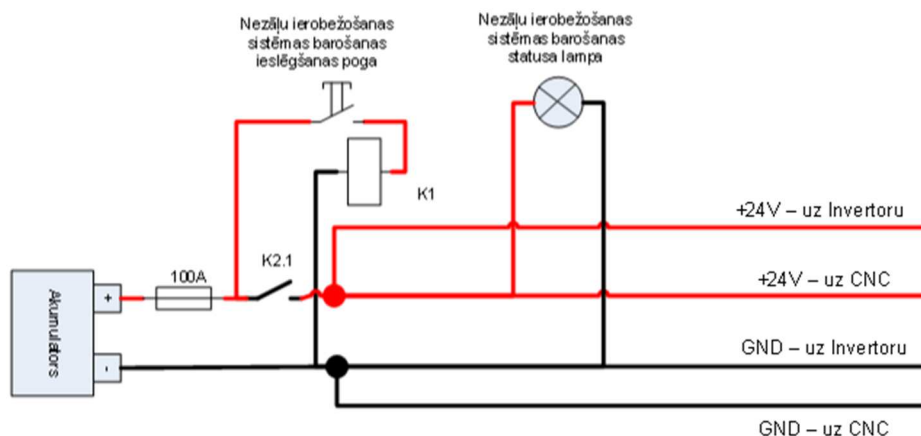


25. att. Iekārtas kopskats ar pārsega elementiem.

Iekārtas pārsegu veido noņemama metāla rāmja konstrukcija, pie kā vidusdaļā pieskrūvēts atbilstošas formas kompozītmateriāla pārsegs. Robota platformas priekšējā un aizmugurējā daļa paredzēta pārsegt ar elastīgu pārsegu, lai to varētu ērti salocīt brīžos, kad jātiek pie vadības elementiem vai izpildmehānismiem.

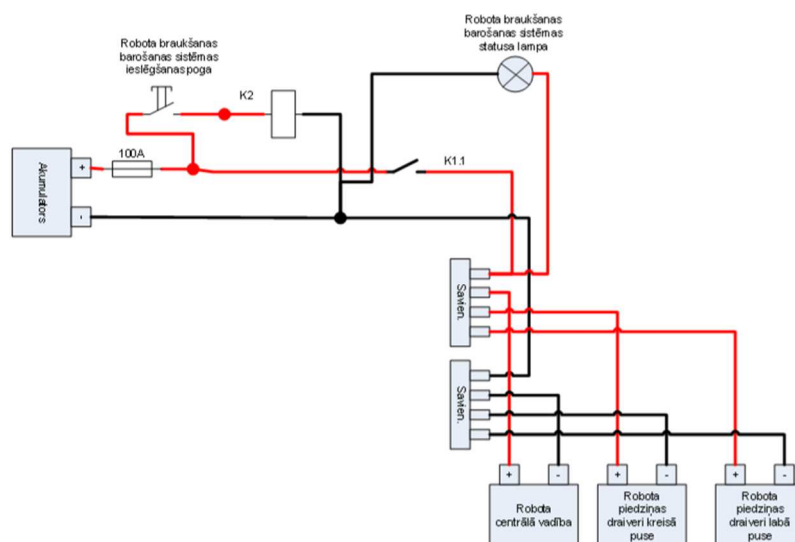
Robota platformas elektrobarošanas sistēma

Robota elementu enerģijas avots ir akumulatori. Robotā tiek izmantota industrijā plaši izmantota nomināli 24V DC zemsprieguma barošanas sistēma. Uz robota izveidotas divu veidu atdalītās barošanas sistēmas ar ķīmiskajiem akumulatoriem LiFePO₄. Viens no akumulatoru blokiem atbild par CNC vadību un augstā līmeņa vadības sistēmas enerģijas apgādi skatīt zemāk atrodamajā shēmā 26. attēlā.



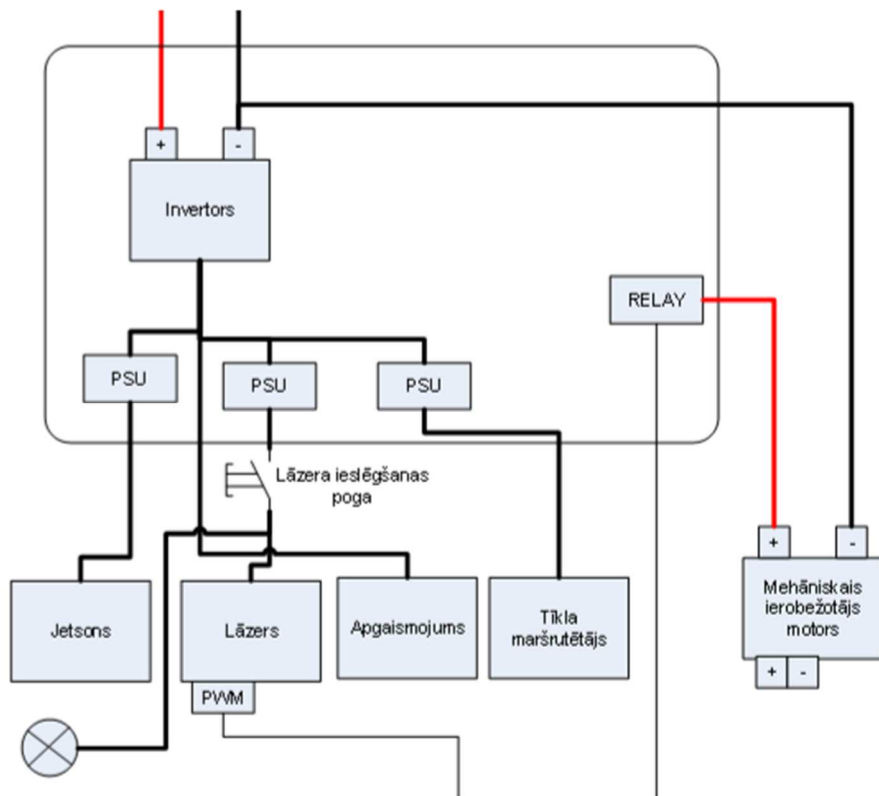
26. attēls Augsta līmeņa vadības enerģijas apgādes shēma

Enerģijas apgādes slēgumā iekļauta strāvas aizsardzība ar 100A drošinātāju. Papildus ar fiksējošo ieslēgšanas/izslēgšanas pogu vadot releju, ir iespēja atvienot elektrisko ķēdi, vadības elementiem. Kontrolei vai elektrobarošana ir ieslēgta vai izslēgta pievienota statusa lampa. Ritošās daļas nodrošināšanai ar elektroapgādi izmatots otrs akumulatoru bloks skatīt zemāk atrodamo shēmu 27.attēls.



27. attēls Ritošās daļas elektroapgādes shēma.

Lai nesabojātu akumulatorus, strāvas ķēdē ieslēgts 100A drošinātājs. Enerģijas pieslēgšanai un atslēgšanai no ritošās daļas elementiem un akumulatoru blokiem, tiek izmantots relejs. Ritošās daļas elementos iekļaujas robota divu pušu motoru bloku motori un robota centrālais vadības bloks. Austa līmeņa vadības elementos tiek iekļauts invertors, dators, lāzers, apgaismojums, tīkla maršrutizētāji un mehāniskais nezāļu ierobežotājs. Šo elementu slēguma shēmu var aplūkot zemāk redzamajā 28. attēlā.



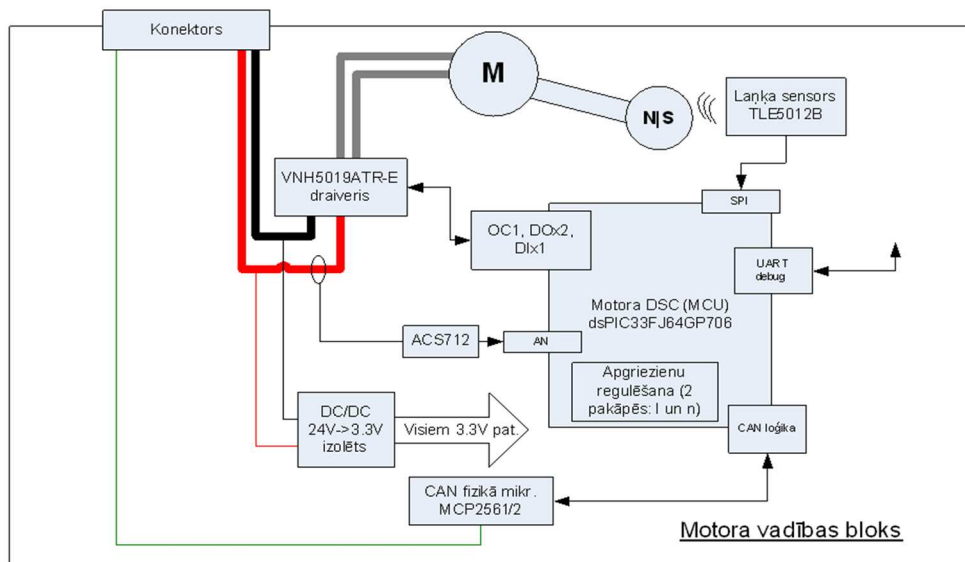
28. attēls Augsta līmeņa vadības elementu slēguma shēma

Robotizētās platformas piedziņas motoru vadība

LLU Tehniskās fakultātes rīcībā esošā lauksaimniecības robotizētā platforma piedziņai izmanto suku līdzstrāvas motorus ar atvērta ķēdes impulsa platuma modulācijas vadību un bija oriģināli paredzēta vadībai tikai ar operatora pulti. Operators var vizuāli novērtēt robota gaitu un saķeres zušanas gadījumā uz vienas puses riteņiem iespējams manuāli pieregulēt padoto jaudu.

Projekta ietvaros ir nepieciešama precīzāka automātiska vadība, kas nodrošina riteņu rotāciju ar uzdoto ātrumu, kad augstāka līmeņa vadība, kas pieņem lēmumus par robota kustības traektoriju vagā vai starp darba/stāvvietas objektiem un var paļauties, ka kustība būs tāda, kāda ir uzdota piedziņas motoru vadības kontrolleriem. Lai to nodrošinātu, motoru vadības kontrolleri tika papildināti ar divām atgriezeniskām saitēm: strāvas sensoru un apgriezīgu sensoru no riteņa. Strāvas sensors ir bezkontakta Holla tipa (mikroshēma ACHS-7123-000E) un magnetorezistīvais sensors (mikroshēma TLE5012B), kurš nosaka uz motora ass nostiprinātā magnēta leņķi, mēra leņķisko ātrumu un dod iespēju noteikt pašreizējos riteņa apgriezienus.

Programmā tika izveidoti abu sensoru interfeisi (analogciparu pārveidotājs strāvas sensora sprieguma izejai) un SPI interfeiss magnetorezistīvajam ass leņķa sensoram, kā arī pievienotas klāt PID vadības cilpas. Motora vadības bloka konceptuālā shēma dota 29. att.



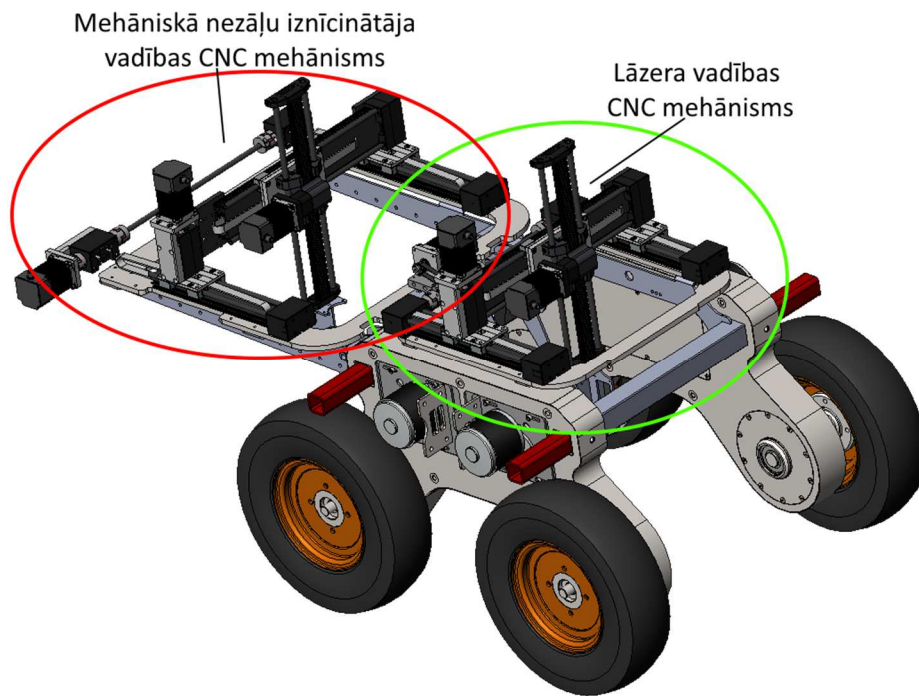
29. att. Motora vadības bloka konceptuālā shēma

1.3. Nezāļu ierobežošanas mehāniskais un lāzera agregāts

Nākamā svarīgā komponente, kas projektēta un uzstādīta uz robota platformas ir nezāļu ierobežošanas jeb iznīcināšanas izpildelementu vadības mehānismi. Nezāļu ierobežošanas mehāniskā agregāta un lāzera pozicionēšanai tika izvērtēti dažādi manipulatori: vairāku brīvības asu robotiskās rokas, *delta* robotiskās rokas, *scara* manipulatori un 3 asu mehānisms ar lineārām sliedēm un katrā kustīgā elementa neatkarīgu piedziņu (CNC). Lai arī citi manipulatori var sasniegt būtiski lielāku ātrumu (piem., *scara* robotiskās rokas), vai spēj veikt sarežģītākas kustības (piem., vairāku brīvības asu robotiskās rokas), CNC mehānisms tika izvēlēts, jo apvieno vairākas būtiskas īpašības:

- pieejama cena;
- putekļu un mitruma drošs;
- vienkārša mērogošana nākamajām robota versijām;
- pietiekoši liels sasniedzamais laukums.

Tā kā robota platformai projektā tika izvirzīta prasība nodrošināt nezāļu iznīcināšanu gan ar lāzeru, gan mehānisku izpildmehānismu, tad arī uz platformas tika ieprojektēti un uzstādīti divi neatkarīgi CNC mehānismi (skatīt attēlā).



30. att. CNC mehānismu izvietojs uz platformas.

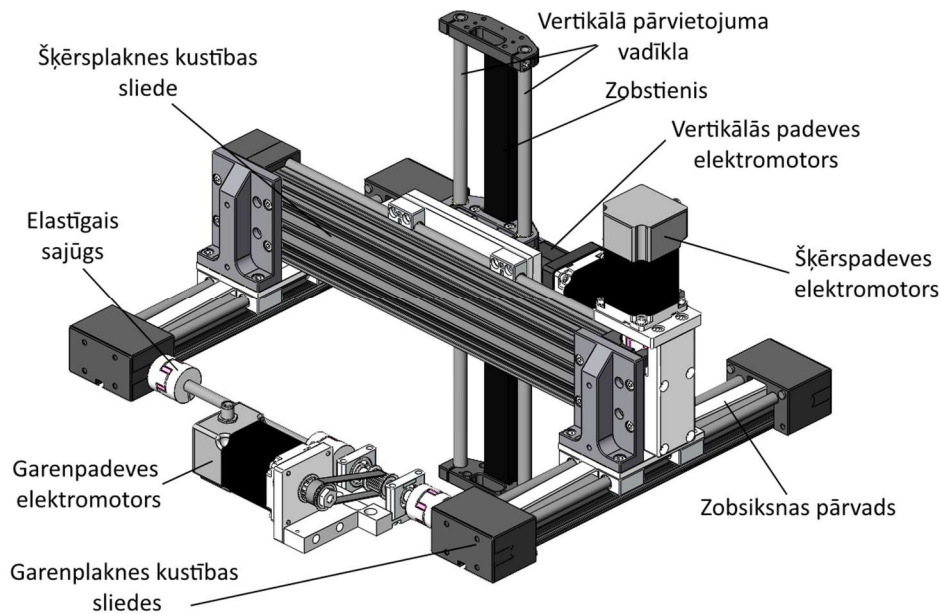
Konkrētās konfigurācijas CNC mehānismu izvēli iespaidoja sekojoši faktori:

- Nepieciešamais darba izpildmehānismu darbības laukums, kas katram nezāļu iznīcināšanas paņēmienam ir nedaudz atšķirīgs. Tā, kā ar lāzera iznīcinātāju paredzēts darboties tuvāk augam, tad šī mehānisma darbības laukums ir salīdzinoši mazāks par mehāniskā nezāļu iznīcinātāja darbības laukumu.
- Ierobežotā vieta starp robota sānu blokiem. Tā kā starpriteņu attālums ir noteikts un tas ir atkarīgs no vāgu platuma, tad arī attālums starp dzenošajiem sānu blokiem ir ierobežots. Izvēloties CNC mehānismus bija nosacījums, ka to ārējiem gabarītiem jāiekļaujas noteiktos izmēros. Īpaši ierobežots laukums bija CNC mehānismam, kurš novietojas starp abiem sānu blokiem
- Potenciālie vāgas un augu augstumi. Arī šis faktors nosaka to cik augstu būs jāuzstāda CNC mehānisms un cik lielam jābūt vertikālās ass pārvietojumam.

Konstruktīvi abi CNC mehānismi nostiprināti uz speciāli izveidotām biežsienu atbalsta plaknēm. Šādas atbalsta plaknes izveidotas, lai platformas pārvietošanās laikā pa nelīdzenu virsmu, nenotiktu CNC mehānisma šķiešanās, kas varētu ietekmēt tā funkcionēšanu un arī resursu.

Abi CNC mehānismi precīzi saregulēti un pieskrūvēti pie šīm atbalsta plaknēm, savukārt atbalsta plaknes pieskrūvētas pie speciāli izveidota CNC mehānisma rāmja sijas. Abu CNC mehānismu uzbūve un darbības principi ir līdzīgi, bet neliela atšķirība ir to gabarītmēros un atsevišķu piedziņas motoru novietojumā. Lai iegūtu kompaktāku izmēru, lāzera darbināšanai paredzētā CNC mehānisma viens no soļu motoriem, nostiprināts pa vidu starp garenplaknes kustības sliekšņiem. Garenplaknes kustība abiem CNC mehānismiem tiek nodrošināta ar divusliežu palīdzību katrā platformas pusē, turpretī, šķērsvirziena kustība tiek nodrošināta ar vienas sliekšņa palīdzību. Mehānisms slīdņu pārvietošanai tiek darbināts ar soļu motoriem un

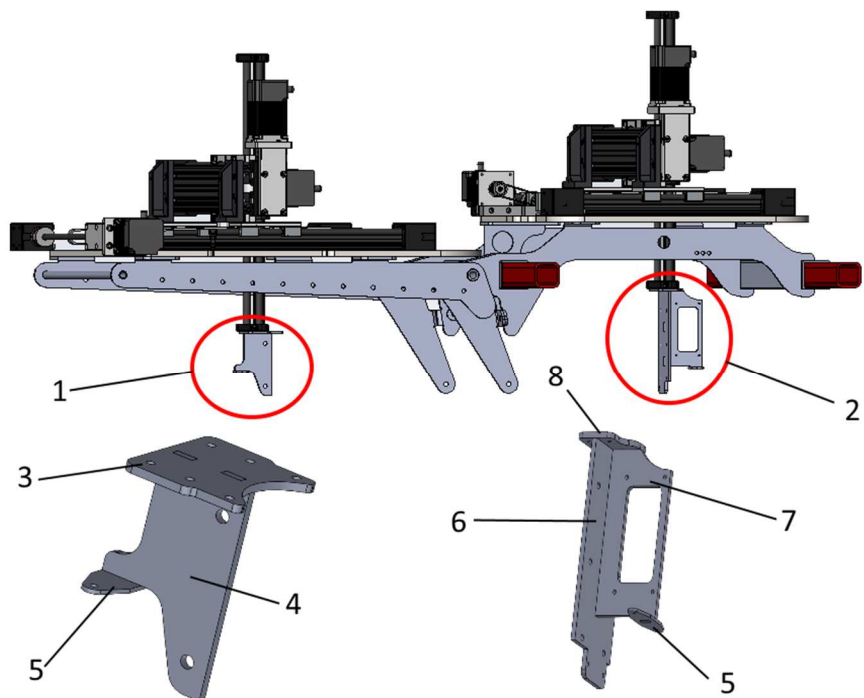
speciālām zobsiksņām. Savukārt vertikālā kustība tiek nodrošināta ar vertikāli izvietotu vadīklu palīdzību un piedziņu no soļu motora, kurš iedarbojas uz speciālu zobstieni.



31. att. CNC mehānisma konstrukcija

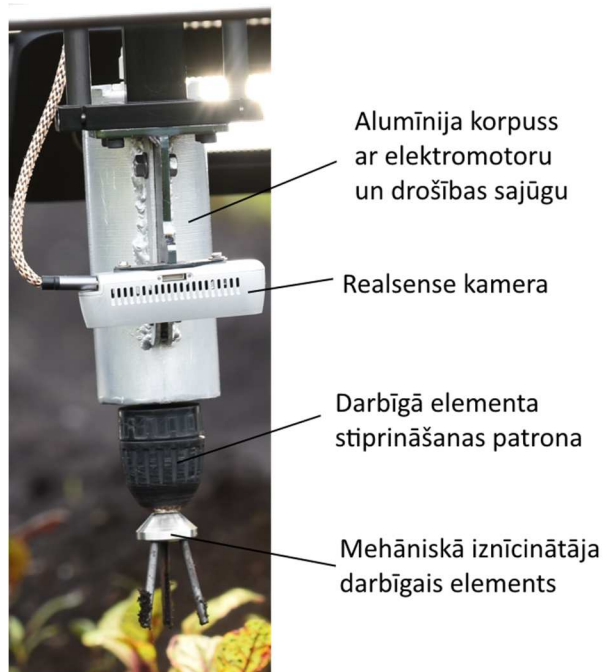
Nozīmīgs parametrs CNC mehānisma elementu izvēlē ir saistīts ar darba izpildmehānismu masu un paredzamajām slodzēm. Konstruktīvajam izveidojumam un soļu motoriem jābūt tādiem, kas ir spējīgi kustināt atbilstošas masas izpildmehānismus, turklāt jāierēķina arī inerces spēki, kas veidojas pārvietoējuma gala stāvokļos.

Pie CNC mehānismu vertikālā pārvietoējuma vadīklu apakšējiem kronšteinu, tiek uzprojektēti un pieskrūvēti nezāļu iznīcināšanas izpildmehānismu stiprināšanas kronšteinu. Katrs izpildmehānisms ir ar pilnīgi atšķirīgu konstrukciju, tāpēc arī stiprināšanas kronšteinu ir atšķirīgi. Sekojošā attēlā parādīts gan mehāniskā nezāļu iznīcinātāja, gan arī lāzera mehānisma stiprināšanas kronšteins, turklāt abu kronšteinu konstrukcijas papildinātas ar speciāliem atlokiem Realsense kameru stiprināšanai. Šo kameru uzdevums ir nofotografēt apstrādājamo laukumu. Pēc uzņemtā attēla un speciāli izstrādāta algoritma vadības dators atpazīst kultūraugus un dod signālus CNC mehānismu un nezāļu iznīcināšanas mehānismu vadībai.



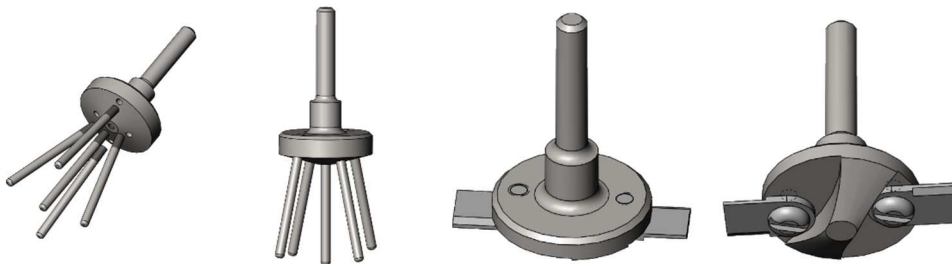
32. att. **Nezāļu iznīcināšanas darba ierīču stiprināšanas kronšteini:** 1. – mehāniskā nezāļu iznīcinātāja stiprināšanas kronšteins; 2 – Lāzermehānisma stiprināšanas kronšteins; 3. un 8. – Atloks stiprināšanai pie CNC mehānisma; 4 – mehāniskā nezāļu iznīcinātāja stiprināšanas atloks; 5. – Realsense kameras stiprināšanas atloks; 6 – Lāzera korpusa stiprināšanas atloks; 7 – Lāzera elektronikas bloka stiprināšanas kronšteins.

Nezāļu ierobežošanas mehāniskā agregāta pamatā ir mehānisks zaru irdinātājs/nogriezējs, kas tiek piedzīts no 12 V elektromotora. Lai iegūtu vajadzīgo griezes momentu, starp elektromotoru un darbīgo elementu ir uzstādīts kompakts reduktors, kurš samazina izejošās vārpstas apgriezienus, bet palielina griezes momentu. Darbīgais elements ir maināms un tas ir iestiprināms speciālā patronā. Lai netiktu bojāts elektromotors darbīgajam elementam saskaroties ar cietāku augsni vai akmeni, reduktora galā vēl ir uzstādīts drošības sajūgs, kas ļauj izslīdēt darbīgā elementa piedziņas patronai attiecībā pret elektromotora asi.



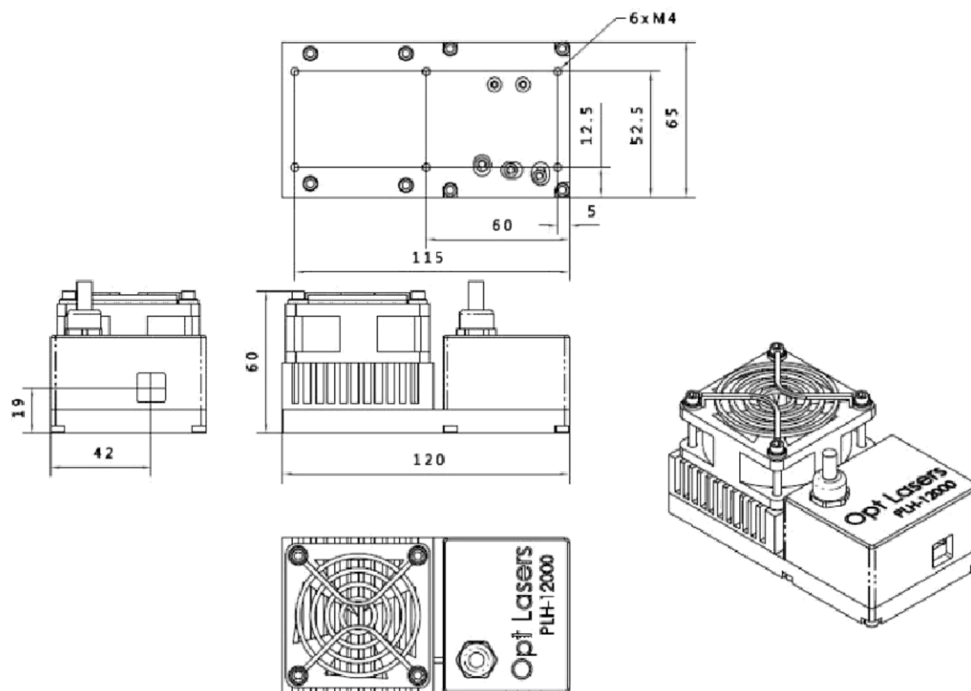
33. att. Mehāniskā nezāļu iznīcinātāja konstrukcija

Projektēšanas gaitā tika apskatīti un izstrādāti vairāki veidi nezāļu iznīcināšanas darbīgajām daļām. Tomēr par efektīvāko nezāļu iznīcināšanas darba elementu pie konkrēti izmantotā elektromotora apgriezieniem tika pieņemts darbīgais elements ar pīķveida zariem.



34. Att. Mehāniskā nezāļu iznīcinātāja darbīgo daļu varianti

Lāzera agregāta pamatā izmantots rūpnieciski ražots un tirgū pieejams OPT LASERS PLH-12000 lāzers, kas pielāgots un nostiprināts pie atbilstoši uzkonstruēta stiprinājuma kronšteina.



35. att. OPT LASERS PLH-12000 445nm lāzers

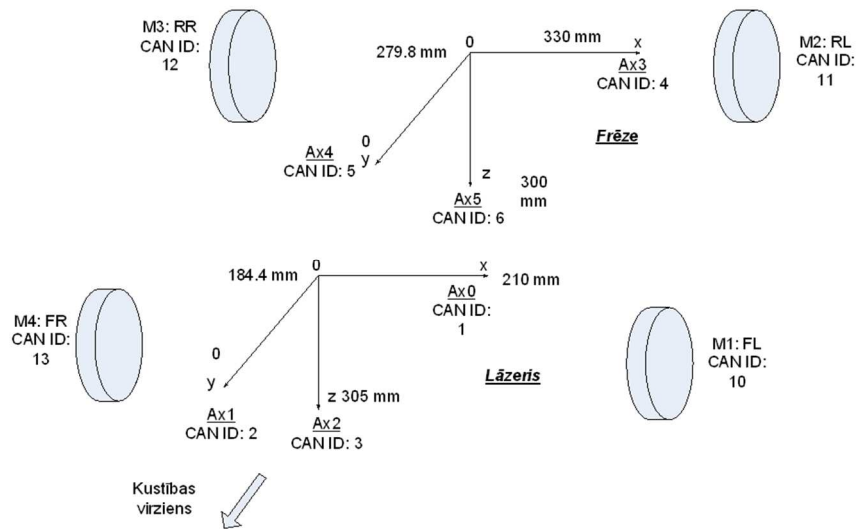
Protams, visu mehānisko komponentu darbība un vadība nav iedomājama bez atbilstošas elektroinstalācijas un vadības programmu izstrādes. Elektroinstalācijas kabeli un signālu vadi rasējumos nav parādīti. To izvietojums un montāžas vietas tiek izvēlēts pēc tam kad visas pamat komponentes ir samontētas.

Bez aukstāk minētajiem platformas elementiem pie platformas rāmja tiek pieskrūvēti arī apgaismes elementi, jeb LED prožektoru, kas apgaismo apstrādājamo laukumu tā fotografēšanas brīdī. Konkrētai platformai izvēlēti 30 W prožektoru. Pie tam apgaismes elementu izvēles īpatnība raksturojas ne tikai ar atbilstošas jaudas apgaismes ierīču izvēli, bet arī noteiktas LED vadības frekvences izvēli. Atšķirīgiem LED prožektoriem ir atšķirīga vadības frekvence, kas var ietekmēt neizgaismotu foto kadru efektu. Šāda parādība tika novērota, kad tika uzstādīti prožektoru ar vadības frekvenci, kas neatbilda robota platformas Realsense kameru darbības frekvencei.

Iekārtas projektēšanas noslēgumā, tika izstrādāts iekārtas karkass, jeb pārklājs, kas paredzēts iekārtas darbīgo daļu aizsargāšanai no nelabvēlīgiem apkārtējās vides faktoriem, kā arī zināmā mērā tas kalpo kā daļējs drošības elements, kas pasargā apkārtējos no varbūtējās lāzera stara atstarošanas pret kādām atstarojošām virsmām.

Lineārās kustības asu motoru (CNC) kontrolleru integrēšana kopējā vadības programmā robota centrālajā platē

LLU Tehniskajā fakultātē esošā robotizētā platforma ir modulāra gan mehāniski, gan no programmatūras viedokļa. Modularitāte tiek nodrošināta ar unificēta CAN (Controller Area Network) tīkla palīdzību, kurš apvieno visu robota moduļu kontrollerus vienotā sistēmā vadībai no centrālās plates. Robota CAN tīklā tika integrētas arī komponentes, kas paredzētas lāzera un mehāniskā ierobežotāja pozicionēšanai: IGUS D1 soļu motoru vadības draiveri. Kopā pozicionēšanai tika izmantotas 6 asis (skat. 36. att.). Attēlā parādītas gan asu draiveru, gan piedziņas motoru CAN adreses.

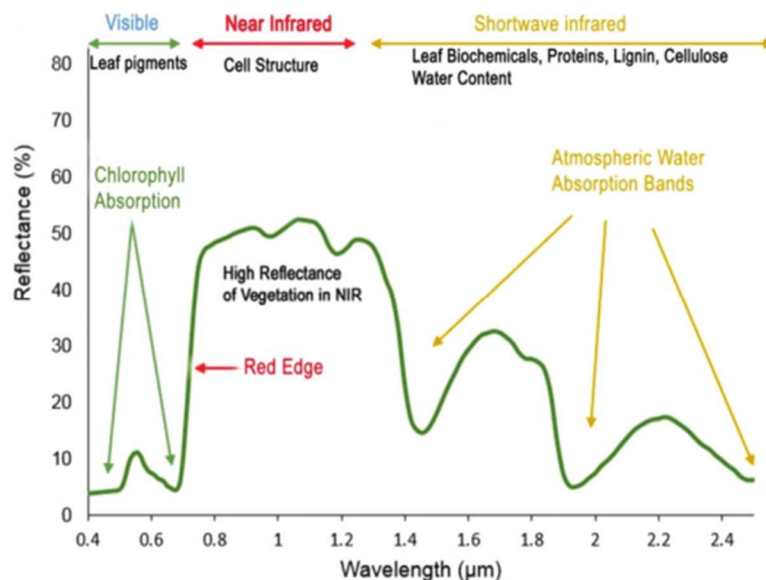


36. att. Robota CAN tīkla struktūra

1.4. Eksperimenti ar lāzera izmantošanu nezāļu ierobežošanai

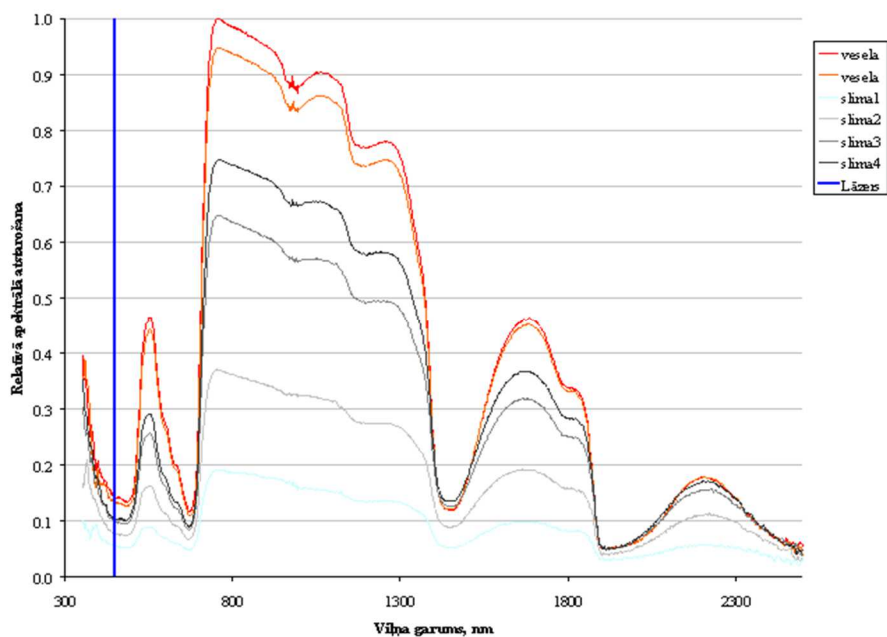
Lai izvēlētos nezāļu apstrādei piemērotākos lāzerus, tika veikta tirgū esošo lāzeru analīze, izvērtējot cenu, jaudu un potenciālo ietekmi uz augu. Augu zaļās daļas labi absorbē tikai atsevišķus elektromagnētiskā starojuma spektra joslas. 37., 38. att. parādītas spektrālās atstarošanas līknes veselām un bojātām augu lapām. Līkņu formu nosaka auga fizioloģija, nepieciešams starojums fotosintēzei hlorofilā, temperatūras regulēšanas nepieciešamība u.c. Ar nelielām atšķirībām šāds elektromagnētiskā starojuma atstarošanas profils ir praktiski visiem zaļajiem augiem. Tā kā lāzeri parasti darbojas šaurā spektra joslā (ar dažu nanometru izkliedi), tad ir nepieciešams izvēlēties tādu viļņa garumu, pie kura auga atstarošana ir pēc iespējas mazāka. Piemēram, zilajā, ultravioletajā vai īsviļņu līdz tālajā infrasarkanajā spektrā.

Pēc vispusīgas izpētes noskaidrots, ka no tirgū pieejamajiem risinājumiem tehniski un ekonomiski izdevīgākais ir pusvadītāju lāzers ar 445 nm viļņa garumu. Izvēli pamato starojuma labā absorbcija zaļajās augu daļās, kompaktie izmēri un masa attiecībā pret optiskā starojuma jaudu, viegla vadība, salīdzinoši augsta efektivitāte, lāzera sistēmas noturība pret vibrācijām un temperatūras izmaiņām un iespēja integrēt iekārtā, kurai jādarbojas lauka apstākļos.



37. att. Veģetācijas spektrālās atstarošanas līkne (Roman, Anamaria & Ursu, Tudor, 2016¹)

¹ Roman, Anamaria & Ursu, Tudor. (2016). Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks.



38. att. Relatīvās spektrālās atstarošanas līknes veselām un slimām augu lapām, uzņemtas LLU ar spektrometru “Spectral evolution RS3500”. Ar zilu līniju parādīts izvēlētā pusvadītāju lāzera viļņa garums – 445 nm

Lai pārlicinātos par dažādu tehnoloģiju (pusvadītāju, šķiedras, CO₂) ģenerētā lāzera stara ietekmi uz augu zaļajām daļām reālos apstākļos, tika veikti praktiskie eksperimenti ar dažādu tehnoloģiju un viļņa garuma lāzeriem, kuri bija pieejami pētījumu laikā (39.-42. att.).

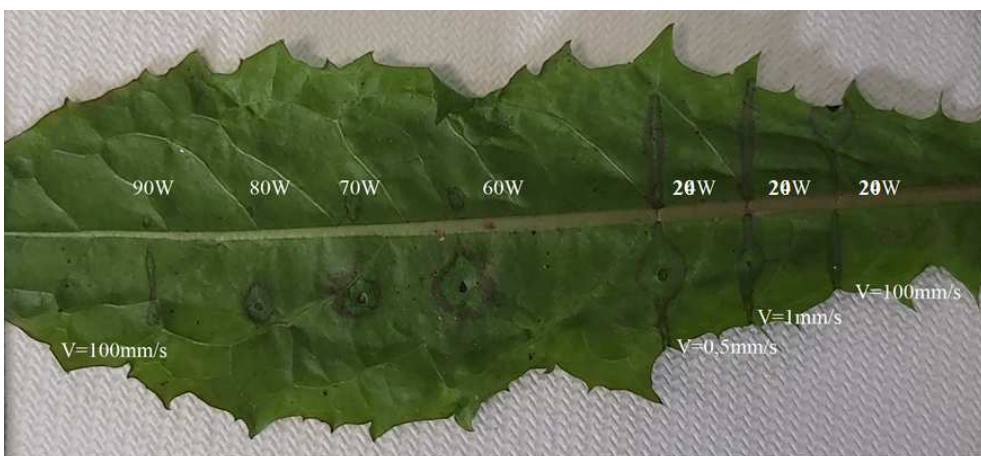
Rezultātā apstiprinājās, ka augu elektromagnētiskā starojuma atstarošanas īpašībām ir būtiska nozīme, piemēram, 1064 nm šķiedras lāzers nespēja atstāt būtisku ietekmi uz zaļas lapas virsmas pat pie vairāku desmitu vatu optiskās jaudas.



39. att. Lapu apstrādes eksperiments ar ražotājs BODOR 150 W CO₂ lāzeri (10600 nm viļņa garums, 20% jauda)



40. att. Lapu apstrādes eksperiments ar CO₂ lāzeri
(10600 nm viļņa garums, dažādas jaudas)



41. att. Lapu apstrādes eksperiments ar šķiedras lāzeri
(1064 nm viļņa garums, dažādas jaudas)



42. att. Lapu apstrādes eksperiments ar 30 W BIMEIGAO CO-A320 lāzergravētāju
(10600 nm viļņa garums, 50...100% jauda)

Balstoties uz eksperimentu rezultātiem tika nolemts robotam izmantot zilās gaismas lāzeru ar viļņu garumu 445-455nm.

Lāzera eksperimentu stends

Lai veiktu eksperimentus ar dažādiem lāzera parametriem – apstrādes ilgums, jauda, apstrādes laiks u.c. tika izveidots lāzera eksperimentu stends, lai kontrolētā un atkārtojamā veidā apstrādātu augus ar lāzera staru.

Par stenda pamatni kalpo 1256x880x22mm saplāksnis uz četriem pa Z asi savstarpēji neatkarīgiem riteņiem. LLU TF rīcībā esošais industriālais manipulators “UR10 Robot”² projekta laikā tika izmantots, lai imitētu robotizētās nezāļu ierobežošanas iekārtas manipulatoru darbību laboratorijas apstākļos. “UR10 Robot” tika piestiprināts pamatnei tā, lai pamatnes vienā pusē būtu vieta nezāļu stādu kastu novietošanai (skatīt 43. att.)



43. att. Lāzera eksperimentu stends.

Nezāļu ierobežošanas testiem tika izvēlēts PLH-12000 lāzera modulis³. Tas ir 445nm zilās gaismas pusvadītāja diodes lāzers ar 12W optisko jaudu. Detalizēts parametru apraksts atrodams 1. tabulā.

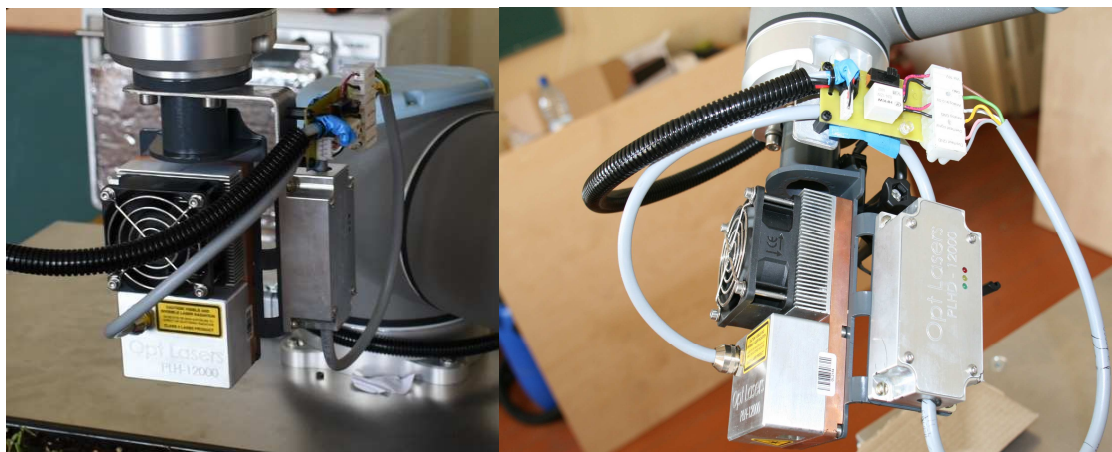
² <https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot/>

³ <https://optlasers.com/cnc-3d-lasers/plh-12000-engraving-laser-head>

PLH-12000 lāzera moduļa tehniskie parametri

Pusvadītāja diodes viļņa garums	445 nm
Lāzera moduļa masa	1,31 kg
Fokusēta punkta dimensijas 50mm attālumā no lāzera moduļa	0,15 x 0,4 mm
Lāzera moduļa vadības signāla sprieguma diapazons	0...5 V
Optiskais fokusa attālums	50 mm
Lāzera moduļa vadības modulācijas frekvence	100 kHz
Lāzera moduļa vadības modulācijas veids	analogi vai TTL
Optiskā jauda (pie darba vides temperatūras 20 °C)	12 W

Tika izgatavots speciāls kronšteins lāzera moduļa piestiprināšanai pie “UR10 Robots” manipulatora galvas (skatīt 44. att.).



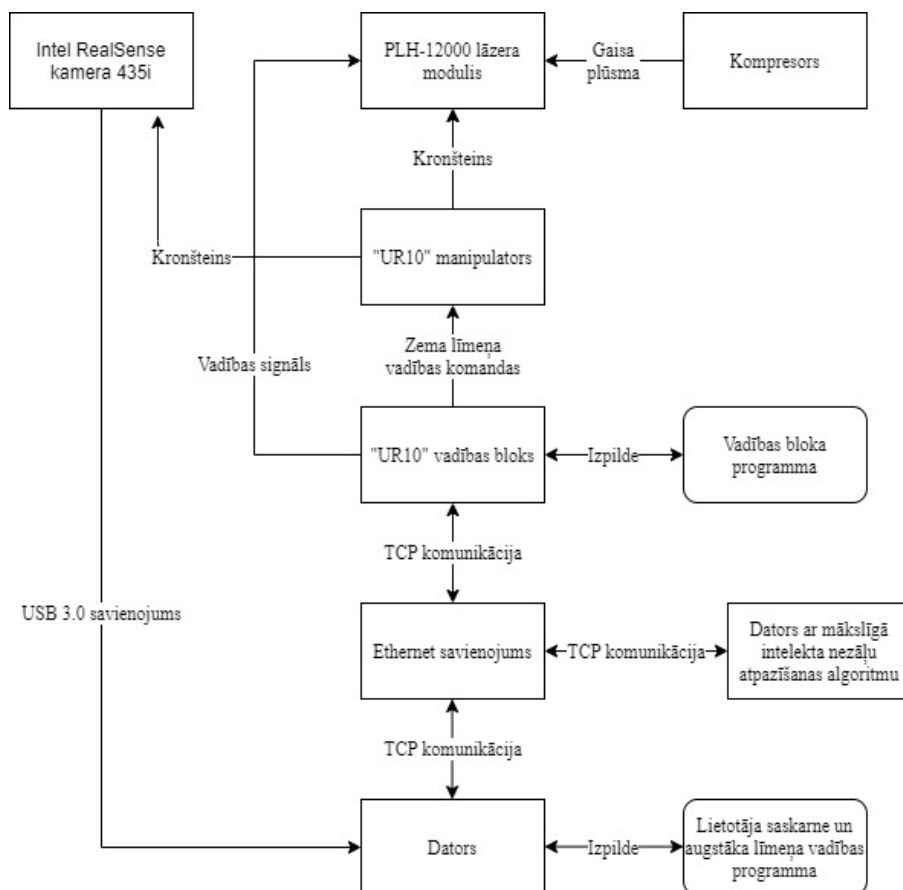
44. att. PLH-12000 lāzera modulis ar izstrādāto kronšteinu piestiprināts pie “UR10 Robot” manipulatora galvas.

Lāzera moduļa optisko elementu aizsardzībai no degšanas produktu nelabvēlīgās iedarbības tika izstrādāts gaisa sprausla, kura piestiprināta aiz lāzera moduļa stikla lodziņa. Sprauslai caur sānu pievadu pa lokanajiem pneimatiskām sistēmām paredzētiem gaisa vadiem tika pievadīts gaiss no kompresora, lai radītu gaisa plūsmu vērstu lāzera stara ass virzienā uz leju. Gaiss neļauj tvaikiem, dūmiem un citām nezāļu termiskās apstrādes procesā izveidotām daļiņām nokļūt uz lāzera moduļa stikla lodziņa. Ja uz stikla lodziņa nokļūst kāds svešķermenis, tad tas neizbēgami ar lāzera staru tiek sakarsēts, kā rezultātā sakarst arī pats stikls un rezultātā pārplīst, un iekārta kļūst nelietojama.

Projekta ietvaros tika veikti testi arī citiem lāzeriem. Kā perspektīvs variants lāzera jaudas blīvuma un cenas attiecībā tika izvēlēts PLH3D-6W-uSpot lāzera modulis. Šim lāzers

var sasniegt ļoti augstu jaudas blīvumu - 680 kW/cm^2 , bet tajā pat laikā lāzera punkta izmērs arī ir ļoti mazs.

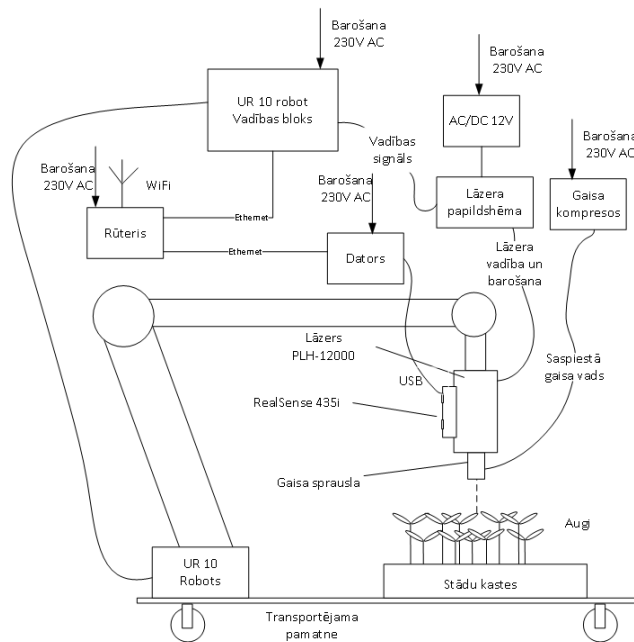
Manipulatoram ir savs centrālais vadības modulis, kurš izpilda zemā līmeņa komandas un nodrošina precīzu manipulatora pārvietošanos telpiskajās koordinātēs. Lai realizētu nezāļu ierobežošanas eksperimentiem nepieciešamās lāzera moduļa izejas stara kustības pa nezāļu lapas virsmām, tika izstrādāta augstāka līmeņa vadības programma ar lietotāja saskarni. Kopējā sistēmas uzbūve ir atspoguļota 45. attēlā.



45. att. Nezāļu ierobežošanas lāzera eksperimentu stenda uzbūves blokshēma

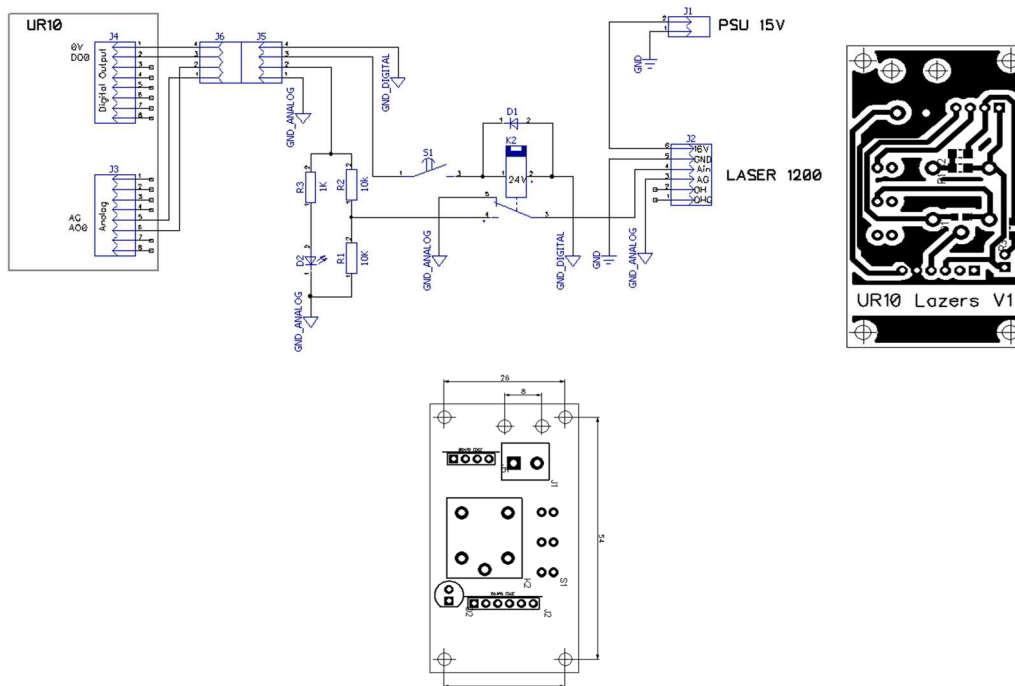
Manipulatora centrālais vadības bloks

Tika izstrādāta centrālā vadības bloka programmas, kuras galvenais uzdevums ir nodrošināt koordinētu manipulatora kustību un lāzera moduļa kontroli. Lāzera moduļa un vadības bloka slēguma shēma ir redzama 46. attēlā.



46. att. Robota rokas lāzera moduļa un vadības bloka slēguma shēma

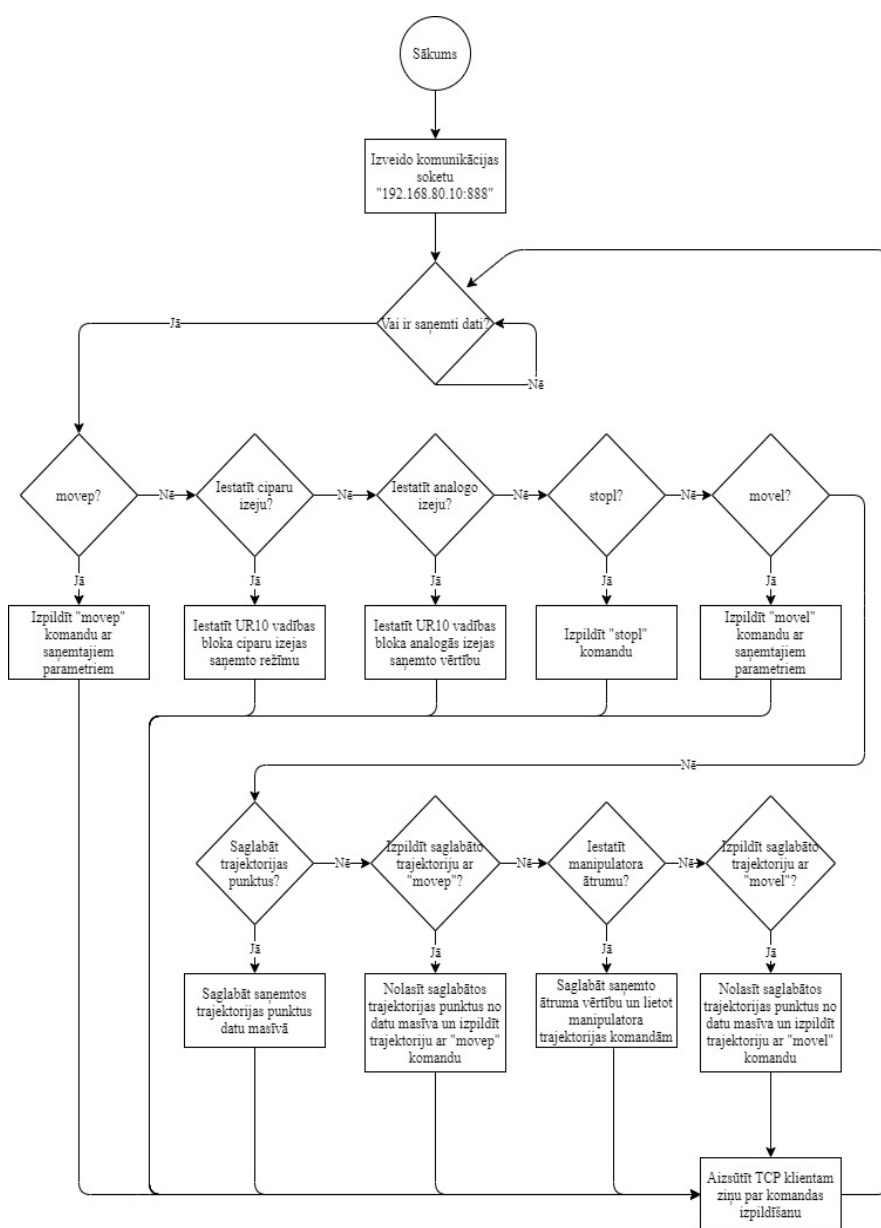
Centrālais “UR 10 robot” vadības bloks autonomi pēc ieprogrammētās programmas gaida komandas no vadības algoritma caur Ethernet (TCP). Šīs komandas satur robota nākamās koordinātas un lāzera ieslēgšanās stāvokli. Lāzera vadībai tiek izmantots robota vadības bloka industriālie signāli. Viens no digitālajiem signāliem tiek lietots lāzera ieslēgšanas atļaujai. Otrs ir lāzera jaudas regulēšanas signāls. Robota vadības bloka signāla līmeņi ir standartizēti industrijā, bet lāzera ieejas signāli tam neatbilst. Lai risinātu šo situāciju, tika izveidota lāzera papildshēma, kura nodrošina salāgošanas iespēju un papildus tiek realizēta lāzera neieslēgšanas drošības slēgums. Shēma attēlota zemāk redzamajā 47. attēlā.



47. att. Lāzera papildshēma salāgošanai ar UR10 vadības bloku

Shēmā relejs paredzēts, lai izvairītos no nejaušas lāzera ieslēgšanās. No lāzera vadības signāls noklusēti ir uz releja normāli saslēgtajiem kontaktiem, kur ir sazemējums. No UR 10 vadības bloka tiek padots atļaujošais signāls uz K2 releju, kas liek relejam pārslēgties uz vadības analogo signālu. Lai izslēgtu nejaušu ieslēgšanos no UR10 robota puses, tad testu laikā izmanto fizisku releja spoles ķēdē ieslēgtu slēdzi S1. Ja slēdža kontakti nav savienoti, tad relejs nevar ieslēgties un padot uz lāzeri vadības signālu. Shēmā ir iestrādāts līmeņa pārveidotājs, kas nodrošina sprieguma dalījumu no UR 10 robota vadības bloka kas ir 0-10V DC uz lāzera ieejā pieļaujamo spriegumu 0-5V DC.

Vadības bloks tika nokonfigurēts tā, lai pēc vadības bloka ieslēgšanas tā operētājsistēma automātiski palaistu izstrādāto programmu. Programma mēģina pieslēgties augsta līmeņa vadības datorprogrammai un pēc veiksmīgas pieslēgšanās pāriet klausīšanās režīmā, lai uztvertu komandas. Manipulatora centrālās vadības bloka programmas darbības algoritms ir redzams 48. attēlā. Programmas kods ir atrodams 3. pielikumā.



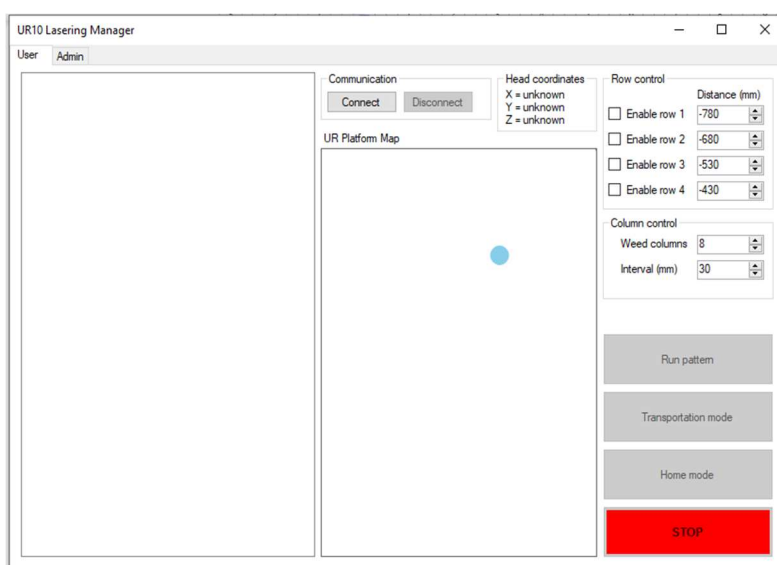
48. att. Manipulatora centrālā vadības bloka programmas blokshēma

Datorprogramma ar lietotāja saskarni

Augstāka līmeņa vadības datorprogramma ar lietotāja saskarni tika izstrādātā .Net ietvara C# programmēšanas valodā, kā “Windows Forms” lietotne. Programma nodrošina sekojošu funkcionalitāti:

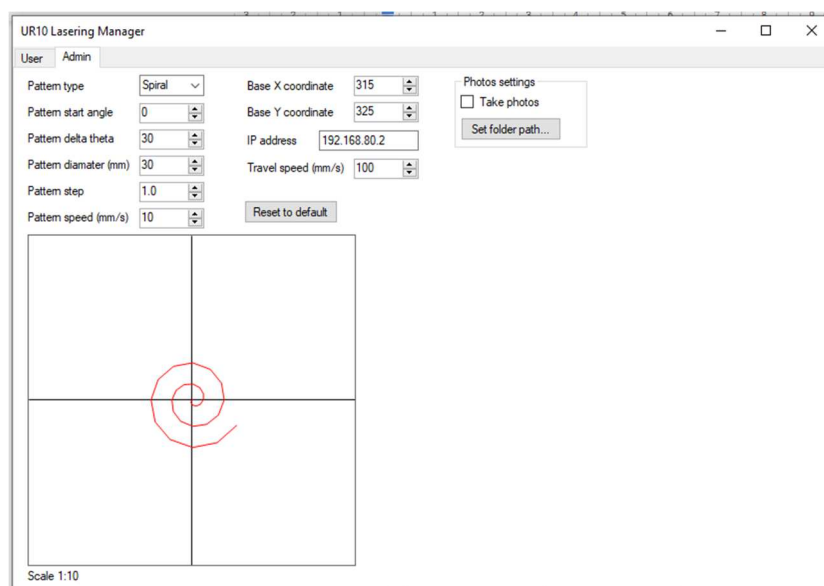
- komunikācija ar manipulatora centrālo vadības bloku,
- manipulatora inicializēšanas komandu nosūtīšana, pēc veiksmīgas TCP komunikācijas uzsākšanas,
- manipulatora galvas telpisko koordinātu nolasīšana un attēlošana grafiskajā saskarnē,
- komunikācija procesa attēlošana informācijas paziņojumu logā,
- manipulatora galvas kustības vizuāla attēlošana skatā no augšas,
- eksperimentu parametru iestatīšana,
- eksperimentu uzsākšana un apturēšana
- manipulatora iestatīšana “Atgriezties mājas” vai “Transportēšanas” režīmā

Lielākā daļa no minētajām funkcijām atrodas datorprogrammas galvenajā saskarnes logā (skatīt 49. att.). Saskarnē var pieslēgties vai atslēgties no manipulatora centrālā vadības bloka, redzēt TCP komunikācijas procesa ziņojumus, redzēt manipulatora galvas telpiskās koordinātas, manipulatora galvas kustības skatā no augšas eksperimenta laikā, iestatīt nezāļu stādu rindu un kolonnu skaitu un intervālus starp rindām, un intervālus starp kolonnām, uzsākt eksperimentu, ieslēgt manipulatora “Transportēšanas” režīmu, ieslēgt manipulatora “Atgriezties mājas” režīmu un veikt sistēmas avārijas apstāšanos. Saskarnes galvenā loga elementu izkārtojuma kods ir atrodams 4. pielikumā, savukārt vadības loģikas kods ir atrodams 5. Pielikumā.



49. att. Eksperimentu stenda datorprogrammas lietotāja saskarnes galvenais logs

Abpusējai TCP komunikācijas nodrošināšanai datorprogramma paralēlā CPU plūsmā iedarbina TCP serveri un gaida, kad manipulatora centrālais vadības bloks pieslēgsies. Pēc veiksmīgas komunikācijas nodibināšanas manipulatora centrālais vadības bloks tiek uzskatīts par TCP klientu, kuram datorprogramma sūta vadības komandas, un no kura saņem atbildes. Datorprogrammas komunikācijas izveidošanas kods ir atrodams 13. pielikumā un TCP kods ir atrodams 6. pielikumā. Pārējā funkcionalitāte (eksperimentu parametru iestatīšana) ir realizēta otrajā datorprogrammas lietotāja saskarnes logā. Lietotājs var izvēlēties: 1) lāzera iedarbības veidu jeb šablonu, 2) šablona parametrus (parametru veids atkarīgs no šablona veida), piemēram, diametru un soli, 3) šablona izpildes ātrumu (lāzera kustības ātrums eksperimenta laikā), 4) lāzera optisko jaudu un manipulatora kustības ātrumu, kad manipulators pārvietojās no “Mājas” pozīcijas uz nezāļu stādu atrašanās vietu un otrādi (skatīt 50. attēlu). Vēl ir iespējams ievadīt manipulatora centrālā vadības moduļa IP adresi un manipulatora bāzes grafiskās koordinātas attēlošanai galvenajā saskarnes logā. Saskarnes eksperimenta konfigurēšanas loga elementu izkārtojuma kods ir atrodams 4. pielikumā, savukārt vadības loģikas kods ir atrodams 5. Pielikumā.



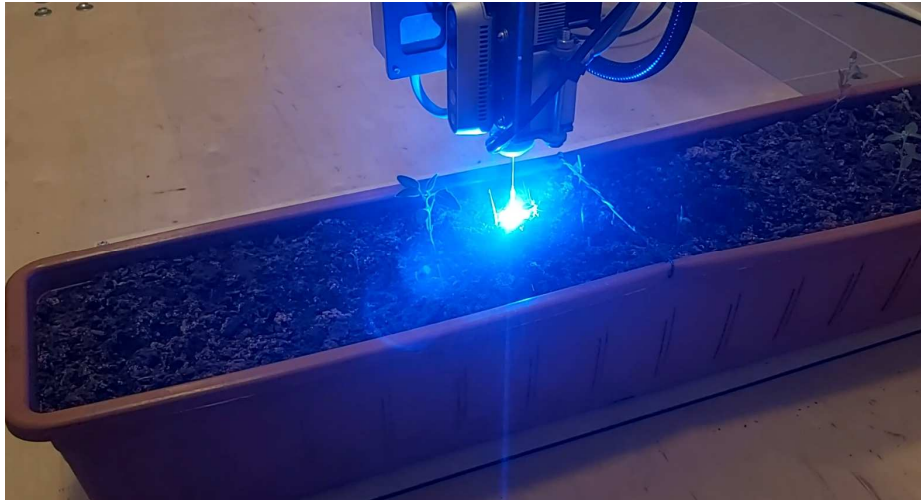
50. attēls. Eksperimentu stenda datorprogrammas lietotāja saskarnes konfigurāciju logs

Balstoties uz zinātniskās literatūras analīzi, tika pieņemts lēmums datorprogrammā realizēt divus lāzera iedarbības šablonus: zig-zag un spirāle. Viena eksperimenta ietvaros var izvēlēties vienu šablonu. Zig-zag šablona koordinātu punktu būvēšanas kods ir atrodams 7. pielikumā, savukārt spirāles šablona koordinātu punktu būvēšanas kods ir atrodams 8. pielikumā. Uzbūvēto šablonu koordinātu punktu izmantošanai datorprogrammā tika izstrādāts šablona pārvaldnieks. Šablona pārvaldnieks nodrošina šablona būvēšanas koda izpildi un iegūto koordinātu punktu nosūtīšanu uz manipulatora centrālo vadības bloku, kas savukārt nodrošina lāzera kustību pa nezāļu virsmu eksperimentu laikā. Šablona pārvaldnieka kods ir atrodams 9. pielikumā.

Lai imitētu procesu no nezāļu atpazīšanas līdz iedarbībai ar lāzeru laboratorijas apstākļos, UR10 manipulatora galā papildus tika piestiprināta Intel RealSense 435i kamera⁴. Datorprogrammā tika izveidota speciāla procedūra manipulatora lineārām un rotācijas kustībām virs nezāļu stādu kastes, lai nodrošinātu fotoattēlu uzņemšanu ar kameras palīdzību (skatīt. 9. pielikumu). Uzņemtie fotoattēli tiek organizēti failu sistēmā un saglabāti norādītajā direktoriijā (skatīt 14. pielikumu), kura pirms tam tika nokonfigurēta kā tīkla disks. Tīkla disks

⁴ <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>

tika izveidots uz otra datora, kurā atradās mākslīgā intelekta nezāļu atpazīšanas algoritms (skatīt 45. att.). Datora algoritms gaidīja tīkla diskā jaunus attēlus. Tiklīdz attēli nonāca tīkla diskā, algoritms uzsāka nezāļu atpazīšanas procesu un rezultātu atgriezta teksta faila veidā. Datorprogramma interpretē teksta failā esošo rezultātu, aprēķina nezāles atrašanās vietu metriskajā koordinātu sistēmā un aktivizē nezāles termisko apstrādes procesu.



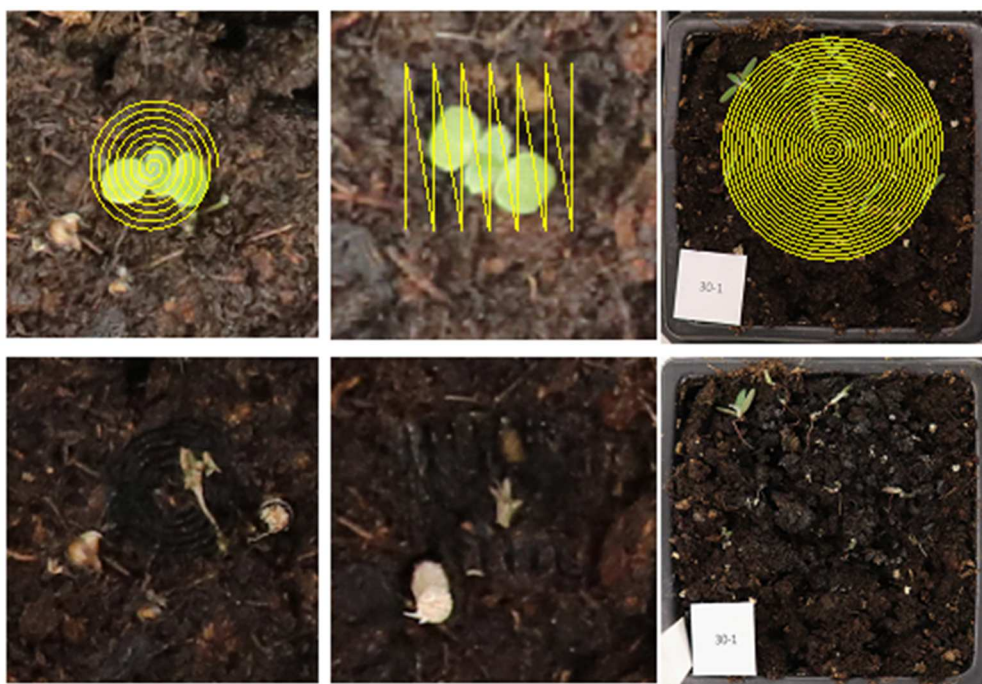
46. att. Lāzera eksperimentu stends darbībā – balandu apstrāde ar lāzeru

Ekspierimenti augu pilna laukuma apstrādes pieeju novērtēšanai un metodika lāzera gaismas iedarbības uz augiem novērtēšanai laboratorijas apstākļos.

Nezāļu apstrādē ar lāzeru tika nolemts izmantot pilna laukuma apstrādes pieeju. Tā atšķiras no citu zinātnieku metodikas, kas ar lāzeru apstrādā atsevišķu jutīgu auga daļu, piemēram, meristēmas audus auga galotnē. Projekta pieeja balstās tajā, ka reālos apstākļos ir ļoti sarežģīti detektēt šo jutīgo punktu, jo nezāles ir vizuāli ļoti atšķirīgas ne tikai dēļ sugu dažādības un vizuāli atšķirīgajām attīstības stadijām, bet arī dēļ individuālajām deformācijām, augsnes īpatnībām, pašreizējā dabiskā starojuma, atmosfēras ietekmes (rasa, lietus pilieni), mehāniskajiem bojājumiem un savstarpējās pārklāšanās. Būtiskās atšķirība nezāļu vizuālajā izskatā aprūtinā mākslīgā intelekta attēlu atpazīšanas metožu izmantošanu atsevišķu augu identificēšanā, bet atsevišķu auga vasas daļu atpazīšana ir vēl papildus uzdevums.

Tāpat šādu uzdevumu aprūtinā potenciāla auga deformācija un/vai kustība telpā dēļ vēja vai arī tā apstrādes laikā, ja auga pārvietojums ir noticis laikā starp atpazīšanu un ierobežojošas iedarbes uzsākšanu.

Līdz ar to pilna auga virsmas apstrāde ar samazinātu lāzera optiskās enerģijas daudzumu praksē lauka apstākļos hipotētiski ir tehniski racionālāka, salīdzinot ar meristrēmu apstrādi ar lielas jaudas impulsiem. 47. att. parādīti eksperimentos augu apstrādes laikā izmantotie lāzera kustību (trajektoriju) modeļi: atsevišķu augu apstrādei un augu grupu apstrādei. Trajektoriju formas tika izvēlētas, lai atvieglotu UR-10 manipulatora kustības programmēšanu un panāktu maksimāli viendabīgu lāzera starojuma enerģijas sadalījumu uz apstrādājamo laukumu.



47. att. Augu apstrādes laikā izmantotie lāzera kustību modeļi: augšējā rinda no kreisās – atsevišķa auga spirāle, atsevišķa auga “zig-zag”, visa podiņa spirāle; apakšējā rinda – attiecīgie apstrādes rezultāti

Kā galvenais lāzera starojuma iedarbības raksturojošais lielums eksperimentos tika izvēlēts starojuma enerģijas daudzums uz laukuma vienību (džouli uz kvadrātmilimetru, $J \cdot mm^{-2}$), kas tika izmantots arī citos radnieciskos zinātniskajā literatūrā publicētajos pētījumos. Lielums tika rēķināts, ņemot vērā pašreizējo lāzera jaudu, laiku, cik ilgi tiek pildīta dotā trajektorija virs apstrādājamā auga un apstrādāto laukumu.

Balstoties uz iepriekš apskatīto pieeju, tika veikts eksperiments, lai noskaidrotu dažādu kustības trajektoriju un apstrādes enerģiju ietekmi uz augiem. Tika veikti 3 testu tipi.

1. Tests dažādu apstrādes trajektoriju ietekmes noteikšanai. Tika izmantoti divi apstrādes trajektoriju veidi: spirālveida 10 mm diametrā, 8 vienmērīgi sadalītas cilpas un “zig-zag” formas trajektorija, kas aptver 10×10 mm kvadrātu, 6 līnijas. Lāzera kustības ātrumi tika izvēlēti tā, lai abos gadījumos viss modelis tiktu ievilkts aptuveni vienlaicīgi. Viena apstrāde uz vienu augu.

2. Tests, lai noteiktu iedarbības efektu uz vairākiem augiem vienlaikus. Visu veģetācijas podiņu apstrādāja, izmantojot ātrumu $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ vai $90 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, savukārt visi pārējie parametri bija vienādi. Tika izmantots spirālveida trajektorijas veids ar kopējo diametru 60 mm un 24 cilpām, visi atsevišķi augi atradās tā iekšpusē. Viena apstrāde uz podiņu.

3. Tests lāzera enerģijas daudzuma noteikšanai uz atsevišķiem augiem. Atsevišķus augus apstrādāja, izmantojot $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ vai $90 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ātrumu, kamēr visi pārējie parametri bija vienādi. Tika izmantots spirālveida raksts ar kopējo diametru 15 mm un 12 cilpām. Viena apstrāde uz vienu augu.

Kopsavilkums ar veiktajiem testiem dots 2. tabulā.

2. tabula

Veikto testu parametri lāzera starojuma ietekmes noteikšanas eksperimentā

Eksperimenta tips	Lāzera kustības ātrums, mm·s ⁻¹	Traektorijas diametrs vai sānu malas izmērs	Traektorijas laukums, mm ²	Apstrādes laiks, s	Kopējā enerģija, J	Enerģija uz garuma vienību, J·mm ⁻¹	Enerģija uz laukuma vienību, J·mm ⁻²
1	22	10	100	6.04	72	0.60	0.725
1	20	10	79	5.88	71	0.59	0.898
2	30	60	2827	74.50	894	0.40	0.316
2	90	60	2827	25.28	303	0.13	0.107
3	30	15	177	9.12	109	0.38	0.619
3	90	15	177	3.38	41	0.14	0.229

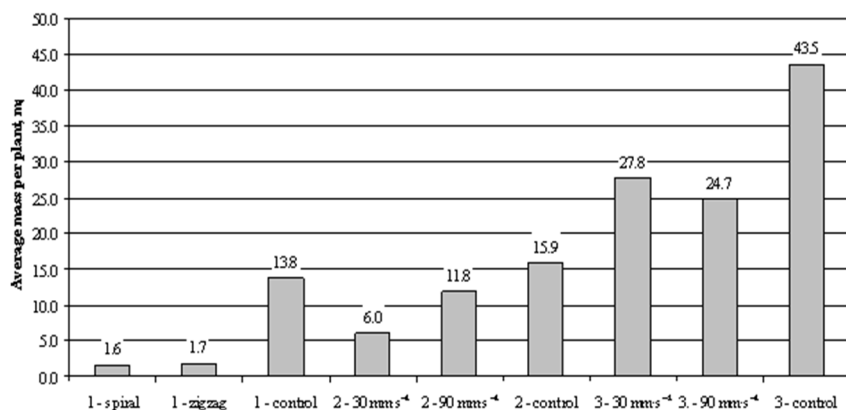
Eksperimentu rezultāti tika novērtēti pēc 7 dienām ar augu svēršanas metodi (sviri – KERN ALJ 160-4AM). Rezultāti apkopoti 3. tabulā un 48. att.

3. tabula

Veikto testu rezultāti lāzera starojuma ietekmes noteikšanas eksperimentā

Testa grupa	Kopējā masa 7 d. pēc apstrādes, g	Augu skaits	Vidējā masa uz augu, mg
1 – spirāle	0.0147	9	1.6
1 – “zig-zag”	0.0154	9	1.7
1 – kontrole	0.2245	16	13.8
2 – 30 mm·s ⁻¹	0.2118	34	6.0
2 – 90 mm·s ⁻¹	0.4096	34	11.8
2 – kontrole	0.6054	38	15.9
3 – 30 mm·s ⁻¹	0.2499	9	27.8
3 – 90 mm·s ⁻¹	0.2225	9	24.7
3 – kontrole	0.7828	18	43.5

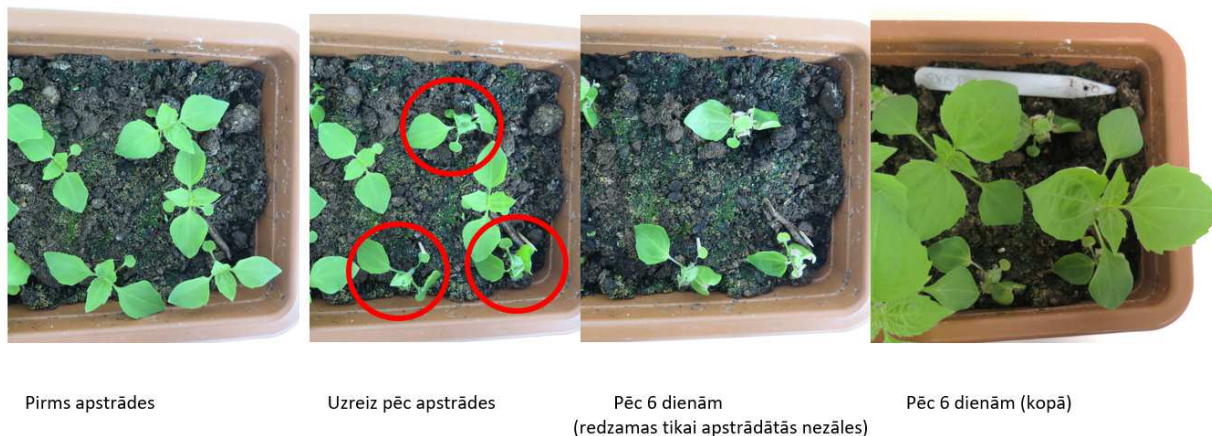
Lai gan šī eksperimentālie datiem netika veikta statistiskā apstrāde mazā augu skaita dēļ, ir skaidra tendence, ka piedāvātā laukuma lāzera apstrādes pieeja ierobežo nezāļu augšanu. Kā bija gaidīts, apstrādes laika un līdz ar to kopējās apstrādes enerģijas palielināšanās dod labāku rezultātu nezāļu augšanas ierobežošanā 1. un 2. eksperimentam. Vienīgais izņēmums ir 3. eksperiments, kur pēc 7 dienām pēc apstrādes veģetācijas ir nedaudz mazāka masa grupai apstrādāti ar zemāku enerģiju. To varētu izskaidrot ar zemu augu skaitu un sekojošu rezultātu svārstību pieaugumu.



48. att. Eksperimentā veikto testu rezultātu salīdzinājums

Rezultāti rāda, ka nezāļu apstrādei var efektīvi izmantot 445 nm (zilās krāsas) pusvadītāju lāzeru. Vislabākā energoefektivitāte ir apstrādes zonai, kas ir tuvu augu lapotnes lielumam. Apstrādes kustības traektorijas veids izrādījās nenozīmīgs. Eksperimentu metodika un rezultāti ir publicēti (Osadčuks et al, 2020).

Lāzera apstrādes rezultāts ir atkarīgs arī no auga morfoloģiskajām īpašībām – augiem ar biežākām lapām apstrāde jāveic ilgāk, lai augs saņemtu tikpat lielu enerģijas devu uz vienu masas vienību, kā mazāks augs. Līdzīgi ar auga attīstības stadijām – ja apstrādi veic dīglapu stadijā augu ir iespējams pilnībā iznīcināt. Kad tika veikta lielāku augu apstrāde, novērojām to, ka nezāles spēj veidot jaunas lapas un ataugt, tomēr to attīstība bija būtiski kavēta.



49. att. Sīkziedu sīkgalvīte pēc apstrādes ar lāzeru.

49. attēlā var uzskatāmi redzēt, ka augi, kas nav apstrādāti ar lāzeru ir turpinājuši augt, bet apstrādātās nezāles būtiski atpaliek savā attīstībā. Arī šāds efekts nezāļu kontrolē uz lauka varētu būt pietiekošs, jo tiek apturēta nezāļu augšana, bet kultūraugs tajā pašā laikā turpina augt, un labāk konkurē vai pat pāraug nezāli.

Eksperimenti enerģijas daudzuma uz laukuma vienību un apstrādes reižu skaita novērtēšanai

Citā eksperimentā tika precīzāk noteikts nepieciešamais enerģijas apjoms uz laukuma vienību augu apstrādē, kā arī pārbaudīta hipotēzi, ka var veikt vairākkārtēju apstrādi ar mazāku

jaudu pretstatā vienai apstrādei ar lielāku jaudu. Eksperiments tika sadalīts 2 fāzēs: precīzāka nepieciešamā enerģijas daudzuma novērtēšana un atkārtojumu ietekmes noteikšana.

Lai novērtētu vairāku apstrādes reižu efektu un redzētu augu attīstības dinamiku, būtu nepieciešams svērt apstrādātos augus un kontroles grupu vairākkārtīgi, kas statistiskai apstrādei prasītu lielāku eksperimentālo objektu skaitu (kontrolē un visas eksperimentālās grupas katrai svēršanas reizei). Uzdevuma atvieglošanai tika nolemts izmantot nedestruktīvu metodi – fotografēšana un attēlu apstrāde, kas ļauj novērtēt kopējo zaļo lapu apjomu. Šādai vajadzībai tika izveidots skritis “R statistics” vidē (15. pielikums).

Pirmās eksperimenta fāzes rezultāti doti 4. tabulā un 50. att.. Katrs augs individuāli tika apstrādāts ar spirālveida traektoriju 15 mm diametrā un soli < 2 mm. Tabulā aprēķināta uz augu nonākusī starojuma enerģija.

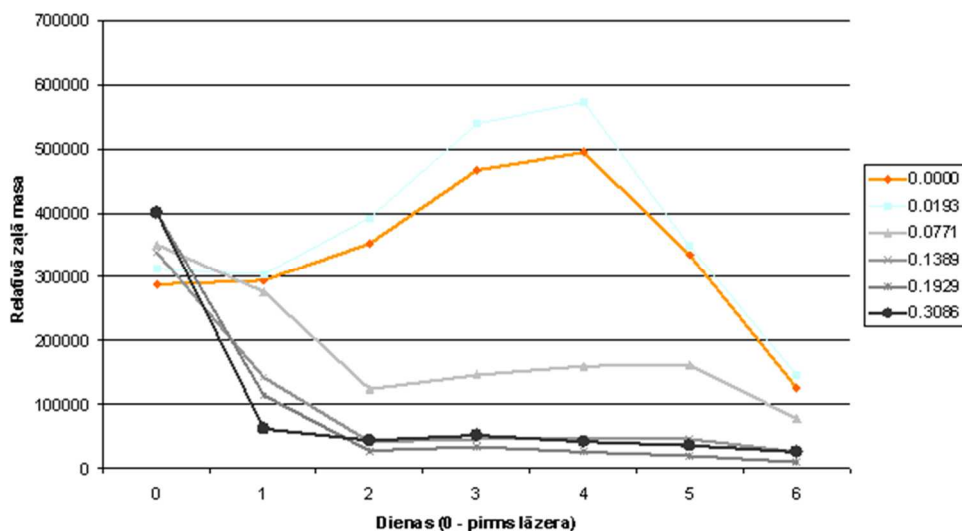
4. tabula

Veikto testu rezultāti precizētas lāzera starojuma ietekmes noteikšanas eksperimentā

ID	Jauda, %	J·mm⁻²	Beigu masa, g
1	0	0	1.869
2	5	0.019285	2.08
4	20	0.077141	1.331
5	36	0.138854	0.753
6	50	0.192853	0.623
3	80	0.308565	0.668

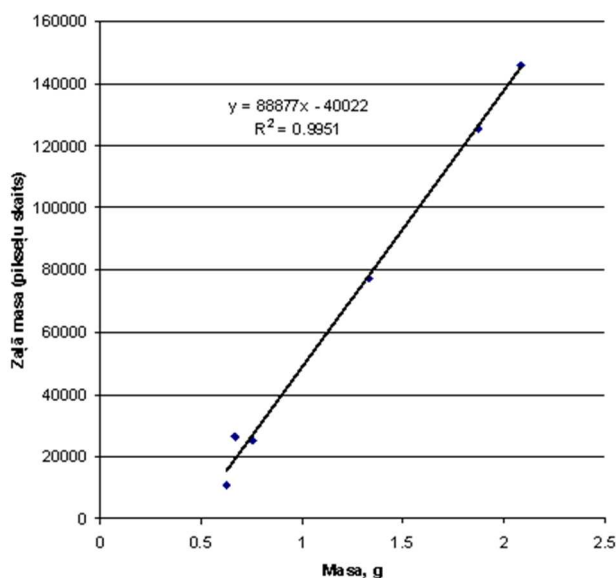
Grafiki pa dienām parāda zaļās masas (zaļo pikseļu skaita) dinamiku. 0. pozīcijā ir stāvoklis pirms lāzera apstrādes, 1, 2 utt. dienas numurs. 5. un 6. dienā augi netika laistīti, to var izteikti redzēt grafikos, tāpēc dati ir mazāk ticami. Džoulos doto mērījumu var izmantot, lai variētu ar lāzera jaudām un apstrādes ātrumiem turpmākajos eksperimentos.

Grafikos var uzskatāmi redzēt, ka vienreizējai 5% apstrādei nav ietekmes uz augiem. Grafiks parāda pat lielāku zaļo masu, kas izskaidrojams ar nelielā augu skaita radītajām statistiskajām svārstībām. Tāpat redzams, ka 36, 50, 80% apstrādes ietekmes savstarpēji būtiski neatšķiras, visos gadījumos rezultātā augi nav atkopušies eksperimenta perioda laikā. Beigu masa arī būtiski neatšķiras pie apstrādes jaudām 36% un vairāk.



50. att. Zaļās masas laukuma pieaugums (relatīvais laukums pikseļos) pa dienām. Līknes apzīmē dažādās apstrādes enerģijas, 0 – kontroles grupa

Papildus tika pārbaudīta korelācija starp svēršanas mērījumiem un zaļās masas laukuma pikseļu daudzumu (lapu laukumu). Grafikā (51. att.) var redzēt korelāciju starp pēdējo attēlu pikseļu rezultātu un svēršanu katrai eksperimenta grupai.



51. att. Korelācija starp attēlu zaļo pikseļu rezultātu un svēršanu katrai eksperimenta grupai

Galvenie secinājumi eksperimenta pirmajai fāzei.

1. Apstrādes enerģija $0.0193 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ neatsāja būtisku ietekmi uz augiem pēc vienreizējās apstrādes
2. Apstrādes enerģija $0.0771 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ uzreiz pēc apstrādes zaļās masas laukumu samazināja līdz 79% no sākotnējās, nākamajā dienā tā bija 35% mazāka nekā kontrole, bet pēc tam pakāpeniski turpināja pieaugt.
3. Enerģija $0.1389 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ un vairāk pilnībā apturēja augu augšanu eksperimenta periodā.

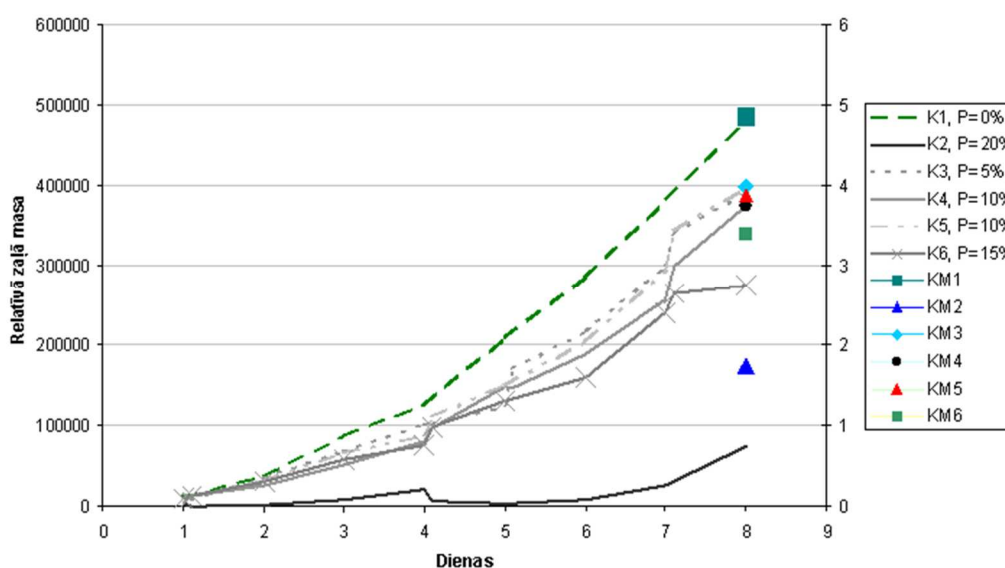
4. Zaļo pikseļu skaitīšana ir efektīva nedestruktīva metode augu attīstības dinamikas fiksēšanai. Par to liecina labā korelācija starp pikseļu skaitīšanas rezultātiem pēdējā uzņemtajā attēlā un augu masas mērījumiem.
5. Fotografēšanas metodika bija pieņemama – nepieciešami manuāli nemainīgi iestatījumi ar minimāliem lēcas kropļojumiem.

Otrajā eksperimenta fāzē augu apstrāde tika veikta ar atkārtojumiem. Arī otrajā fāzē katrs augs individuāli tika apstrādāts ar spirālveida traektoriju 15 mm diametrā un soli < 2 mm. 5. tabulā aprēķināta uz augu nonākusī starojuma enerģija, kā arī dota augu beigu masa un beigu laukums pikseļos. 52. att. parādīta augu zaļās masas dinamika.

5. tabula

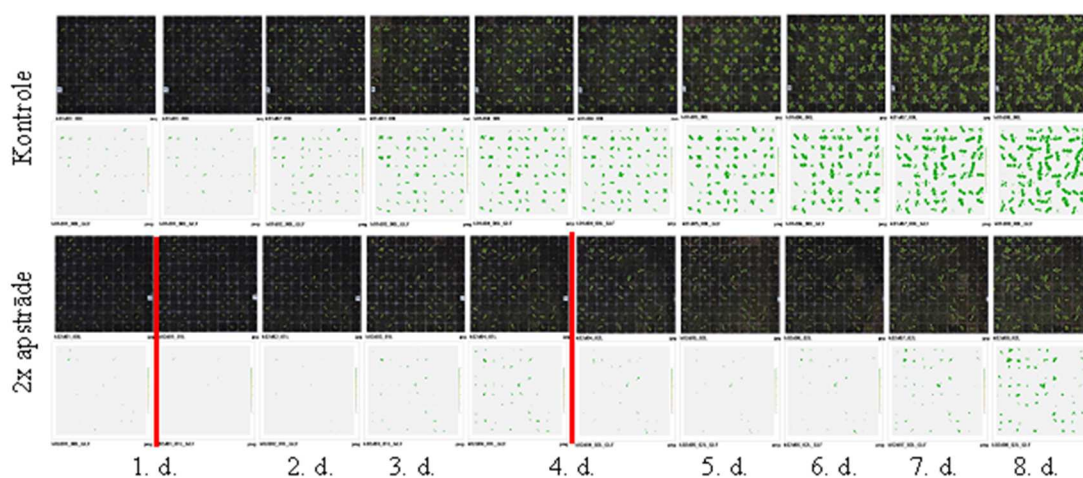
Eksperimenta otrās fāzes rezultāti augu apstrādē ar atkārtojumiem

Kastes ID	Jauda, %	Lāzera apstrādes atkārtojumi	Enerģija, J·mm ⁻²	Beigu masa, g	Beigu zaļā masa (pikseļi)
1	0 (kontrolē)	0	0	4.86	481154
2	20	2	0.077141	1.7486	74992
3	5	5	0.019285	3.9807	390778
4	10	5	0.038571	3.7482	374538
5	10	3	0.038571	3.866	396529
6	15	3	0.057856	3.3898	273565



52. att. Relatīvās zaļās masas laukuma izmaiņas (līnijas) un beigu masas 8. dienā (simboli)

Grafikā lūzuma punktos var redzēt augu apstrāde atkārtojumus: 4. dienā kastēm 2-6, 5. dienā kastēm 3, 4 un 7. dienā kastēm 3-6. Vizuāli augu attīstība eksperimenta gaitā 2. grupai ar diviem atkārtojumiem parādīta 53. att.



53. att. Augu attīstība eksperimenta gaitā pa dienām, ar sarkanajām līnijām parādīti apstrādes brīži 1. un 4. dienā.

Eksperimenta otrās fāzes laikā noskaidrots, ka vairākkārtējā apstrāde ir vēlama jebkurā gadījumā, jo augiem ar attīstītu sakņu sistēmu, ir tendence atjaunot lapas pēc apstrādes. Tomēr apstrādes enerģijai ir jābūt pietiekošai, lai ietekmētu lapas: enerģijas zem $0.077 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ līmeņa, nedeva vēlamo augu attīstības kavēšanas rezultātu pat pie vairākām apstrādēm.

Multispektrālās kameras izmantošana augu atpazīšanā

Visu iespējamo nezāļu sugu un augšanas stadiju atpazīšana, pielietojot mākslīgo intelektu, ir sarežģīts uzdevums gan funkcionāli (nepieciešamas apjomīgas apmācības kopas), gan veiktspējas ziņā (neironu tīklam atpazīšanas procesā jādarbojas vienlaicīgi ar daudzām klasēm). Tāpat papildus var rasties grūtības ar deformēto augu atpazīšanu. Deformācijas avoti var būt visdažādākie: slimību, dzīvnieku, atmosfēras iedarbības radītie bojājumi, kā arī pašas nezāļu ierobežošanas iekārtas darbības rezultāts, piemēram, ja nezāle ir daļēji ataugusi pēc pirmreizējās apstrādes ar lāzeri vai mehānisko ierobežotāju. Līdz ar to ir pamatota nepieciešamība izpētīt papildus metodes nezāļu identifikācijai uzņemtajos attēlos.

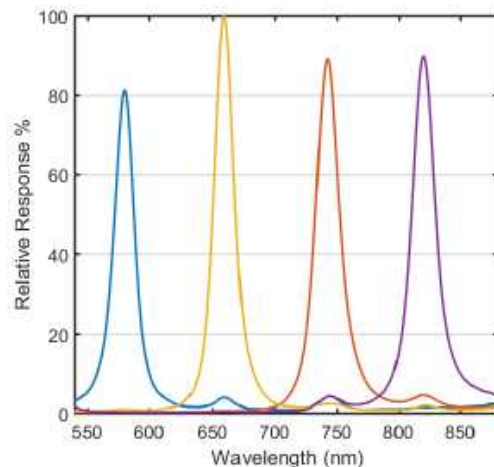
Viena no potenciāli izmantojamajām metodēm ir augu redzamā diapazona krāsu indeksi (RGB), kuri projekta ietvaros tika izmantoti lāzera iedarbības kvantitatīvai novērtēšanai (skat. 1.4. nodaļu). Attēlā uzņemto augu (tajā skaitā arī neatpazīto) zaļās daļas tiek identificētas, analizējot atsevišķu pikseļu vērtības un piemērojot minimālā laukuma filtru, lai izskaustu atsevišķu pikseļu un pikseļu grupu radītos traucējumus. Šīs metodes galvenais trūkums ir nepieciešamība pēc vienmērīga, nemainīga spektra apgaismojuma, kā arī nedrīkst būt atstarojumi no lapām. Laboratorijas apstākļos to var panākt, taču reālos lauka apstākļos tā ir būtiska problēma.

Par drošāku metodi dzīvu augu klātesamības noteikšanai var uzskatīt NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) indikators jeb indekss, kuru katram attēla pikselim aprēķina pēc formulas:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

kur R – pikseļa sarkanā komponente

NIR – pikseļa tuvā infrasarkanā komponente (750-1100 nm).



54. att. Spectral Devices MSC-AGRI-1-A krāsu darba diapazoni

(avots: spectraldevices.com/sites/default/files/productsheets/mscam_agri_productsheet_ver06.pdf)

Šī metode tiek plaši pielietota jau vairākus gadu desmitus aerofotogrāfijā un satelītfotogrāfijā augkopības efektivitātes novērtēšanai. Indikators tiek pamatots ar auga spēju atstarot infrasarkanā siltuma starojumu ar mērķi regulēt lapu temperatūru. Pārējie objekti, kas var nokļūt redzes laukā (augšne, smiltis, akmeņi, mirušas augu daļas u.c.) šajā spektrā atstaro relatīvi mazāk.

Projekta ietavos NDVI metode augu detektēšanas iespēju pārbaudei nezāļu ierobežojošā robota vajadzībām tika pielietota Spectral Devices MSC-AGRI-1-A multispektrālā kamera. Šī kamera darbojas redzamajā diapazonā, detektējot RGB krāsu komponentes, kā arī augu NIR atstarošanas maksimumā: 820 nm (skat. 54. att.).



55. att. RGB un NDVI attēls stresa apstākļos augošiem redīsiem

55. att. var redzēt NIR fotogrāfijas piemērus dažādām augu sugām dažādos veselības stāvokļos. Var uzskatāmi redzēt ka veselās lapas NDVI attēlos ir gaiši pelēkas, bet atmirstošās lapas – tumši pelēkas vai melnas.

NDVI fotogrāfijas var pielietot ne tikai, lai uzlabotu nezāļu detektēšanu, bet arī, lai paaugstinātu nezāļu ierobežošanas iekārtas ražīgumu, izlaižot apstrādē nezāles, kuru attīstība ir kavēta un kuri vairs nevar būtiski traucēt kultūrauga attīstību.

2. Vizuālo datu kopas sagatavošana un anotēšana nezāļu atpazīšanas algoritma apmācībai

Lai nodrošinātu nepieciešamos augu attēlus ar kuriem apmācīt augu atpazīšanas algoritmu, projektā iesaistītās zemnieku saimniecības veica kultūraugu audzēšanu. Projektā tika izvēlēti seši kultūraugi (parastā biete (*Beta vulgaris*), sējas burkāns (*Daucus carota* var. *sativus*), cukini (*Cucurbita pepo* subsp. *pepo*), parastais ķirbis (*Cucurbita pepo*), dārza redīss (*Raphanus sativus* var. *sativus*), melnais rutks (*Raphanus sativus* var. *niger*). Kultūraugi tika audzēti atklātā laukā atbilstoši saimniecībā izmantotajai tehnoloģijai.

Saimniecības veica nepieciešamos augsnes sagatavošanas darbus, kultūraugu sēju un vajadzības gadījumā arī nezāļu mehānisku kontroli, lai tās neizaugtu pārāk lielas un neaizklātu kultūraugus. Kultūraugi tika sēti vairās reizēs sezonā, lai nodrošinātu, ka visu sezonu ir pieejami augi agrās attīstības stadijās.



56. att. Saimniecības “Lejasvagaļu dārzs” ķirbju lauks



57. att. Saimniecības ZS “Atvases” biešu un burkānu lauks



58. att. J. Lipska saimniecības “Absolūts Ēd” redīsu un rutku lauks

Papildus augu audzēšanai uz lauka, Agrihorta siltumnīcā tika audzēti gan kultūraugi, gan nezāles. Siltumnīcā audzēti augi tika izmantoti gan fotogrāfiju iegūšanai augu atpazīšanas algoritma apmācībai, gan eksperimentiem ar lāzera apstrādi. Augu audzēšana siltumnīcā ļāva nodrošināt pieeju augiem agrās attīstības stadijās visu gadu.



59. att. Kultūraugu un nezāļu audzēšana Agrihorta siltumnīcā

Augu fotografēšanu vica gan Agrihorta darbinieki, gan saimniecību pārstāvji ar šim nolūkam izgatavoto fotografēšanas aprīkojumu.

2.1. Augu audzēšana siltumnīcā

Agrihorta siltumnīcā kontrolētos apstākļos tikai veikta nezāļu un kultūraugu audzēšana. Lai noskaidrotu savvaļas augu audzēšanas iespējas siltumnīcā ziemas apstākļos tika iesēta 21 nezāļu suga (aklis (*Galeopsis spp.*), baltā balanda (*Chenopodium album*), baltā spulgotne (*Melandrium album*), dārza vējagriķis (*Polygonum convolvulus*), ganu plikstiņš (*Capsella bursa-pastoris*), gerānija (*Pelargonium spp.*), ķeraiņu madara (*Galium aparine*), lauka magone (*Papaver dubium*), lauka vijolīte (*Viola arvensis*), maura skarene (*Poa annua*), parastā gaiļšāre (*Echinochloa crusgalli*), parastā rudzuzmilga (*Apera spica-venti*), parastā rudzupuķe (*Centaurea cyanus*), parastā virza (*Stellaria medium*), rudzu lācauza (*Bromus secalinus*), sīkziedu sīkgalvīte (*Galinsoga parviflora*), tūruma gauris (*Spergula arvensis*), tūruma kumelīte (*Matricaria inodora*), tūruma naudulis (*Thlaspi arvense*), tūruma radzene (*Cerastium arvense*), vėjauza (*Avena fatua*)), kā arī piecas viendīgļlapju kultūraugu sugas (auzas (*Avena sativa*), vasaras kvieši (*Triticum aestivum*), vasaras mieži (*Hordeum vulgare*), ziemas kvieši (*Triticum aestivum*), ziemas rudzi (*Secale cereale*)). Augu audzēšana attēlota 60. attēlā.



60. att. Augu audzēšanas konteineri ar dažādiem augiem.

Nezāļu sugas tika audzētas gan atsevišķi, gan vairākas nezāļu sugas ar kultūraugu, tādā veidā imitējot apstākļus uz lauka. Augsnes sagatavošanai tika izmantots dzeramais ūdens un

firmas kūdras substrāts (“Biolan”, pH 6.0, elektrovadītspēja (EC) 25 mS m⁻¹, mitruma saturs <65%, kūdras frakcija <2.0 cm, N 12.0%, P₂O₅ 14.0%, K₂O 24.0%, Te 1.0 kg m⁻³). Katrā dēstu podiņā augu sēklas tika sētas ar neregulāru attālumu. Sēklu dīgšana dēstu podiņos ilga vidēji vienu līdz divas nedēļas. Dēstu podiņus pēc nepieciešamības aplaistīja vienu līdz divas reizes nedēļā. Augu laistīšanai dēstu podiņus novietoja uz specializētiem appludināmiem siltumnīcas galdiem. Tika novērots, ka starp nezāļu sugām būtiski atšķiras sēklu dīdzība kā arī daļa augu kavējās attīstībā.

Turpmākai audzēšanai tika izvēlētas dārzkopībā bieži sastopamas nezāļu sugas, kuras varēja veiksmīgi kultivēt siltumnīcā - baltā balanda, ķeraīņu madara, tīruma naudulis, ganu plikstiņš, sīkziedu sīkgalvīte, tīruma kumelīte. Augu audzēšanai tika izmantots kūdras substrāts, kam pievienoja granulētu komplekso mēslojumu “Yara Complex” 20 g m⁻², kura sastāvā ir N 12.0%, N – NH₄ 7%, N – NO₃ 5%, P₂O₅ 11%, K₂O 18%, Mg 1.6%, S 8%, B 0.015%, Fe 0.2%, Mn 0.02%, Zn 0.02%. Augu sēklas viena no otras dēstu kastēs tika iesētas ar neregulārām atstarpēm, un divās līdz trijās kolonnās ar 2.0 – 5.0 cm atstarpēm. Sēklu dīgšana dēstu kastēs ilga vidēji vienu līdz divas nedēļas.

Gadījumos, kad dēstu kastes ilgstošā laikā laistīja no augšas, tika novērota aļģu savairošanās uz substrāta virskārtas. Aļģes traucē izmantot zaļo pikseļu noteikšanas algoritmus, jo gan fons, gan augs ir zaļā krāsā. Pēc šī efekta konstatēšanas tika mainīta laistīšanas metode – laistīšanu no augšas aizvietoja ar galdu uzpludināšanu.



61. att. Aļģu kārtu uz kūdras substrāta

Augus dēstu podiņos un kastēs audzēja Agrihorta siltumnīcā kontrolētos apstākļos. Augu attīstībai nodrošināja +20.0 C° temperatūru no plkst. 8:00 – 20:00, bet nakts laikā no plkst. 20:00 – 8:00 +15.0 C° temperatūru. Vidējais gaisa mitruma saturs visā augu attīstības periodā bija 50%. Papildu saules gaismai, augu audzēšanai tika izmantota LED apgaismojuma lampas (Philips Lightning IBRS, 400V AC Nom 180W, IP66) un nātrija lampas ar apgaismojuma periodu no plkst. 06:00 – 20:00. Ziemas mēnešos (novembris – februāris) siltumnīcā audzētiem augiem novērota pasliktināta sēklu dīgšana un attīstība.

2.2. Fotografēšanas aprīkojums

Dēstu podiņu fotografēšanas stends. Augu, kas atradās dēstu podiņos, fotografēšanai siltumnīcā, tika konstruēts rāmis ar platformu un perpendikulāri regulējamu augstumu pret plakni, un uzstādītu mākslīgo apgaismojumu. Konstruktijas – rāmja izgatavošanai izmantoja metāla stūra profilus (platums 2.5*2.5 cm) un metāla skrūves ar uzgriežņiem. Rāmi no malām aizsedza ar melnu, gaismas necaurlaidīgu polietilēna plēvi (biezums 0.2 mm). Polietilēna plēve nodrošināja aizsardzību no citiem gaismas avotiem (piemēram, saules apgaismojums). Platformai izmantoja putu polistirola loksni. Polistirola loksni montēja kopā ar četriem metāla stūra leņķiem. Katrs stūra leņķa savienojums ar loksni nodrošināja stabilu platformas noturību.



62. att. Dēstu podiņu fotografēšanas stends ar regulējamu fotokameras augstumu

Platformas vidū tika izveidoti trīs caurumi: vidusdaļā atradās fotokameras lēca, kas novietota 90° leņķī no plaknes ar skatu uz leju (uz augu lapām), tās diametrs 7.0 cm; blakus fotokameras lēcai atradās divi kabatas lukturi, to diametrs 2.5 cm un skats vērsts uz leju 90° leņķī no plaknes. Apgaismojumam izmantoja divus LED lukturus “Arcas 9LED” (9 LED spuldzes, gaismas plūsma 50 lm.).

Fotoattēlus ar augiem uzņēma siltumnīcā kontrolētos apstākļos. Fotoattēli ar augiem to attīstības laikā (AE 09 – 16) tika uzņemti no 10 cm un 30 cm attāluma (attālums no augsnes virskārtas līdz kameras lēcai). Fotoattēlus uzņēma ar “Canon PowerShot G16” fotoaparātu (fotoattēlu izmēri 4000*3000 pikseļi, faila tips JPEG).

Stumjamās fotografēšanas platformas. Agrihortā tika izgatavotas divas stumjamās platformas, lai uzņemtu fotogrāfijas uz lauka. Platforma sastāv no 4 riteņiem, kur divi fiksētie un divi pagriežamie 13” riteņi, ar maksimālo pieļaujamo slodzi 136 kg uz vienu riteni. Riteņi vienai platformai piemetināti pie trīsstūrveida metāla kronšteina, bet otrajai pieskrūvēti pie kronšteina ar M10 vītņstieni un uzgriežņiem. No metāla U-veida montāžas profiliem

2x30x30x30 mm tika izveidots platformas karkass. Montāžas profilu savienošanai tika izmantoti M10 vītņstienis, paplāksnes un paškontrējošais uzgrieznis DIN 985.



63. att. Stumjamās fotografēšanas platformas karkass

Lai konstrukcija būtu stabilāka, vienai platformas versijai karkass nostiprināts ar 12 mm OSB plāksnēm. Lai vides apstākļi, piemēram, lietus neietekmētu platformas konstrukcijas un, lai tās ilgāk kalpotu, atrodoties apkārtējā vidē, platformas tika apšūtas ar difūzijas membrānu "DALTEX frameshield 100 plus". Otrā platformas korpuss tika veidots no mitrumizturīgā 12 mm saplākšņa.



64. att. Stumjamā fotografēšanas platforma sagatavota darbam

Stumjamās fotografēšanas platforma fotoaparāta augstums ir regulējamas gan uz augšu, gan uz leju. Arī riteņu konstrukciju attālums savā starpā regulējams, padarot konstrukciju šaurāku vai platāku. Katrai zemnieku saimniecībai attālums starp riteņiem un fotografēšanas augstums tika pielāgots individuāli, jo vāgu augstums un attālums starp kultūraugu rindām katrā saimniecībā bija atšķirīgs.

Saulainajā laikā, lai saule netraucētu kvalitatīvu attēlu uzņemšanu, papildus izveidoti regulējamie ēnotāji gan priekšā, gan sānos. Ēnotāji izgatavoti no elastīgu plastmasas cauruļu

(10 mm diametrā) karkasa, kurš pārklāts ar “DALTEX frameshield 100 plus” necaurspīdīgo materiālu.

Tā kā kultūraugu rindu novietojums atšķiras starp saimniecībām, platformās fotoaparātam ir paredzētas vairākas ievietošanas vietas un grīdā izgriezti atvērumi fotoaparāta objektīvam.



65. att. Fotoaparātu pozīcijas

Augu fotogrāfiju uzņemšanai tika izmantots fotoaparāts Sony Cyber-shot DSC-W800 ar 20.1 Mega pikseļa kameru 5x optisko palielinājumu. Lai nesabojātos un nesaskrāpētos fotoaparāts, ievietojot un veicot fotografēšanu, ievietošanas malas ir izgatavotas no ekstrudēta putupolistirola “Technoplex”.

Pašgājēja fotografēšanas platforma. Platforma sastāv no metāla rāmja, akumulatoru un vadības nodalījuma, un četriem elektropiedziņas riteņiem. Pašgājējplatforma izgatavota LLU Tehniskajā fakultātē pirms projekta uzsākšanas un projekta gaitā pielāgota attēlu uzņemšanai.



66. att. Pašgājēja fotografēšanas platforma aprīkota ar kamerām un saules aizsegumiem

Platforma tika aprīkota ar divām Intel RealSense fotokamerām, viena priekšā, ar skatu vagas virzienā, otra platformai pa visu, ar skatu uz augiem no augšas. Platformai iebūvēti vairāki gaismas avoti. Divi lukturi priekšā izgaismo braukšanas virzienu, bet divi LED prožektoru vērsti uz augiem, lai fotografēšanas laikā kultūraugi un nezāles būtu pietiekami un vienmērīgi apgaismoti. Lai samazinātu saules gaismas ietekmi uz fotografējamo laukumu, no

melna plastikāta izgatavots gaismu aizturošas sienas. Platformai tālāk tika uzstādīts attēlu iegūšanas aprīkojuma nodaļums, kurā izvietots dators, monitors, akumulatori un strāvas pārveidotājs.



67. att. Platformai uzstādīts attēlu iegūšanas aprīkojuma nodaļums

Projekta ietvaros pašgājēja fotografēšanas platforma papildus tika aprīkota ar saules fotovoltisko paneli virs attēlu iegūšanas aprīkojuma nodaļuma. Ar saules paneli saražotā enerģija, tika izmantota platformas akumulatoru lādēšanai.



68. att. Platforma tiek demonstrēta Lauksaimniecības zinātnisko iestāžu Direktoru Padomes skatē

Pēc vairākiem testiem tika nolemts papildināt saules aizsardzību, aprīkojot platformas sānus un priekšu ar saules sargiem no zaļa polikarbonāta plāksnēm. Saules sargiem priekšā un aizmugurē bija iespēja regulēt augstumu, tādā veidā pielāgojoties kultūrauga augstumam.

Fotografēšana ar statīvu. Dēstu kastēs audzēto augu fotoattēlu uzņemšanai tika izmantoti divi fotoaparāti: 1) “Canon EOS 800D” digitālais fotoaparāts (fotoattēlu izmēri 6000*4000 pikseļi, faila tips JPEG); 2) “Canon PowerShot G16” (fotoattēlu izmēri 1200*1200 pikseļi, faila tips JPEG). Fotoattēli tika uzņemti kontrolētos apstākļos ar telpas mākslīgo apgaismojumu un trīspunktu atbalsta fotostatīvu (Manfrotto). Uz trīspunktu atbalsta sistēmas fotoaparāts tika nostiprināts tā, lai lēca atrastos pretstatā pret augu lapām - lēcas skats tika vērsts no augšpusē uz leju. Tika iestatīts 30 cm attālums no fotoaparāta lēcas līdz dēstu kastēs esošās augsnes virskārtas.



69. att. Fotoaparāts ar statīvu dēstu kastu fotografēšanai

Fotoattēli ar augiem tika uzņemti vienreiz dienā no augu attīstības etapa (AE) – 09 (dīgsta parādīšanās no augsnes, dīgļlapas redzamas virs augsnes virskārtas) līdz AE – 16 (sešas īstās lapas izveidojušās).⁵ Lai uzņemtu fotoattēlus ar augiem sānskatā, dēstu kaste tika savērsta (45° leņķī no plaknes) no tās sākotnējā stāvokļa. Attēli tika uzņemti tā, lai attēlā ir redzams auga lapas virsmas laukums un forma.

2.3. Fotoattēlu uzņemšana lauka apstākļos

Fotoattēlu iegūšana lauka apstākļos notika sadarbība ar trīs projektā iesaistītajām saimniecībām:

- 1) Rūjienas novada, Jeru pagasta SIA “Lejasvagaļu dārzs”, kur tika fotografēti cukīni un ķirbji;
- 2) Krimuldas novada, Krimuldas pagasta J. Lipska saimniecība “Absolūts Ēd”, kur tika fotografēti redīsi un rutki;
- 3) Ķekavas novada Daugmales pagasta zemnieku saimniecība “Atvases”, kur fotografēti burkāni un bietes.

Projekta norises laikā fotoattēlu uzņemšana norisinājās vairākkārt un dažādos augu augšanas attīstības etapos (sākot no dīgļlapu atvēršanās pilnībā virs augsnes virskārtas (AE – 10) līdz brīdim, kad izveidojušās sešas īstās lapas (AE – 16). Augi tika fotografēti pirms un pēc augsnes rindstarpu apstrādes (ravēšana, irdināšana), kā arī lietūs un diennakts tumšajā laikā.

Stumjamā fotografēšanas platforma. Augu fotoattēlu uzņemšanai tika izmantots fotoaparāts Sony Cyber-shot DSC-W800 un Intel RealSense kameru. Stumjot platformu uz priekšu pa vagu ar augiem, ik pēc metra tika veikta manuāla fotografēšanas uzņemšanas pogas nospiešana. Attēli uzņemti dažādos rakursos, mainot fotoaparāta ievietošanas vietu. Tika

5 <http://noverojumi.vaad.gov.lv/kulturaugu-fenologija/darzeni> - atsauce uz augu attīstības etapiem

uzņemtas bildes un videoieraksti. Foto attēli uzglabājas fotoaparāta SD kartē un vēlāk tika pārkopēti uz servera tālākai foto apstrādei.

Atkarībā no saules atrašanās vietas fotografēšanas laikā, pirms fotografēšanas tika noregulēti saules sargi priekšā un sānos.



70. att. Stumjamā fotografēšanas platforma pie lauka ar nolaistiem saules aizsargiem

Pašgājēja fotografēšanas platforma. Platforma līdz laukam un pa kultūrauga rindu tika vadīta ar distances vadības pultī. Pirms kustības uzsākšanas pa lauku, tika ieslēgts vadības dators un aktivizēta automātiska augu vai vagu fotografēšanas programma. Virzot platformu pa vagu uz priekšu un atpakaļ, Intel RealSense fotokameras fiksēja augus no augšās uz leju vai skatu vagas virzienā. Ar automātisko režīmu datorprogramma spēj fotografēt 60 attēli/minūtē, ar iespēju iestatīt vairāk vai mazāk attēlus sekundē.



71. att. Pašgājēja fotografēšanas platforma darbībā uz mitras augsnes

Pašgājēja platforma testēta gan saulainā, gan lietainā laikā. Lietainajā laikā, kad zeme ir mitra, platforma braucot pa lauku, tērē vairāk enerģijas, jo robota masa ir ~150 kg un riteņi izslīd. Braucot pa slapju augsni, tas grimst zemē un nepieciešama lielāka jauda, lai izbrauktu visu maršrutu, līdz ar to akumulatori izlādējās ātrāk nekā sausā, saulainā laikā.

Platforma testēta arī nakts laikā. Darbību naktī nodrošina uzstādītie lukturi braukšanas virzienā un LED prožektori, kas izgaismo augus.

2.4. Fotoattēlu anotēšana

Fotoattēlu anotēšanai uz “Windows10 OS” tika izveidota speciāla programma, izmantojot python un cv2, xml.etree.ElementTree bibliotēkas. Lai izmantotu anotēšanas programmu augu atpazīšanai, katram kultūraugu un nezāļu sugai tika izveidotas dokumentu mapes “images” un “annotations”. Dokumentu mapē “images” ievietoja atlasītus fotoattēlus, kuros augu un/vai nezāļu attēli atbilda nepieciešamajai kvalitātei. Dokumentu mapē “annotations” saglabājās katra attēla augu anotāciju klase un rāmīša koordinātas .xml failā. Lai anotētajos fotoattēlos augu suga un auga koordinātas tiktu savstarpēji sasaistītas, fotoattēlu faila nosaukumam jāsakrīt ar anotāciju faila nosaukumu.



72. att. Ekrānttēls no augu anotēšanas programmas

Anotēšanai izvēlējās tādu augu fotoattēlus, kuros labi saskatāmi augi. Anotētājs katrā attēlā apvilka taisnstūrveida anotēšanas rāmīti ap katru redzamo augu, no saraksta izvēloties atbilstošo auga sugu. Anotēja tos augus, kuru lapas savstarpēji būtiski nepārklājās ar citu augu lapām. Gadījumos, kad fotoattēlos redzami augi un to lapas savstarpēji būtiski pārklājās, šos augus aizkrāsoja izmantojot lietojumprogrammatūru “Paint”.

Anotēšana tika veikta vairākos piegājienos, un sagatavotas vairākas datu kopas. Sagatavotās anotēto attēlu kopas tika nodotas atpazīšanas algoritmu apmācībai. Balstoties uz iegūto rezultātu, anotēšana tika turpināta iesāktajā veidā vai veiktas izmaiņas metodē. Piemēram, tika izmēģināts anotēt augus kas savstarpēji pārklājas ar vienu anotēšanas rāmīti. Iegūtie atpazīšanas rezultāti bija sliktāki, nekā anotējot katru augu atsevišķi, līdz ar to turpmāk tika anotēts katrs augs atsevišķi.

Vagu attēlu anotēšanai tika izveidota speciāla programma, kurā ar vektora palīdzību tika norādīts vēlamais kustības virziens.



73. att. Ekrānattēls no vāgu marķēšanas programmas ar vēlamo robota kustības vektoru

Lai palielinātu kvalitatīvu augu attēlu daudzumu, viena no metodēm ir sintētisko attēlu veidošana. Tam nepieciešams no attēliem precīzi izgriezt augu zaļās daļas (angliski: *crop*) un tad šos izgrieztos augus ievietot attēlā ar augsnes fonu. Izgrieztos augus iespējams pagriezt dažādos leņķos un veidot to spoguļattēlus, tādējādi būtiski palielinot datu kopā ietilpstošo attēlu skaitu. Lai veiktu augu zaļās daļas izgriešanu, tika izmantota attēlu apstrādes programma “Paint 3D”. Projekta ietvaros šī metode tika izmēģināta, bet, tā kā augu izgriešana ir ļoti laikietilpīgs process, tika nolemts šo virzienu tālāk neattīstīt.



74. att. No fotoattēliem izgriezti burkāna dīgstu attēli

3. Nezāļu atpazīšana un to atrašanās pozīciju noteikšana

Lai nodrošinātu robota darbību reālā laikā, kā viens no nozīmīgākajiem RVS centrāliem blokiem ir robota augu detektēšanas sistēma. Tās izveides un darbības procesa shēma sastāv no šādiem galvenajiem secīgiem posmiem: augu attēlu iegūšana, attēlu priekšapstrāde un marķēšana, dziļā neironu tīkla apmācīšana. Zemāk dots katra posma īss raksturojums projekta ietvaros.

Attēlu ieguvei sākotnējai apmācības kopai tika izmantotas Intel RealSense D435, Canon EOS 800D, Canon PowerShot G16 un Sony W800 digitālās RGB kameras. Ar kamerām Intel RealSense D435 un Sony W800 tika iegūti augu attēli lauku apstākļos, bet ar Canon EOS 800D un Canon PowerShot G16 kontrolētos apstākļos. Lauku apstākļos attēli tika iegūti Ķekavas, Rūjienas un Krimuldas novados, bet kontrolētos apstākļos Jelgavā. Iegūto attēlu izšķirtspējas bija atšķirīgas kā 720x1280, 1000x750, 640x480, 640x360 u.c. Jāpiezīmē, ka attēlu punktu izšķirtspēja pirms attēlu apmācības dziļā neironu tīkla ieejā tika pārrēķināta.

Attēlu marķēšanai tika pielietots “objektu izgriezuma princips”. Augu marķēšana datu kopas izveidei tika veikta manuāli, izmantojot *python* un *cv2*, *xml.etree.ElementTree* bibliotēkas. Projekta ietvaros tika sagatavotas vairākas attēlu kopas. Kā viena no attēlu kopām tika izveidota datu kopa, sastāvoša no 1118 marķētiem attēliem, kuros tika klasificēti seši kultūraugi un astoņas nezāļu sugas, kopumā tikai iegūtas 7853 anotācijas, kas apkopota projekta SCOPUS publikācijā⁶. Tāpat augu detektora izveidei tika lietota projektā izveidotā atvertā datu kopa⁷.

3.1. Algoritmi augu atpazīšanai

Lai robota datorredze atpazītu nezāles no kultūraugiem, tas ir jāapmāca. Augu atpazīšanai attēlos apmācībai tika izmantota vienas pakāpes pielāgots konvolūcijas dziļo neironu tīkls (CNN) YOLOv2 un YOLOv4⁸. Izmaiņas arhitektūrā tika veiktas, palielinot tā ieejas slāņu skaitu un pielāgojot atbilstošu atpazīšanas izeju nepieciešamajām detektēšanas klasēm. Turklāt augu atpazīšanas sistēma konfigurēta tādā veidā, lai apstrādātu attēlus ar 1216x1216 punktu izšķirtspēju. Lai gūtu priekšstatu attiecībā uz izvēlēto pielāgoto konvolūcijas neironu tīkla “dziļumu”, vērtīgi atzīmēt, ka tas sastāv no 21 konvolūtīvā slāņa.

Kā citus pamata apmācības raksturlielumus jāmin, - tīkla apmācības ātrums 0,0001, *batch* 8. Apmācībai tika izmantoti 90%, bet validācijai 10% no datu kopas attēliem. Objektu atpazīšana attēlos veikta ar *Darkflow* izstrādes ietvaru⁹ un pamatā ir lietota programmēšanas valoda *python*. Apmācība veikta uz EDI rīcībā esošā HPC (*High Performance Computer*) servera, kas nodrošina nepieciešamo grafisko veiktspēju, lai apmācītu neironu tīklus.

⁶ Sudars, K., Jasko, J., Namatevs I., Ozola L., Badaukis, N. (2020). Dataset of annotated food crops and weed images for robotic computer vision control, *Data in Brief*, 31. doi:10.1016/j.dib.2020.105833

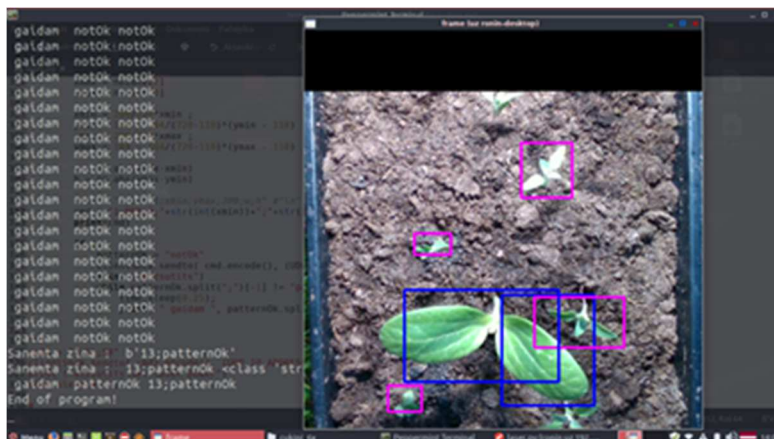
⁷ <https://makonis.edi.lv/s/kiwBSk78C8iY94W>

⁸ <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>

⁹ <https://github.com/thtrieu/darkflow>

Augu atpazīšanas sistēma attēlos

Projekta gaitā tika izstrādātas sešas augu atpazīņu versijas, veicot apmācību uz dažādām projektā izveidotām augu datu apmācības kopām, ko noteica, definējot dažādas augu detektēšanas klases (75.attēls).



75. att. Nezāļu un kultūraugu detektēšana.

Kā 75. attēlā redzams augu detektora programmas izsaukšanas darbības interfeiss sastāv no augu attēla un papildus informācijas programmatūras konsoles, kurā tiek sniegta informācija par koda izpildes un nezāļu ierobežošanas gaitu. Zemāk 76. attēlā dots augu detektora attēlos piemērs.

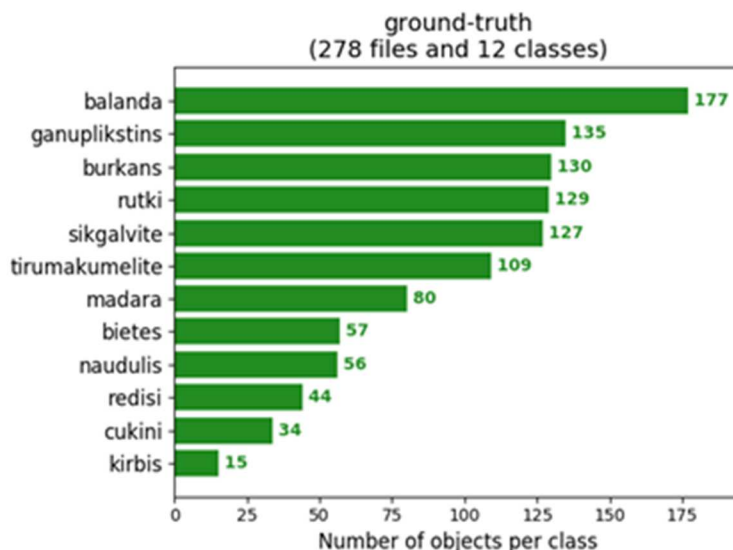


76. attēls. Augu detektēšana.

Iespējams redzēt, ka tiek izgriezti, ierāmēti un atšķirti atpazītie kultūraugu un nezāles.

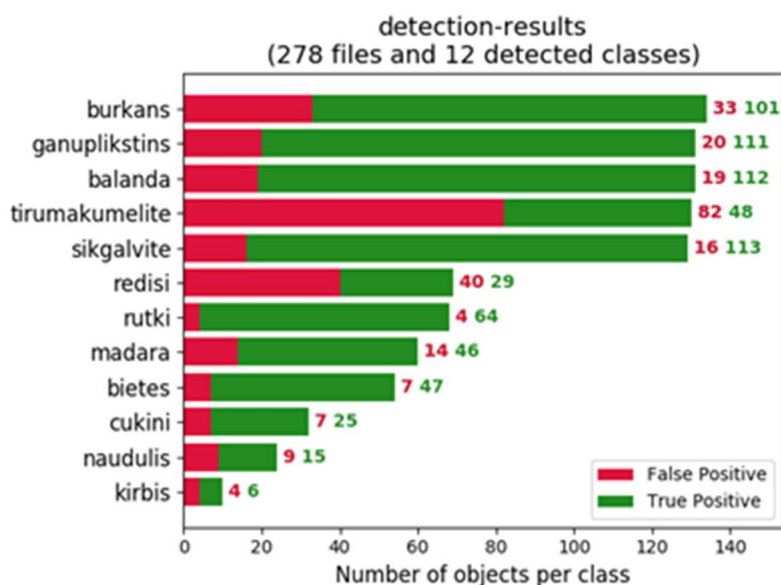
Augu atpazīšanas sistēmas detektēšanas rezultāti

Augu atpazīšanas sistēmas detektēšanas rezultātu apkopojuma absolūtajās frekvencēs slokšņu diagrammā uz vienas no testa datu kopas (n testa datu kopa) skat. 77. attēlā.



77. att. Detektēšanas atpazinēja augu sadalījuma pa klasēm, n testa kopa

Zemāk 78. attēlā diagrammā parādīta apmācībā izmantotās datu kopas sadalījums pa klasēm un objekta detektēšanas precizitāte, fiksējot veiksmīgi atpazīto un kļūdaini atpazīto objektu skaitu.



78. att. Detektēšanas atpazinēja augu sadalījuma pa klasēm un klašu detektēšanas precizitāte, n testa kopa

Šādi objektu atpazīšanas rezultāti sasniegti tikai ar pēdējām atpazinēja versijām. Tas izskaidrojams, ka bija nepieciešams laiks, lai izveidotu pienācīgu dziļā neironu tīklu datu apmācības kopu. Kā arī, lai pieskaņotu atbilstošu konvolūciju neironu tīkla atpazinēja arhitektūru un hiperparametrus. Jaunākā augu atpazinēja versija ir pieejama uz Elektronikas un datorzinātņu institūta servera¹⁰.

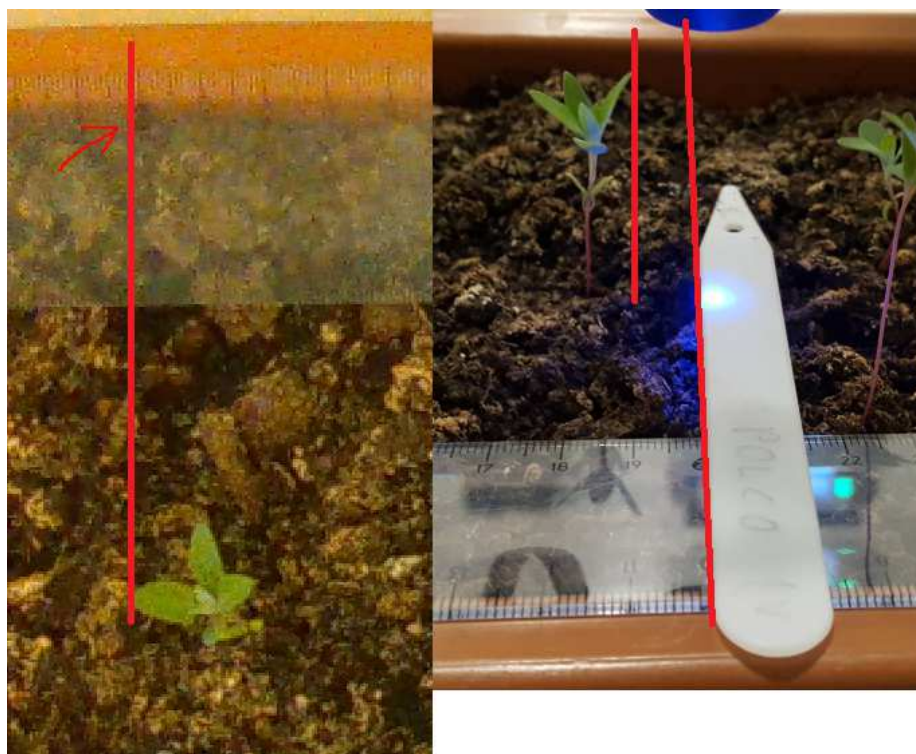
¹⁰ http://git.edi.lv/kaspars.sudars/ronin_weed_detector

Lai augu atpazīšanas sistēma nevainojami darbotos ir jāņem vērā visi faktori, apstākļi un nosacījumi, kas nosaka un sastāda augu apmācības datu kopu. Kā piemēri jāmin, augu attīstības stadija, attēlu ieguves parametri u.tml. Tie savukārt ir cēloņi, kas definē, kādas attēlu marķēšanas vadlīnijas izvēlēties un izveidot prasībām atbilstošas kvalitātes objektu atpazīņus attēlos.

No augu atpazīņja iegūtās nezāļu koordinātas tiek pārrēķinātas no pikseļiem uz cm dabā un uz šīm koordinātām tiek virzīts vai nu lāzers, vai mehāniskās ierobežošanas rīks.

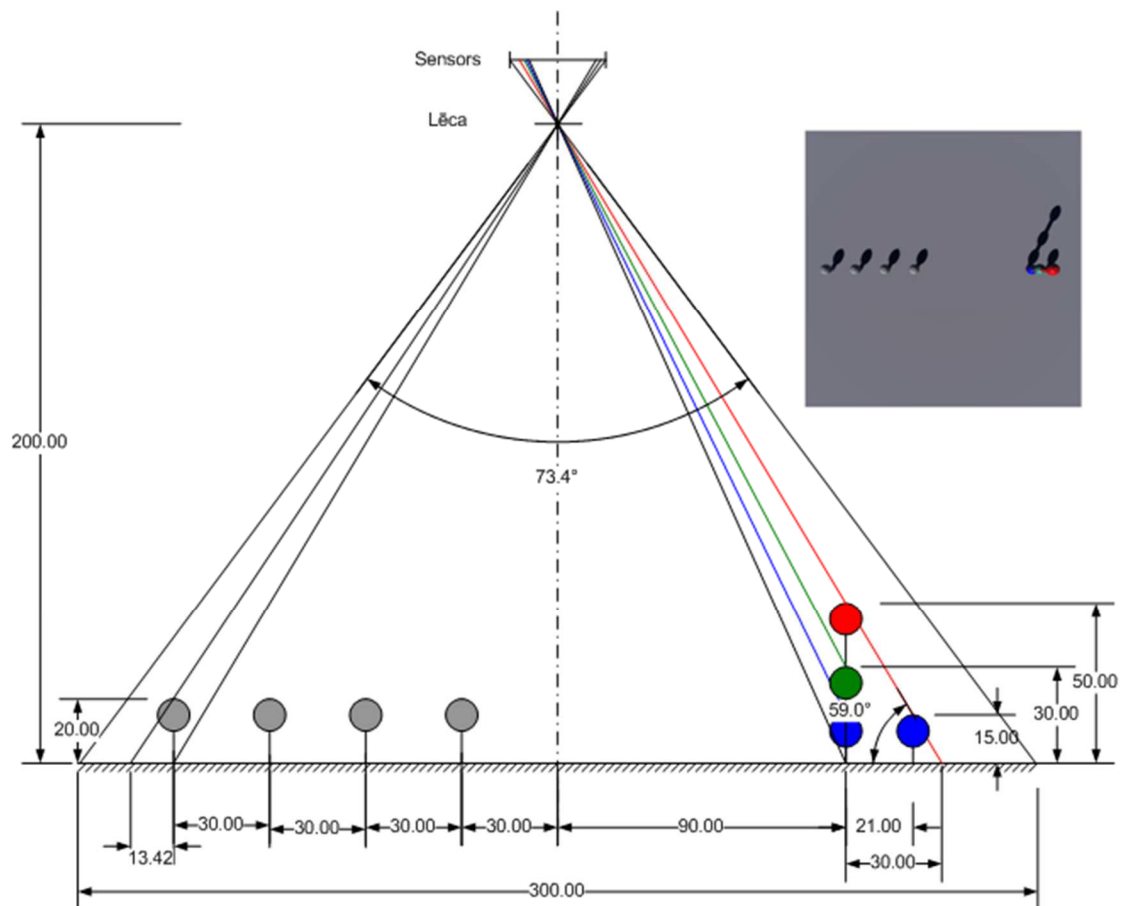
3.2. Nezāles atrašanās koordināšu 3D telpā noteikšana

Lāzera manipulators attiecībā pret nezālēm tika vērsts vertikāli, imitējot scenāriju ar mobilās robota platformas lāzera stara kustības virzienu. Arī fotoattēlu uzņemšana notiek virsskatā attiecībā pret augiem. Šādā konfigurācijā jārisina optiskās perspektīvas parādība, kad augs atkarībā no atrašanās vietas attiecībā pret kameru dažādi izskatās uzņemtajā fotoattēlā. Jo augstāks augs, un jo tālāk augs atrodas uz sāniem no kameras optiskā centra, jo lielāks perspektīvas efekts, kas programmātiski jākompensē, lai precīzi trāpītu ar lāzeri uz auga virsmas. Perspektīvas efektu var redzēt 79. attēlā. Faktiskā atšķirība uz lineāla sastāda aptuveni 1 cm, kā rezultātā nekompensējot šo starpību lāzera trāpītu garām.



79. attēls. **Perspektīvas efekts.** Pa kreisi attēls skatā no augšas, kur sarkanā līnija norāda uz auga robežu. Pa labi attēls skatā no sāniem, kur labā sarkanā līnija sakrīt ar kreisā attēla sarkano līniju, savukārt kreisā sarkanā līnija parāda faktisko auga robežu.

Perspektīvas efekts rada situāciju, kad augsta objekta punkti sakrīt ar punktiem attēlā, kuri ir nobīdīti no kameras centra. Shematiski tas ir parādīts 80. att. Objekts ar sarkano riņķi galā kameras skatā (pelēkais kvadrāts) pilnībā pārklāj 15 mm augsto objektu ar zilo riņķi, kurš atrodas pa labi no tā.

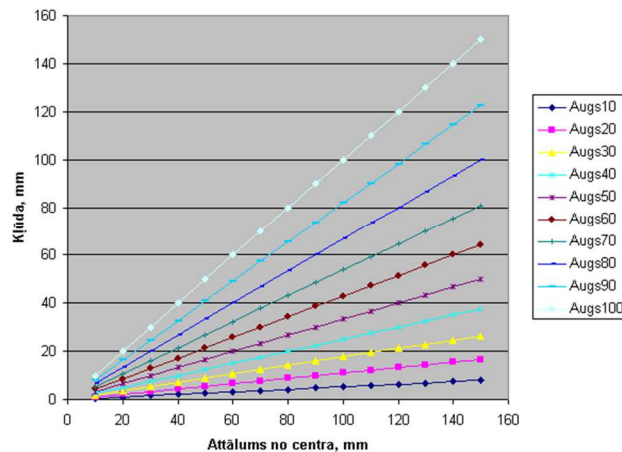
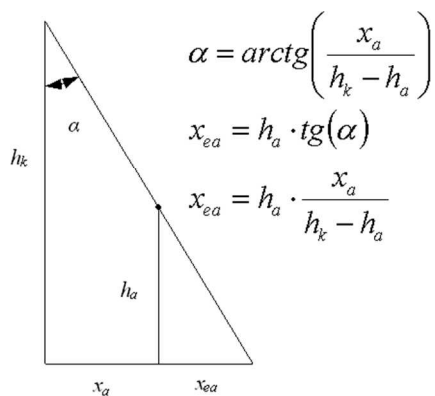


80. att. Objektu pārklāšanās dēļ perspektīvas kameras skatā, visi izmēri milimetros, atbilstoši projektā plānotai robota konfigurācijai

Pārklāšanās efektu ir iespējams aprēķināt ar trigonometrijas palīdzību pēc algoritma, kas dota 81. att. Blakus grafikā redzamas aprēķinātās nobīdes x_{ea} atkarībā no attāluma līdz kameras optiskajam centram. Piemēram, augiem ar 30 mm augstumu šī nobīde sastāda aptuveni 20 mm, ja tie atrodas 150 mm attālumā no centra (pie 300x300 mm apstrādes laukuma).

Perspektīves radītā problēma ir risināma divos veidos.

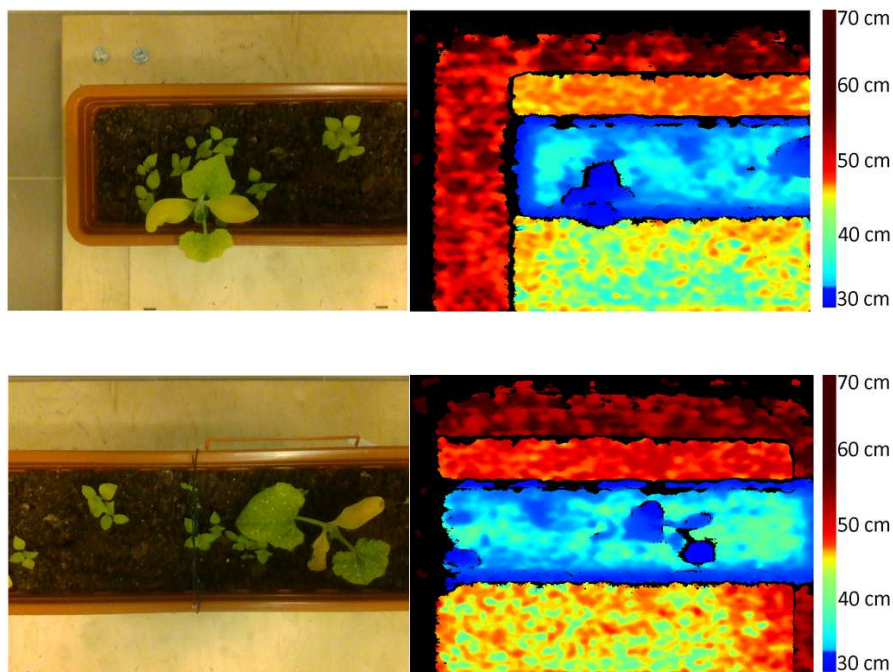
- veikt augu augstuma mērījumus, piemēram, ar dziļuma kameru vai ar divām kamerām (stereo redze);
- pieņemt vidējo augu augstumu ar kuru tiks strādāts un rēķināties ar nobīdes kļūdu.



81. att. Perspektīves nobīdes aprēķini dažāda augstuma augiem: x_a - auga attālums no centra; h_k - kameras augstums (200 mm); α - auga galotnes redzamais leņķis; h_a - auga augstums; x_{ea} - kamerā redzamā nobīde

Dziļuma kameras izmantošana

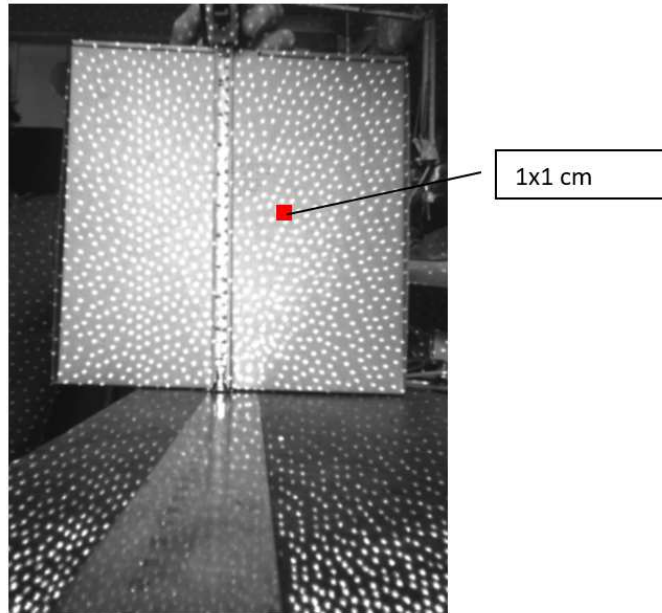
Augu 3D formas un pozīcijas telpā noteikšanas funkcionalitāte tika realizēta, izmantojot Intel RealSense D435 dziļuma kameru. Informācija par augu 3D formu un pozīciju telpā nepieciešama, lai varētu kompensēt ierobežojošo iekārtu pozicionēšanas nobīdi, kura rodas dēļ perspektīvas efekta 2D attēlā augiem virs zemes plaknes. Uzņemto attēlu paraugi RGB un dziļuma diapazonā doti 82. att.



82. att. RGB attēls un dziļuma attēls ar attālumiem līdz kamerai

Izmantotās dziļuma kameras darbības pamatā ir aktīvā infrasarkanā stereo dziļuma mērīšana, kura izmanto lāzera emiteru, lai projicētu punktu režģi, pēc kura deformācijām nosaka katra attēla punkta attālumu no kameras. Režģa izmantošana uzlabo lielu objektu

attāluma noteikšanas precizitāti. Tomēr ne visi augi var tikt detektēti ar šādas pieejas palīdzību, jo režģa solis robotam paredzētajā darba attālumā (40 cm) pārsniedz 1 cm, kas definē minimālo detektējamo objektu izmēru (skat. 83. att.).



83. att. RealSense D435 projicētais dziļuma noteikšanas režģis 40 cm attālumā

Ņemot to vērā, šādas dziļuma kameras izmantošana ir lietderīga augiem, kuri ir vismaz 4x4 cm un lielāki.

3.3. Attēlu apstrāde, lai pārbaudītu nezāles iznīcināšanu

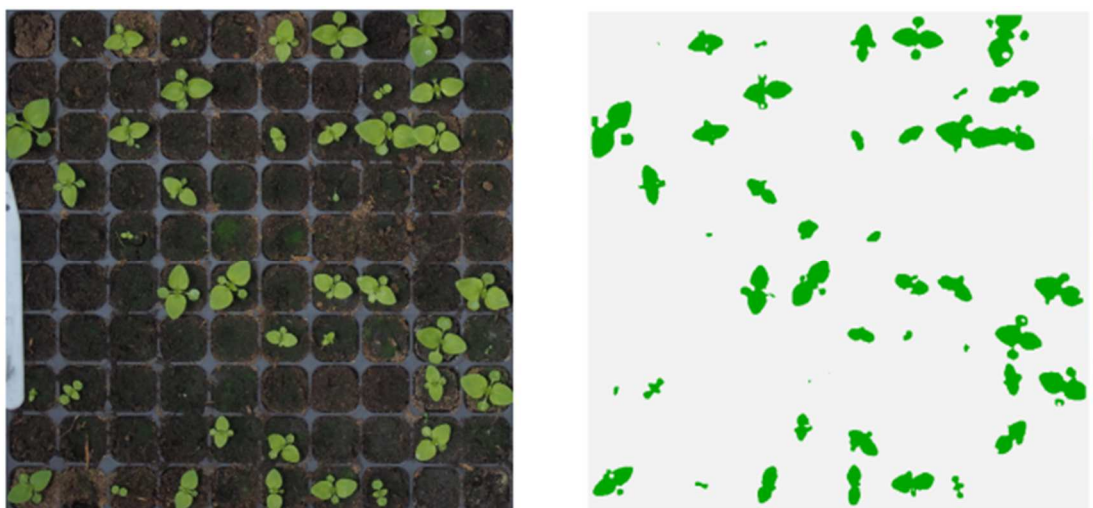
Lai novērtētu to vai nezāļu ierobežošanas agregāts ir apstrādājies nezāli, tika izveidots algoritms, kas fotogrāfijās pirms un pēc auga apstrādes un ļauj novērtēt kopējo augu zaļo daļu laukumu. Šim nolūkam tika izveidots skripts "R statistics" vidē. Par pamatu tika ņemts augu zaļās krāsas indekss¹¹. Zaļā augu masa tika identificēta pēc sekojošas formulas:

$$I = \frac{2G - R - B}{2G + R + B},$$

kur I – zaļās masas indekss

R, G, B – krāsu komponentes sarkans, zaļš zils.

84. att. dots piemērs ar zaļā laukuma identificēšanas skripta rezultātu. Lai panāktu attēlu savstarpēju salīdzināmību, visi eksperimentālie augi tika fotografēti stingri no viena augstuma, nemainīgā apgaismojumā, precīzu augu kastes novietojuma pozīciju pret fotoaparātu un nemainīgiem fotoaparāta iestatījumiem (palielinājums, atvērums, ekspozīcijas laiks un ISO jutība).



84. att. Krāsu fotogrāfija (pa kreisi) un augu zaļā laukuma noteikšana (pa labi)

No attēla izgūtie zaļie pikseļi tiek izteikti skaitliskā vērtībā - indeksā un ir iespējams aprēķināt augu zaļā laukuma indeksa izmaiņas pirms un pēc apstrādes.

¹¹ A database for remote sensing indices. [tiešsaiste][26.01.2021] Pieejams: <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=35>

4. Nezāļu ierobežošanas iekārtas pozicionēšanas un orientēšanas moduļu izstrāde

Lai nodrošinātu robota autonomu darbību, iekārtai nepieciešams orientēties apkārtējā vidē un spēt virzīties pa zemnieka uzdotu maršrutu. Līdzīgi kā citiem autonomiem transportlīdzekļiem robota pozicionēšanai pamatā tiek lietota satelītnavigācijas sistēma, kas papildināta ar kultūrauga vagas (rindas) atpazīšanas algoritmu. Atšķirībā no viedtālrunos lietotās satelītnavigācijas sistēmas, kuras precizitāte aptuveni 2-4m, GNSS-RTK moduļi atkarībā no apkārtējās vides, spēj darboties ar precizitāti līdz pat 3 cm. Tas nodrošina, ka robots virzīsies pa definēto maršrutu ar augstu precizitātes pakāpi.

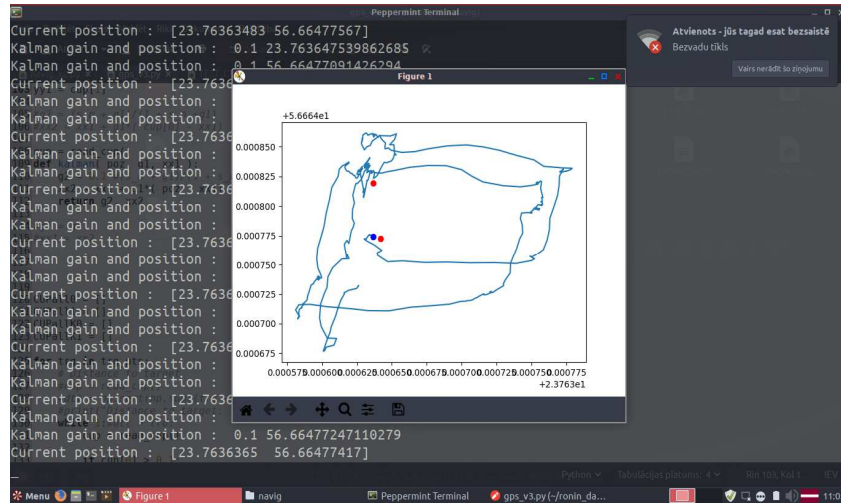
4.1. GNSS RTK robota vadīšanas moduļa un algoritmu izstrāde

Lai nodrošinātu robota autonomu pārvietošanos no bāzes vietas līdz lauka sākumpunktam, kā arī veiktu kustību pa vagām, robots izmanto satelītnavigāciju. Plašāk zināmā no globālās navigācijas satelītu sistēmām (GNSS) ir Amerikas Savienoto Valstu uzturētā Globālās pozicionēšanas sistēma (GPS), bet papildus tai darbojas arī Galileo (Eiropa), GLONASS (Krievija) un BeiDou (Ķīna) sistēmas, kuru satelītu signālus arī ir iespējams izmantot. Satelītnavigāciju papildinot ar reālā laika kinemātikas (RTK) funkciju, ir iespējams noteikt robota atrašanās vietu ar <10 cm precizitāti un atbilstoši koriģēt robota kustības gaitu. Lai izveidotu maršrutu robotam, nepieciešama GNSS punktu koordinātu ierakstīšana robota atmiņā. Kad robota navigācijas sistēma pārslēgusies precīzajā režīmā, robots spēj pārvietoties pa definēto maršrutu ar augstu precizitātes pakāpi. Lai nodrošinātu robota darbības precizitāti, t.i., lai GNSS RTK sistēma spētu darboties augstās precizitātes režīmā, ir nepieciešama GNSS RTK bāzes stacija. Tās uzdevums ir sūtīt robotam tā atrašanās vietas pozīciju korekcijas.

GNSS RTK moduļu izvēle un precizitātes novērtējums.

Projekta ietvaros tika izvērtēti dažādi tirgū pieejamie GPS RTK risinājumi, kuri gan precizitātes, gan cenu līmeņa ziņā būtu piemēroti uzstādīšanai uz robota. Kā atbilstošs tika izvēlēts u-blox ražotāja C94-M8P modulis¹², kas atbalsta bāzes stacijas un mobilās platformas konfigurācijas iespēju. Iekārtas testi parādīja, ka iekārta ir precīza, un spēj nostabilizēties augstās precizitātes režīmā, vienlaikus ir ar salīdzinoši zemu stabilitāti. Iekārta pārsvarā atradās zemāka līmeņa precizitātes režīmā, un ļoti reti spēja nostabilizēties vajadzīgajā precizitātes režīmā. Stabilitātes uzlabošanai tika veikti testi ar Kalmana filtra pielietošanu (skat. 85. att.).

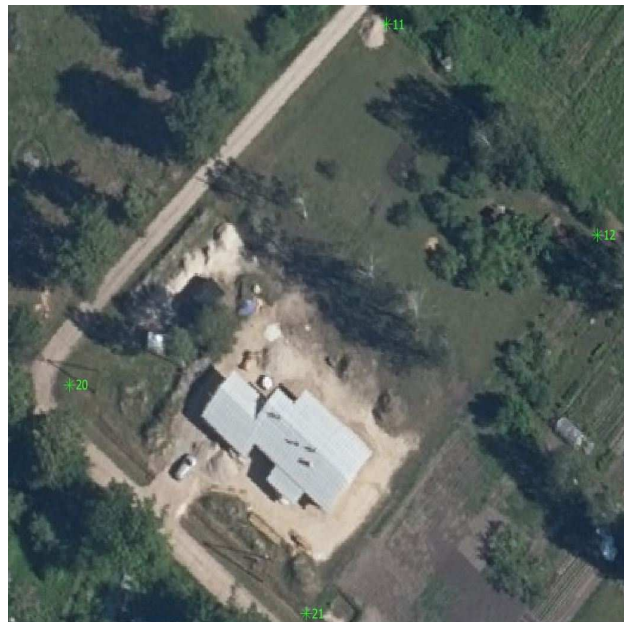
¹² <https://www.u-blox.com/en/product/c94-m8p>



85. att. GPS RTK mērījumi un stabilitātes uzlabošana ar Kalmana filtru

Projekta gaitā GPS RTK iekārtu tirgū kļuva pieejams nākamās paaudzes u-blox modulis C099-F9P¹³. Balstoties uz produkta tehniskajiem aprakstiem, tika secināts, ka tam vajadzētu būt stabilākam par savu priekšgājēju. Divi C099-F9P moduļi tika sakonfigurēti bāzes un mobilās platformas režīmā, un tika veikti analogiski signāla un precizitātes režīma stabilitātes testi. Tika secināts, moduļi tiešām darbojas stabili, un saglabāja augsto precizitātes režīmu, tiklīdz tas tika sasniegts.

C099-F9P modulis tika izvēlēts turpmākiem eksperimentiem, kā piemērotāka iekārta precizitātes un veiktspējas dēļ. Vispirms tika veikts koordinātu noteikšanas tests statistiskā režīmā. Šim nolūkam tika uzņemti četri punkti dabā ar C099-F9P iekārtu un pārbaudīti pret iepriekš uzņēmām punktu koordinātām. Vispirms QGIS rīkā¹⁴ tika atzīmēti punkti (skatīt 86. att.)



86. att. GNSS RTK precizitātes tests ar uzņēmām punktu koordinātām

¹³ <https://www.u-blox.com/en/product/c099-f9p-application-board>

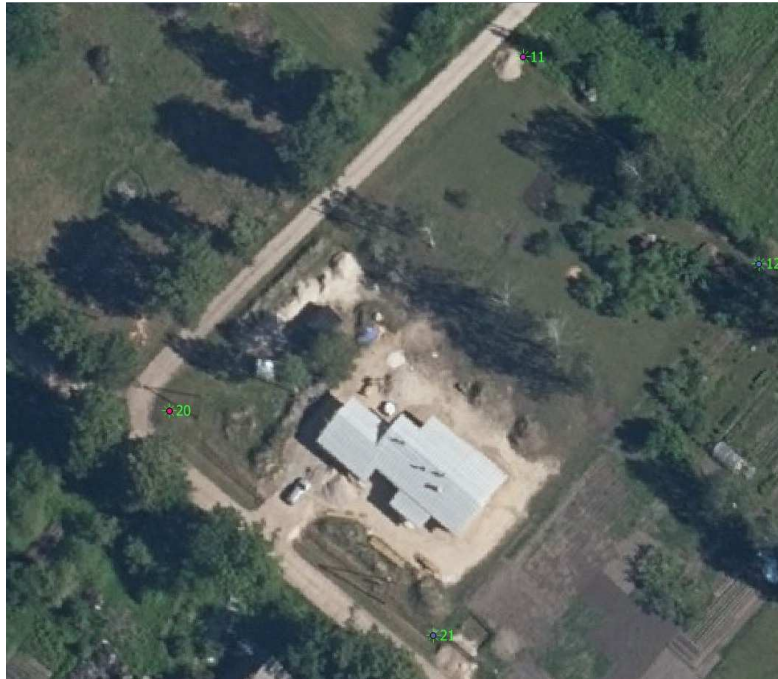
¹⁴ <https://qgis.org/en/site/>

Viens no C099-F9P moduļiem, kas bija nokonfigurēts kā references bāzes stacija tika novietots uz paaugstinājuma, lai nodrošinātu moduļu savstarpējo komunikāciju, bet ar otru moduli, kas bija nokonfigurēts mobilās platformas režīmā, tika secīgi pārvietots pa izvēlētajiem punktiem. Katrā punktā tika ierakstīts nomērīto GPS koordinātu žurnālfails, tālākai apstrādei un datu attēlošanai QGIS rīkā. Tālāk tika veikts koordinātu noteikšanas tests dinamiskā režīmā, pārvietojot moduli un tādā veidā imitējot mobilās platformas kustību. Visu mērījumu žurnālfailu saturu var redzēt 10. pielikumā. Iegūtie dati tika papildus pievienoti QGIS rīkā jau atzīmētajiem punktiem kartē (skatīt 87. att.).



87. att. GNSS RTK precizitātes testi - novērojama konstanta koordinātu nobīde X un Y ass virzienā.

Ekspierimentu rezultātos tika novērota konstanta koordinātu nobīde, kas skaidrojama ar to, ka uz testu brīdi modulim, kas bija nokonfigurēts kā references bāzes stacija, nebija iestatītas fiksētas antenas ģeogrāfiskās koordinātas. Šajā eksperimentā bāzes stacija pati noteica savu atrašanās vietu noteiktu laiku, līdz tika sasniegta minimālā iestatītā precizitāte. Kad minētie nosacījumi izpildījās, bāzes stacija pārgāja raidīšanas režīmā līdz ar to otra moduļa GNSS koordinātu absolūtā precizitāte ir tieši atkarīga no pirmā moduļa noteiktajām GNSS koordinātām kalibrēšanas režīmā. Pēc 10 dienām tika veikts atkārtots eksperiments statiskā režīma precizitātes novērtēšanai. Šajā reizē references bāzes stacijas koordinātas tika iestatītas statiskas, par pamatu ņemot uzmērītās koordinātas, tādējādi šim modulim vairs nebija jāveic paškalibrācija. Mērījumi līdzīgi kā pirmajā eksperimentā tika saglabāti žurnālfailos (skatīt 11. pielikumu) un dati tika pievienoti QGIS rīkā. Pateicoties fiksētām bāzes stacijas antenas koordinātām, otrā moduļa GNSS koordinātas ir daudz precīzākas un kļūda bija samazinājusies no aptuveni 2.5 m līdz 13 cm ņemot vērā mērījuma kļūdu un uzmērīto punktu precizitāti dabā (skatīt 88. att.).



88. att. GNSS RTK otrie precizitātes testi - koordinātas sakrīt 13 cm robežās.

Starp precizitātes eksperimentiem notika dinamiskā režīma eksperiments Agrihorta teritorijā. Šajā eksperimentā tika novērtēta relatīvā moduļa precizitāte un atkārtojamība. Laukumā pie Agrihorta ēkas tika izveidota ģeometriskā figūra - astoņstūris (skatīt 89. att.).



89. att. GNSS RTK relatīvās precizitātes testi Agrihorta teritorijā.

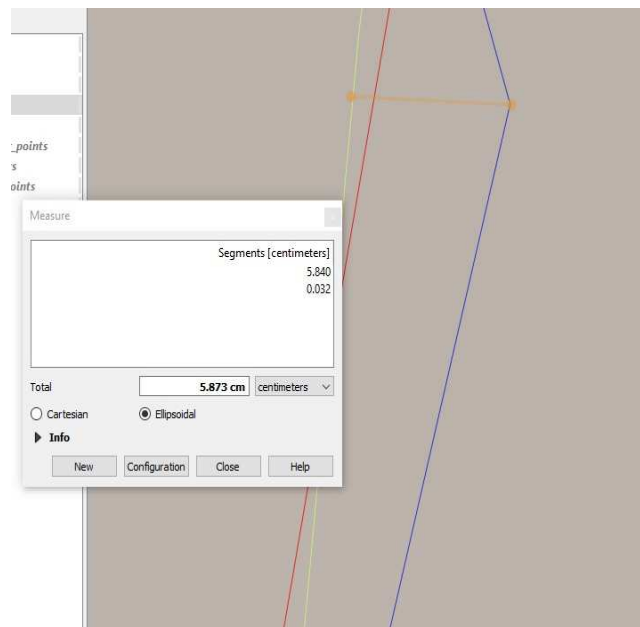
References bāzes stacijas modulis tika novietots brīvi izvēlētā vietā, savukārt mobilā robota pārvietošanās imitācijas moduļa antena tika piestiprināta koka vadīklai un vadīkla tika pārvietota pēc iespējas stabili un precīzi attiecībā pret izveidoto astoņstūri. Tika veikti trīs apli

un mērījumi saglabāti žurnālfailos (skatīt 12. pielikumu) vēlākai attēlošanai QGIS rīkā (skatīt 90. att.).



90. att. GNSS RTK relatīvās precizitātes testu 3 atkārtojumi

Atkārtojumi liecina par augstu precizitāti un mērījumu atkārtojamību. Ņemot vērā mērījuma kļūdu, antenas pārvietojuma kļūdu nobīde starp atkārtojumiem nepārsniedz 10 cm (skatīt 91. att.).

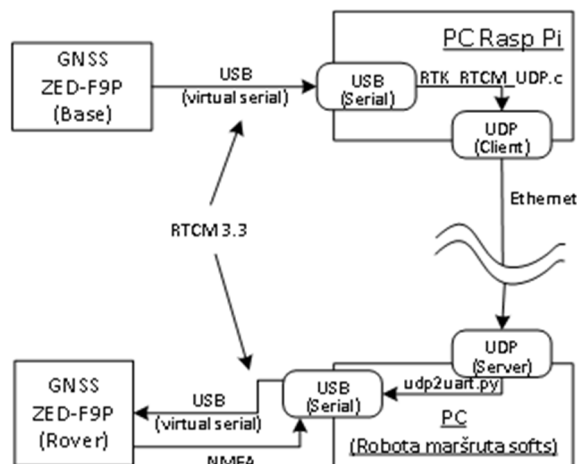


91. att. GNSS RTK relatīvās precizitātes testu trīs atkārtojumu trajektorija tuvplānā

GNSS RTK vadības shēma

Satelītnavigācijas sistēmas izmantošanai robotam tika izmantota 92. attēlā redzamā shēma. GNSS ZED-F9P moduļi ir pieslēgti pie datoriem *Raspberry Pi* (kontrolē bāzes staciju)

un robota borta datoram Jetson. Savienojumu starp datoriem veido LAN tīkls, bet paši GNSS moduļi savienoti ar datoriem caur USB portiem.



92. att. Bāzes stacijas (attēlā Raspberry Pi) savienošanas shēma ar robota borta datoru (attēlā PC)

Lai nodrošinātu veiksmīgu robota sistēmas darbību un to, ka tā spēs sasniegt nepieciešamo precizitātes pakāpi statiskos apstākļos, navigācijas sistēma pirms uzstādīšanas uz robota platformas tika testēta EDI, skat 93. attēlā. Navigācijas programmatūras moduļi pēc tam tika testēti uz robota platformas jau pietuvinātā darbības vidē.

Visa programmatūra, kas izstrādāta robota vadīšanai caur GPS punktiem, ir uzstādīta uz robota Jetson borta datora un pieejama kopā ar robotizēto nezāļu ierobežošanas sistēmu. Vadības programmatūras kods ir pieejams uz EDI servera¹⁵.



93. att. GNSS-RTK moduļu izmēģināšana uz EDI ēkas jumta pirms uzstādīšanas uz robota platformas

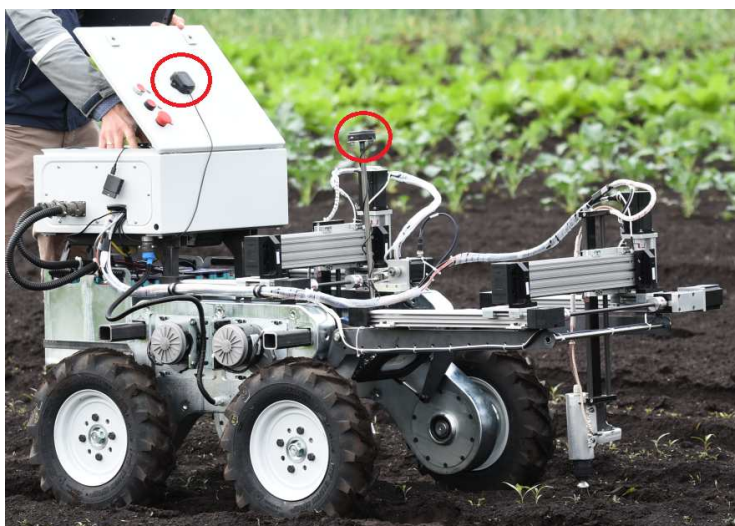
¹⁵ <https://makonis.edi.lv/s/gY8sT56nWpEa7GH>

Robota satelītnavigācijas vadīšanas moduļa izstrāde sākumā tika veikta ar V1 platformu, testējot gan vienas, gan divu antenu izmantošanas iespējas.



94. att. Satelītnavigācijas algoritmu testi ar V1 platformu

Precīzas pozīcijas noteikšanai uz robota ir uzmontētas divas simetriski novietotas GNSS antenas. Tādā veidā pozīcija ar augstu precizitātes pakāpi tiek noteikta divos punktos. Šāds risinājums dod iespēju noteikt ne tikai robota atrašanās vietu, bet arī robota atrašanās virzienu (atšķirt robota priekšu no aizmugures). Tas ir būtiski, lai nodrošinātu to, ka robota platforma ir pagriezta ar pareizo pusi brūkšanas virzienā.



95. att. Uz robota uzstādītas divas GNSS antenas (iezīmētas ar sarkaniem apliem)

Izmantojot robota vadības planšeti, iespējams ierakstīt maršruta punktus, pa kuriem robotam jādodas no bāzes vietas līdz lauka sākumpunktam, kā arī vagu koordinātas. Izmantojot saglabātos koordinātu punktus, robots autonomi spēj pārvietoties pa vēlamo maršrutu. Vairāk par robota vadības saskarni lasāms 5. nodaļā.

4.2. Vagu virziena atpazīšanas algoritms

Lai veiktu robota autonomu vadīšanu pa vagu, konkrētos gadījumos papildus GNSS-RTK sistēmai pielieto vagu atpazīnēja korekciju. Tā tiek rēķināta šādi, vispirms vagu atpazīnējs ieejā saņem attēlu, kā ir parādīts 96. att. Tālāk tiek aprēķināts robota virziens no tā centra virzienā uz vagas centru, kā tas parādīts 97. att.



96. att. Vagu virziena atpazīšanas sistēmas ieejas attēla piemērs

Projekta laikā tika izskatītas vairākas pieejas, kā veidot vagas atpazīšanas sistēmu. Tika eksperimentētas un analizētas praktiskai pielietošanai šādas pieejas. Sistēmas izejas tika veidotas: 1) kā signāli, kas tieši vada robotu, 2) kā divas rekomendācijas robotam nākamajā solī pagriezties vienu vienību pa labi vai pa kreisi, 3) kā vektors, kas norāda virzienu uz tuvākās vagas centru. Eksperimentu laikā kā veikspējīgākā izrādījās 3. pieeja, skat. 97. attēlu. Robota vadības programma no atpazīnēja saņem korekcijas vektoru un to izmantot robota gaitas korekcijā, braucot cauri iepriekš definētiem augstas precizitātes GPS punktiem.



97. att. No robota kameras frontāli uzņemts lauka attēls, zaļā līnija, - robota kustības virziens, sarkanā līnija, - vagu atpazīnēja ieteiktais robota griešanās virziens

Augstāk redzamajā attēlā parādīts vēlmais robota kustības virziens (zaļais vektors) un vagas virziena novērtējums no vagas atpazīšanas sistēmas (sarkanais vektors). Pēdējais iegūts

no robota kameras, kas piemontēta frontāli un simetriski robota garenasij pie tā priekšpusē robota kustības virzienā, ja šo virzienu attiecina robota kustības plaknei. Vairāk rezultātu atrodams EDI serverī¹⁶. Izstrādātais programmatūras kods sistēmas darbībai ir instalēts un darbojas uz RONIN robotizētās platformas borta datora.

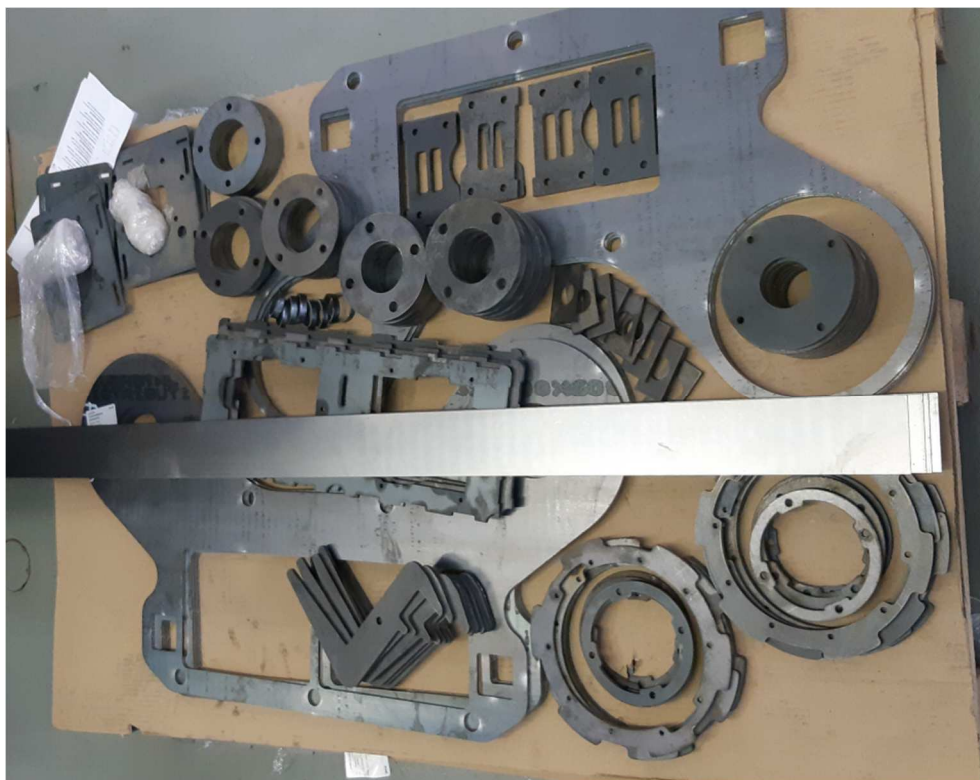
¹⁶ <https://makonis.edi.lv/s/gY8sT56nWpEa7GH>

5. Izstrādāto moduļu integrēšana un iekārtas testēšana lauka apstākļos

Pēc veiksmīgas atsevišķo mehānisko mezglu un programmatūras pamatelementu izstrādes, tika veikta robota konstruēšana un savietošana vienotā iekārtā.

5.1. Atsevišķo mezglu savietošana vienotā iekārtā un sistēmu atklūdošana.

Vienu daļu no detaļu rasējumiem nosūtīja uzņēmumam, kas nodarbojas ar metāla lāzergriešanu. Kad lāzergriešanas darbi veikti, gatavās (izgrieztās) metāla detaļas uz paletes atgādātas uz to turpmāko izgatavošanas un montāžas vietu, kas notika LLU Tehniskās fakultātes laboratorijas telpās.



98. att. Ar lāzergriešanas paņēmieni izgatavotās detaļas.

Tālāk visas metāla detaļas tika mehāniski apstrādātas, pieslīpētas griezuma vietas, veikti papildus urbumi un fāzējumi, iegrieztas vītnes utt. Vītņotie savienojumi tika izveidoti visos flančos, pie kuriem tiks pieskrūvēti vāki un citi elementi.

Paralēli mehāniskajiem sagatavošanas darbiem daļa no uzrasētajiem elementiem tika izgatavoti ar virpošanas vai frēzēšanas paņēmieni. Tika izvirpotas riteņu asis, riteņu rumbas, gultņu sēžu vietas, ķēžratu atloki un daudz un dažādas citas detaļas, kas nepieciešamas platformas izstrādei.

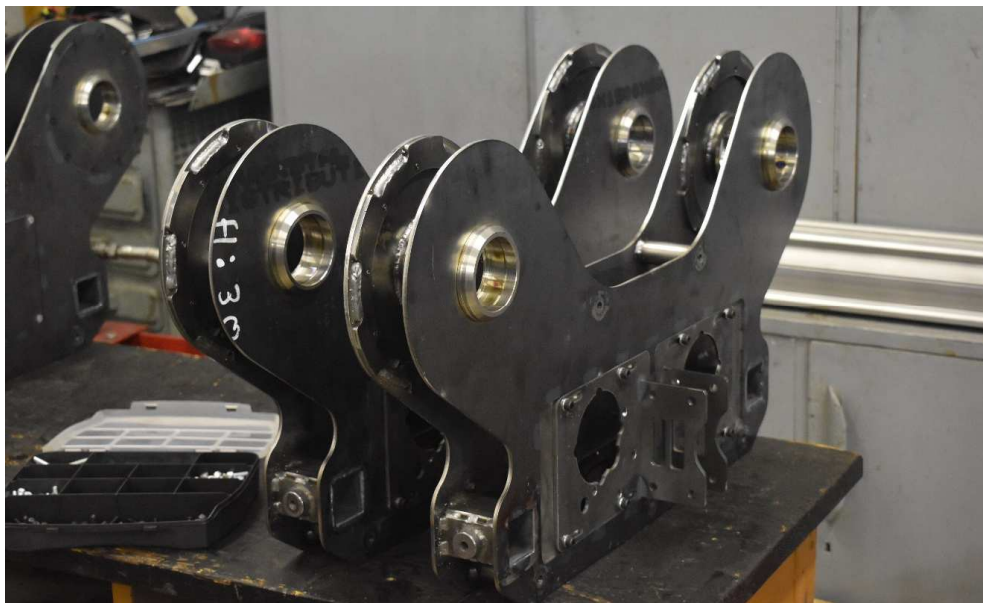
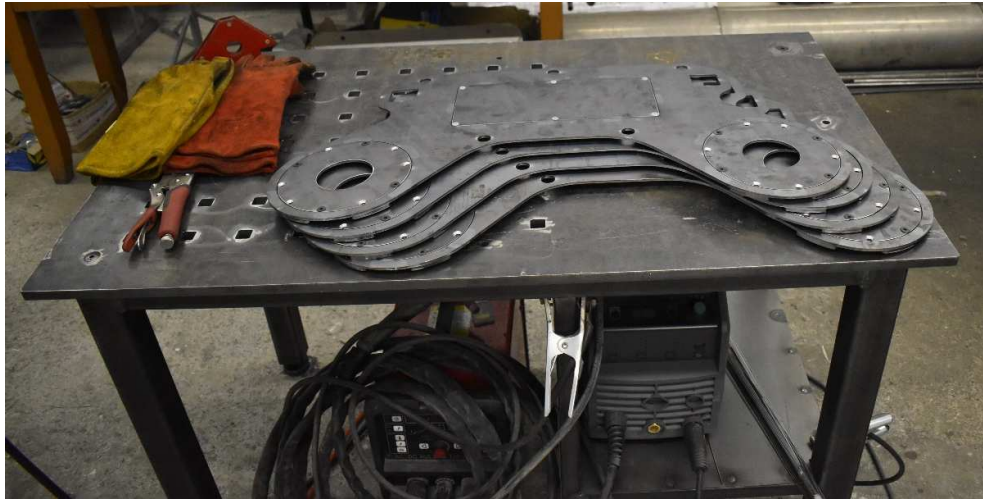


99. att. Detaļu mehāniska sagatavošana.



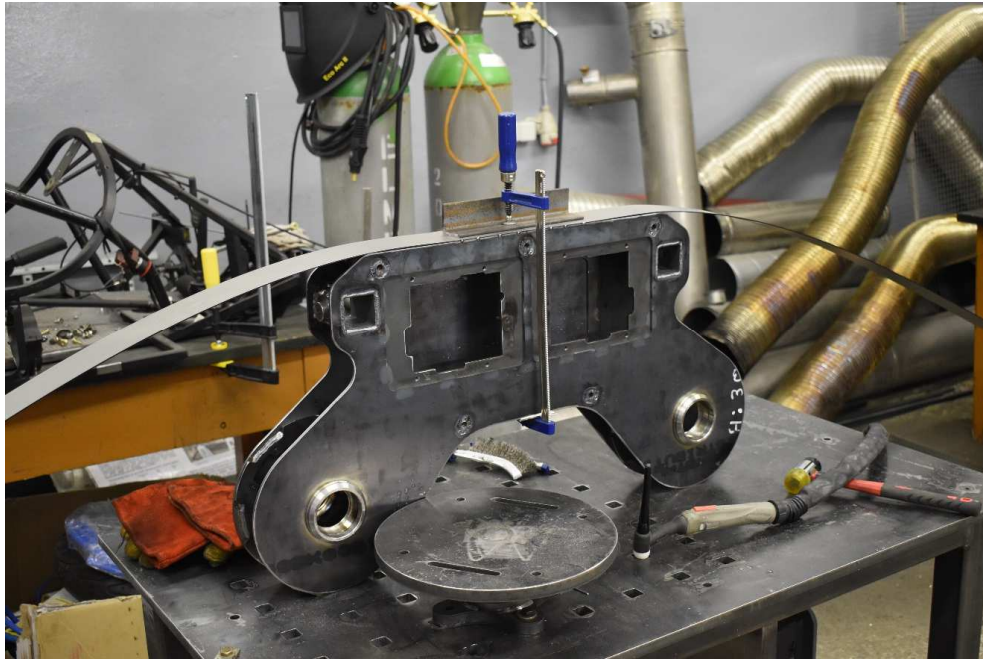
100. att. Daļa no izvirpotajām detaļām.

Tad, kad detaļas mehāniski sagatavotas, sākās detaļu metināšanas un montāžas process. Metināšanas veikta gan ar MIG/MAG paņēmienu, gan arī TIG paņēmienu. Sākotnēji sametināti atsevišķie elementi, kuru piekļuve nav iespējama pēc platformas sametināšanas, tad sāktas likt kopā platformas sānu bloku malas un tās sametinātas pie speciāli izvirpotiem distanceriem.

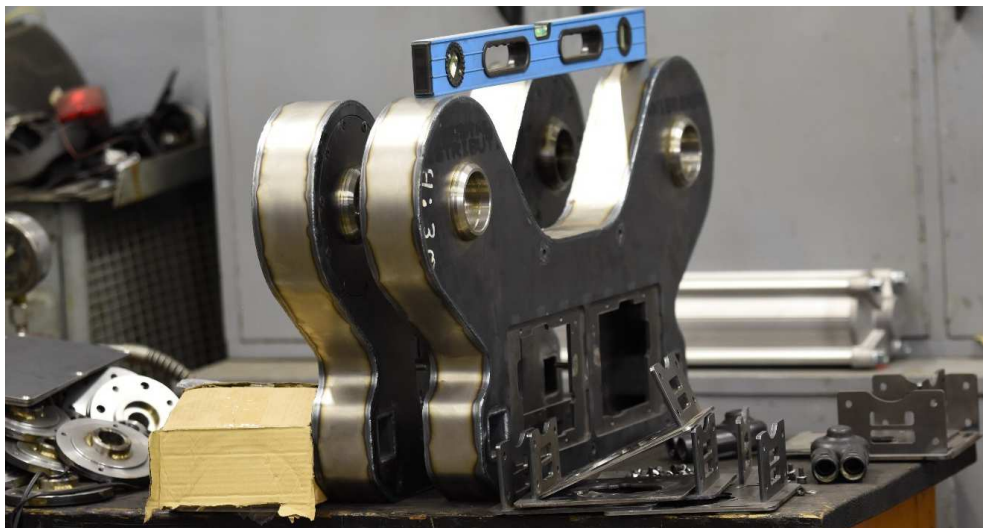


101. att. Sānu bloku izgatavošanas process – metināšanas darbi

Kā viena no noslēdzošām sānu bloku izgatavošanas sastāvdaļām ir aptverošās loksnes izlocīšana un piemetināšana pie sānu bloku malām. Ar šo darbību tiek noslēgti sānu bloka metināšanas darbi un šis bloks veidojas kā viena neizjauicama sastāvdaļa, pie kuras turpmākajā procesā tiks pieskrūvēti dažādi elementi un iemontēti piedziņas elementi.



102. att. Sānu bloku aptverošās loksnes izlocīšana un metināšana.



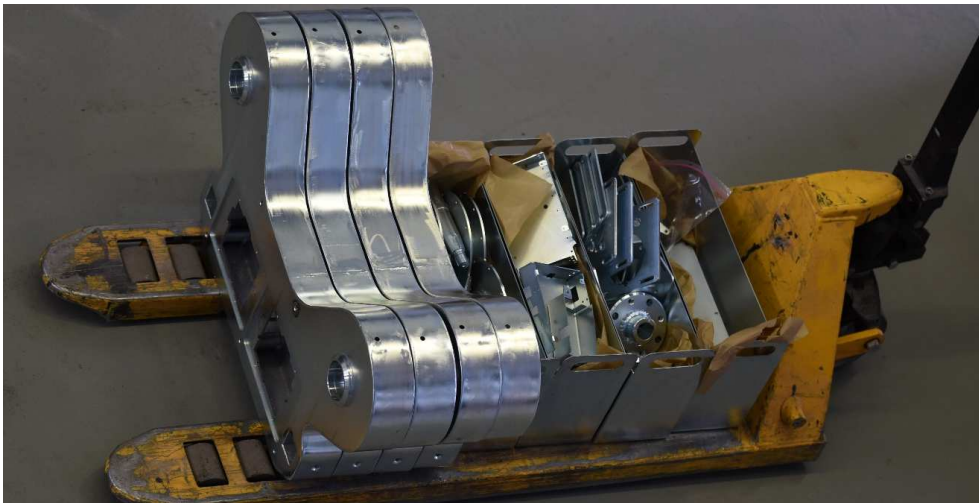
103. att. Atsevišķo elementu izskats pēc to metināšanas darbiem.

Tad, kad visas detaļas izgatavotas, tās tiek pieslīpētas, lai nebūtu nekādu nelīdzenumu vai metināšanas šļakatu. Tālāk visas platformas daļas tiek nogādātas uz uzņēmumu, kas veic detaļu cinkošanu.



104. att. Detaļas sagatavotas cinkošanai.

Šajā gadījumā izmantots aukstās cinkošanas paņēmiens, kas rada vizuāli pievilcīgāku metāla pārklājumu un nerada detaļas deformācijas cinkošanas laikā, kā tas var gadīties ar karstās cinkošanas paņēmienu.



105. att. Detaļas pēc cinkošanas.

Pēc cinkošanas visas detaļas atgādātas uz to turpmāko montāžas un komplektēšanas vietu.

Sekojošajā attēlā parādītas tikai vienā sānu blokā izmantotās detaļas un elementi. Papildus izlāzerētajām un izvirpotajām detaļām nepieciešami arī standartizētie elementi, t.i. elektromotori, piedziņas ķēžrati, ķēdes, gultņi, blīvslēgi, sprostgredzeni, skrūves, paplāksnes un uzgriežņi.



106. att. Sānu piedziņas bloka detaļas pirms to montāžas.

Tālāk notiek detaļu montāžas process, kad tiek sakomplektētas visas mehāniskās daļas.



107. att. Samontēts sānu piedziņas bloks.

Analoģiski pirmā sānu bloka izveidei tiek izgatavoti arī pārējie.



108. Att. Nezāļu iznīcināšanas robota braucamā daļa bez elektronikas

Pēc braucamās daļas izgatavošanas seko CNC mehānismu montāža. Arī paši CNC mehānismi no piegādātāja tika piegādāti izjauktā veidā, līdz ar to bija nepieciešamība tos samontēt. CNC mehānismu stiprināšanai izveidots atsevišķs rāmis, kurš vienkārši ir uzmontējams vai demontējams no braucamās platformas.



109. Att. CNC mehānismu montāžas procesā

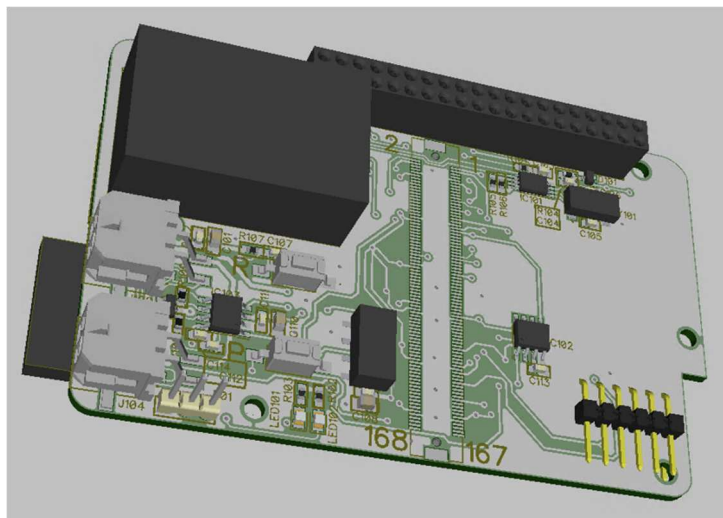
Pēc nezāļu ierobežošanas platformas mehānisko komponentu izgatavošanas un montāžas, seko visu vadības elementu uzstādīšana un elektrotehniskie darbi, jeb elektroinstalāciju montāža.



110. att. Robota vadības elementu integrēšana un elektroinstalācijas darbi

5.2. Robota centrālā vadība

Lai vadītu robota atsevišķos mezglus un koordinētu to darbības, projekta ietvaros tika izstrādāta vadības mikroskāma - robota centrālais vadības bloks. Robota centrālais vadības bloks nodrošina izpildmehānismu, robota riteņu un citu izpildelementu saskaņotu darbību ar borta datoru un GNSS-RTK sistēmu.

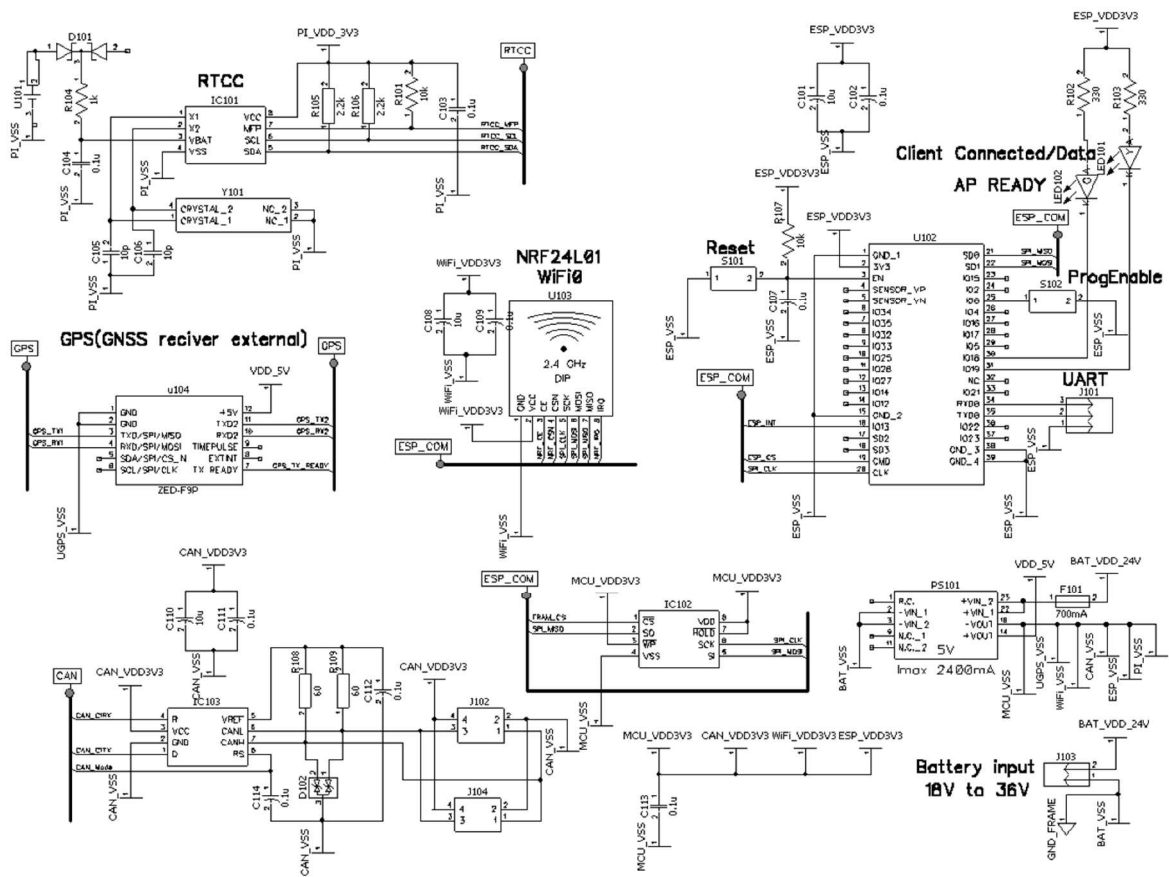


111. att. Robota centrālais vadības bloks

Par pamatu robota centrālajam vadības blokam izmantota Microchip izstrādes plate. Šai izstrādes platei pievienoti klāt dažādi papildus moduļi, lai robots pilnvērtīgi veiktu plānotās funkcijas. Shēma sastāv no vairākiem funkcionāliem papildus blokiem (skat. attēlā 111.b.):

- Kā viens no blokiem ir RTC (nodrošina reāllaika pulksteni), un šo funkciju pilda mikroskāma MCP79410 (shēmā apzīmēta ar IC101)
- Komunikāciju ar motora draiveriem un CNC nodrošina SN65HVD230D mikroskāma, (shēmā IC103).
- Robota telemetrijas datu saglabāšanai tiek izmantota mikroskāma IC102.

- Paredzētas papildus bezvadu komunikācijas 2.4 Ghz frekvencē NRF24L01 (U103) un ESP (U102).
- Paredzētas pieslēgvietas GPS moduļiem caur pieslēguma konektoru U104.



111.b. att. Vadības bloka shēmas

Centrālā vadības bloka programmatūra tika izstrādāta Microchip MPLABX vidē, izmantojot XC32 C valodas kompilatora brīvi pieejamo versiju un Microchip Harmony 2.0 satvaru.

Pielikumā doti galvenie funkcionālie un konfigurēšanas koda faili, ieskaitot automātiski ģenerētos CANOpen vārdnīcas failus komunikācijai ar piedziņas un CNC motoru kontrolleriem, kā arī modificētus galvenes failus atvērtā koda bibliotēkas CANOpenNode (<https://github.com/CANopenNode/CANopenNode>) izmantošanai.

6. tabulā dots projekta vajadzībām izstrādātā un automātiski ģenerētā koda failu kopsavilkums. Pilns MPLABX projekts pieejams 20. Pielikumā.

Centrālā vadības bloka koda failu kopsavilkums

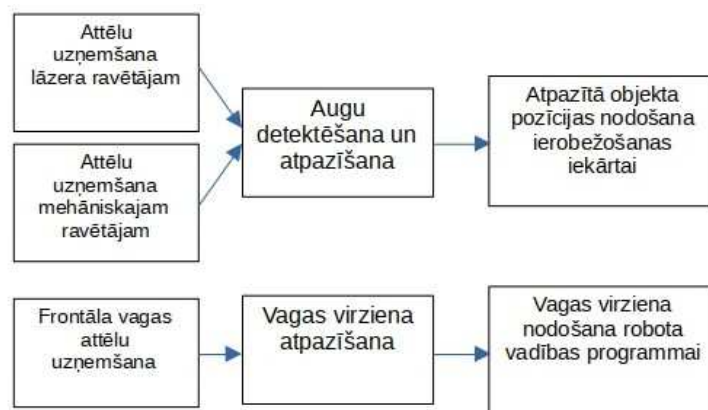
app.c	Galvenais aplikācijas kods – apvieno stāvokļu mašīnā visu pārējo moduļu kodu
app.h	
CANopenApp.c	Aplikācija darbam ar CANOpenNode funkcionalitāti
CANopenApp.h	
CO_config.h	CANOpen konfigurācija
CO_driver_custom.h	
CO_driver_target.h	
CO_OD.c	CANOpen iekārtas vārdnīca (automātiski ģenerēts kods, izmantojot https://github.com/robincornelius/libedssharp)
CO_OD.h	
communicatorApp.c	Aplikācija komunikācijas organizēšanai ar vadības datoru
communicatorApp.h	
igusD1.c	IGUS D1 soļu motoru kontrolleru interfeisa aplikācija
igusD1.h	
main.c	Ieeja programmā
Ronin_CNC.c	CNC iekārtas vadība ar IGUS D1 soļu motoru kontrolleru palīdzību
Ronin_CNC.h	
Ronin_command_proc.c	No vadības datora saņemto komandu procesors
RoninCommandProc.h	
Ronin_laser.c	Lāzera vadības kods
Ronin_laser.h	
Ronin_mill.c	Zemes frēzes vadības kods
Ronin_mill.h	
Ronin_motor.c	Piedziņas motoru kontrolleru vadības kods
Ronin_motor.h	
simple_queue_config.h	Konfigurācijas kods queue datu struktūras izmantošanai

Robota kameru darbība, attēlu atpazīšana un satelītnavigācija tiek vadīta ar borta datoru. Tas saņem signālus no sistēmas atpazīnējiem, GNNS antenām un rokas vadības planšetes. Lai veiktu augu atpazīšanu un detektēšanu attēlos, kā robota borta dators tika izvēlēta Nvidia Jetson AGX Xavier skaitļošanas platforma. Apsvērumi, kas noteica šādu izvēli, bija divi. Pirmkārt, zems enerģijas patēriņš, lai nodrošinātu robota ilgdarbīgu. Otrkārt, skaitļošanas jauda, kas būtu ekvivalenta personālā datora grafiskā procesora kartei (GPU).



112. att. Robota borta dators Nvidia Jetson AGX Xavier
(foto: developer.nvidia.com/embedded/jetson-agx-xavier-developer-kit)

Robota atpazīņu vadības sistēma spēj precīzi orientēties laukā, atšķirt nezāles no kultūraugiem un nosūtīt komandas, lai tās ierobežotu (113. att.).



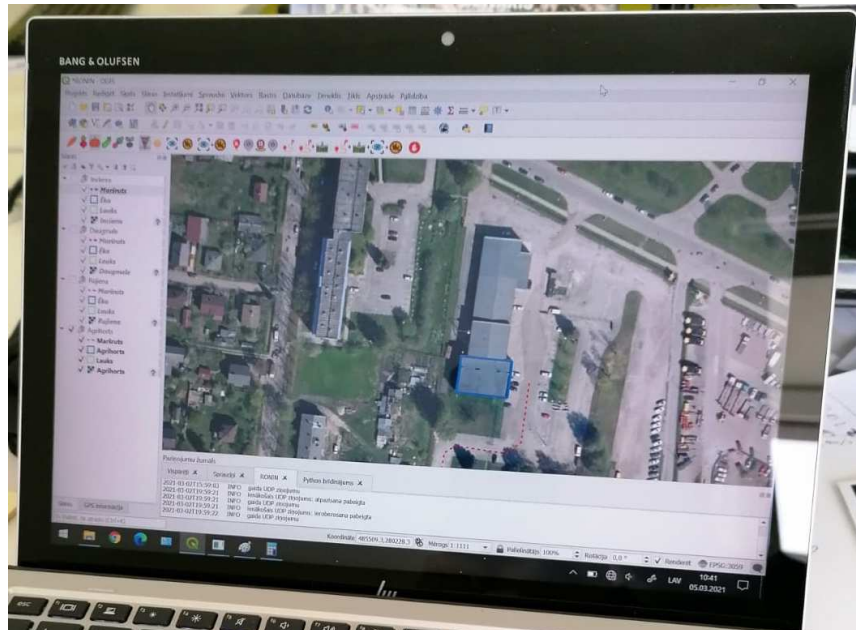
113. att. Atpazīšanas rezultātu adresācija atpazīņu vadības sistēmai, blokshēma

Lai nezāļu ierobežošanas agregāti tiktu pozicionēti uz nepieciešamajās vietām, tika veikta iegūto attēlu pikseļu un atrašanās vietas dabā savstarpējā salāgošana – izpildmehānismu kalibrēšana.



114. att. Nezāļu ierobežošanas agregātu kalibrēšana

Lai nodrošinātu lietotājam ērtu robota vadību, kā arī vizualizētu atgriezenisko saiti ar robota borta datoru, robotam pieslēgta vadības planšete. Vadības planšetē uzstādītā grafiskā saskarne aprakstīta 5.2. nodaļā.



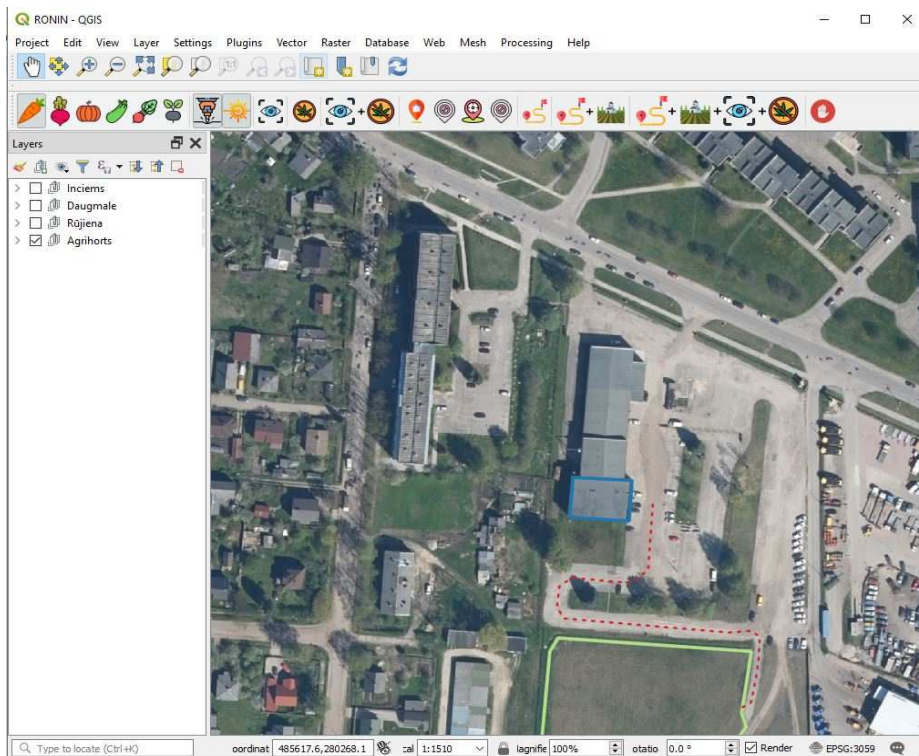
115. att. Robota vadības planšete

5.3. Robota vadības grafiskā saskarne

Robota vadības grafiskajai saskarnei jānodrošina vairākas funkcijas:

- robota darba vides ģeogrāfiskās kartes attēlošana (ortofoto attēli);
- vadības komandu nosūtīšana uz robotu;
- atgriezeniskās saistes saņemšana no borta datora;

Par pamatu grafiskajai saskarnei tika izvēlēta atvērta koda programma QGIS, kas nodrošina ģeogrāfiskās informācijas sistēmas principus – ģeogrāfisko objektu definēšana un attēlošana kartē (skatīt 116. att).



116. att. Robota vadības grafiskā saskarne QGIS programmā.

QGIS paredz iespēju izstrādāt papildus funkcionalitāti pēc lietotāja vajadzībām Python programmēšanas valodā. Viens no veidiem ir Python makrosa izveidošana, kurš izpildās QGIS projekta ielādēšanas brīdī (skatīt 117. att.).

```

1 from PyQGIS.QWidget import QWidget, QToolButton, QToolBar, QMessageBox
2 from PyQGIS.QGui import QPixmap, QIcon
3 from PyQGIS.QCore import QSize, QTimer
4 from qgis.utils import iface
5 import socket
6 import threading
7 from qgis.core import QgsMessageBar, QgsProject
8 import subprocess
9
10 def openProject():
11
12     proj = QgsProject.instance()
13
14     toolbar = iface.mainWindow().addToolBar("robotToolbar")
15     toolbar.setIconSize(QSize(180, 35))
16
17     socketClient = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
18     socketServer = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
19     socketServer.bind(("192.168.2.230", 8887))
20
21     udpDestinationSocket = ("192.168.2.250", 8888)
22
23     buttonCarrot = QToolButton()
24     buttonCarrot.setToolTip("<div style='background-color: #FF79C7;'><b>Atpaizī burkānus</b></div>")
25
26     buttonBeet = QToolButton()
27     buttonBeet.setToolTip("<div style='background-color: #FF9E79;'><b>Atpaizī bietes</b></div>")
28
29     buttonPumpkin = QToolButton()
30     buttonPumpkin.setToolTip("<div style='background-color: #FFA979;'><b>Atpaizī burkānus</b></div>")
31
32     buttonZucchini = QToolButton()
33     buttonZucchini.setToolTip("<div style='background-color: #FF9E79;'><b>Atpaizī cukini</b></div>")
34
35     buttonRadish = QToolButton()
36     buttonRadish.setToolTip("<div style='background-color: #FF9E79;'><b>Atpaizī redīsus</b></div>")
37
38     buttonBlackRadish = QToolButton()
39     buttonBlackRadish.setToolTip("<div style='background-color: #FF9E79;'><b>Atpaizī rībus</b></div>")
40
41     buttonDrill = QToolButton()

```

117. att. Python makrosa izstrādes logs QGIS programmas konfigurēšanas sadaļā.

Python makrosā tika izstrādāta savstarpējā planšetes-robotu komunikācija un papildus vadības pogas ar vadības loģiku, kuras tiek attēlotas QGIS grafiskajā saskarnē (skatīt 118. att).



118. att. **Robota vadības pogas (no kreisās uz labo pusi):** 1) izvēlēties burkānu, 2) izvēlēties bieti, 3) izvēlēties ķirbi, 4) izvēlēties cukini, 5) izvēlēties redīsu, 6) izvēlēties rutku, 7) izvēlēties mehānisko ierobežotāju, 8) izvēlēties lāzeru, 9) atpaizīt izvēlēto kultūraugu, 10) ierobežot nezāles ar iepriekš izvēlētajiem rīkiem, 11) atpaizīt izvēlēto kultūraugu un ierobežot nezāles ar iepriekš izvēlētajiem rīkiem, 12) pievienot GPS punktu maršrutam, 13) izdzēst GPS maršrutu, 14) pievienot GPS punktu vagai, 15) izdzēst GPS vagas maršrutu, 16) braukt pa maršrutu, 17) sekot vagām, 18) sekot vagām, atpaizīt izvēlēto kultūraugu un ierobežot nezāles ar iepriekš izvēlētajiem rīkiem, 19) robota apturēšana.

Vadības komandu nosūtīšanu uz robotu tika realizēta caur UDP komunikācijas protokolu (skatīt 119. att.).



119. att. Planšetes-robotu komunikācijas diagramma.

Planšetes grafiskās saskarnes Python makrosa kods un robota uz planšeti sūtīto attēlu atspoguļošanas skripta kods ir atrodams attiecīgi 1. pielikumā un 2. pielikumā.

Pogas nodrošina sekojošu robota funkcionalitāti un komandu izpildes scenārijus:

- pogas 1.-6. ļauj izvēlēties kultūraugu, kas atpazīšanas sistēmai jādetektē;
- pogas 7 un 8 ļauj izvēlēties robota nezāļu ierobežošanas iekārtu (mehānisko ierobežotāju vai lāzeru);
- poga 9 iedarbina robota augu atpazīnēju un rezultāts tiek attēlots uz planšetes ekrāna;
- 10 poga iedarbina attiecīgo nezāļu ierobežošanas rīku;
- 11 poga veic pilnu nezāļu atpazīšanas un ierobežošanas ciklu, attēlojot rezultātus planšetē;
- ar 12.-15. pogai sastāda robota braukšanas maršrutus pa lauku un vagu;
- 16. poga iedarbina robota došanos uz lauku režīmu;
- 17. poga iedarbina robota vagas izstaigāšanu bez nezāļu ierobežošanas;
- 18. poga iedarbina robota vagas izstaigāšanu ar nezāļu ierobežošanas;
- 19. poga apstādina iepriekš sākto procesu.



120. att. Darbam sagatavots nezāļu ierobežošanas iekārtas prototips

Pēc iekārtas izgatavošanas pabeigšanas, tika turpināts darbs pie atsevišķu elementu darbības mehānisko un elektronisko kļūmju novēršanas, kā arī programmatūras atklādošanas.

5.4. Robota testēšana lauka apstākļos

Pēc robota izgatavošanas tas sākotnēji tika testēts Agrihorta teritorijā. Pēc tam, kad tika sasniegta stabila robota darbība, testi tika turpināti lauka apstākļos.



121. att. Mehāniskā nezāļu ierobežošanas rīka darbība lauka apstākļos



122. att. Lāzera nezāļu ierobežošanas rīka darbība lauka apstākļos

Pēc sākotnējiem lauka testiem līdz pat projekta beigām tika turpināts darbs pie mehānisko elementu darbības uzlabošanas, augu atpazīnēja precizitātes uzlabošanas un programmatūras atklādošanas.

Lauka testus plānots turpināt pēc projekta pabeigšanas, lai iegūtu informāciju par apstrādāto nezāļu izdzīvošanu uz lauka dažādos apkārtējās vides apstākļos. Tā kā prototipa

lauka testi pamatā notika rudenī, bija iespējams novērtēt tūlītējo iedarbību uz augiem, bet ne ilgtermiņa ietekmi, jo augu attīstība jau bija izmainīta dēļ laikapstākļiem.

Lāzera apstrāde

Lāzera apstrādei bija labs efekts uz divdīgļlapju nezālēm dīgļlapu un 2-6 īsto lapu attīstības stadijās - lāzera apstrādes vietās augs mainīja krāsu, nekrotizējās vai tika pilnībā pārgriezts. Netika novērota būtiska vēja ietekme uz apstrādāšanas kvalitāti, bet vēja iedarbībā augi maina atrašanās vietu, salīdzinot ar to, ko aprēķinājis atpazīšanas algoritms, kas savukārt mazina iedarbības precizitāti.

Mehāniskā apstrāde

Lielākām nezālēm (atpazīšanas algoritma rāmītis lielāks par 14cm²), piemērotāka ir mehāniskā apstrāde. Projekta ietvaros tika testēti vairāki rotējoši uzgaļi. Konkrētā uzgaļa veida izmantošana un efektivitāte ir atkarīga no augsnes struktūras un nezāles attīstības stadijas. Uzgalis ar pīķveida zariem labi iedarbojas uz nezālēm ar platām lapām un salīdzinoši tieviem lapu kātiem vai ložņājošām nezālēm, piem., gārša, ložņu gundega – nezāles tiek aptūtas ap uzgali, izrautas un nokrīt augsnes virskārtā. Blīvākā augsnē vai nezālēm ar izteiktu mietsakni, labi darbojas arī metāla saru uzgalis – nezāles centrālā daļa ar sakni tiek sasmalcināta. Plānots, ka vajadzības gadījumā var izstrādāt vēl papildus uzgaļus, pielāgotus konkrētiem kultūraugiem.

Mobilā platforma

Mobilā platforma labi tika galā ar pārvietošanos pa dažāda slīpuma un reljefa laukiem. Katra riteņa neatkarīga piedziņa nodrošina nepieciešamo pārgājāmību. Ņemot vērā to, ka platformas kopējā masa pārsniedz 100 kg, lietainā laikā uz mālaines augsnes tika novērota platformas iegrimšana un buksēšana. Lai to uzlabotu, plānots strādāt pie tā, lai palielinātu riteņu atbalsta laukumu.

Projekta ietvaros izstrādātais prototips un tā testēšana iesaistījās saimniecībās, kā arī pie citiem interesentiem sniedz vairākus būtiskus ieguvumus. Pirmkārt, saimniecībām ir iespēja strādāt pie ilgtermiņa risinājumu sev būtiskai problēmai – šajā gadījumā, nezāļu ierobežošanai tuvam kultūraugam. Pat ja pirmais prototips neatrisina visus sākotnējos tehniskos izaicinājumus, tas ir būtisks solis, lai šāda iekārta nonāktu ražošanā un būtu pieejama zemniekiem. Otrkārt, ražotājiem ir iespēja iepazīt un testēt savā saimniecībā tehnoloģijas, kuras ir jaunums visur pasaulē (lāzerravēšana, autonomie lauksaimniecības roboti), tādā veidā radot būtisku priekšnosacījumu, ātrai šo tehnoloģiju ieviešanai savās saimniecībās, tiklīdz risinājumi būs pieejami Latvijas tirgū. Treškārt, zinātniekiem un inženieriem šādu projektu ietvaros ir iespēja saņemt tiešu atgriezenisko saiti no zemniekiem, par piedāvāto risinājumu atbilstību to vajadzībām, kā arī pārbaudīt uz lauka, izstrādāto risinājumu funkcionalitāti. Savukārt zemniekiem ir iespēja saņemt informāciju no zinātniekiem par jaunākajiem pētījumu rezultātiem un citiem izstrādātajiem risinājumiem konkrētajā jomā pasaulē, kas citādi būtu grūti atrodamā.

Secinājumi un nākotnes perspektīva

Robotu izmantošana lauksaimniecībā paliek arvien izplatītāka visā pasaulē. Viens no lielākajiem lauksaimniecības robotu ražotājiem paziņoja, ka saņēmis nepieciešamos saskaņojumus, lai arī Eiropā viņu ražojumi drīkstētu pārvietoties pa laukiem autonomi. Līdz ar to projektā izstrādātais prototips un iegūtās atziņas ir ļoti aktuālas.

Projekta ietvaros veikts būtisks izstrādes darbs sadarbojoties zinātniskajām institūcijām un zemniekus saimniecībām. Projekta rezultātā izstrādāts funkcionējošs robota prototips, kas spēj autonomi veikt maršrutu līdz laukam, virzīties pa kultūrauga rindu, atpazīt un iznīcināt nezāles ar mehānisko rīku vai lāzeru. Projekta eksperimentu rezultāti, iegūtie dati un izstrādātie risinājumi ir publiski pieejami šajā pārskatā norādītajās interneta vietnēs, pielikumos vai sazinoties ar projekta īstenotājiem.



Izstrādātais robota prototips īsteno tam paredzētās funkcijas, un prototipa testēšana lauka apstākļos tiks turpināta 2021. gadā, lai iegūtu rezultātus par apstrādāto nezāļu izdzīvošanu ilgstošākā periodā. Tāpat tiks turpinātāka aktīva sadarbība ar saimniecībām, lai iegūtu papildu informāciju par robota funkcionalitāti no lietotāja skatupunkta.

Turpmākajos robota izstrādes posmos akcents būtu jāliek uz izstrādātā augu atpazīšanas algoritma precizitātes uzlabošanu un papildu kultūraugu iekļaušanu, ko iespējams panākt, palielinot anotēto attēlu kopu, kā arī papildinot ar kultūraugiem ar dažādu augsnes fonu. No tehniskajiem risinājumiem papildus būtu nepieciešams izstrādāt drošības barjeru, kas aizturētu lāzera staru pēc nejaušas atstarošanās un vienlaikus netraucētu robota kustībai. Tāpat nepieciešams izstrādāt lāzera lēcas aizsargu pret putekļiem un degšanas produktiem. Lai palielinātu iekārtas ražīgumu, limitējošs faktors ir lāzera jauda, līdz ar to turpmākajā izstrādē būtu jātestē lielākas jaudas lāzeri.

No lietošanas perspektīvas, savukārt būtu svarīgi noskaidrot, vai robotam nepieciešami abi rīki – gan lāzers, gan mehāniskais, vai pietiek ar vienu, jo tas būtiski vienkāršotu robota konstrukciju. Tāpat būtiski būtu novērtēt mobilās platformas pielietojumu citām funkcijām, kas svarīgas saimniecībās, piemēram, nelielu kravu (kastes ar gatavo produkciju) pārvietošanai, rindstarpu rušināšanai u.c.

Sagatavotās publikācijas, raksti un dalība pasākumos

Projekta ietvaros sagatavotas divas zinātniskās publikācijas, kas indeksētas SCOPUS datu bāzē:

- Sudars, K., Jasko, J., Namatevs I., Ozola L., Badaukis, N. (2020). Dataset of annotated food crops and weed images for robotic computer vision control, Data in Brief, 31. doi:10.1016/j.dib.2020.105833
- Osadčuks V. Kostromins A., Pecka A., Koteļņecis V., Jaško J. (2020) Experimental efficiency evaluation of 445 nm semiconductor laser for robotized weed control applications. Agronomy Research. Vol. 18(S2), pp. 1380-1387.

Projekta izstrādes prezentētas dažādos pasākumos:

- LLU zinātnieku naktī 2019. gada 27. septembrī;
- Izstādē “TechIndustrie 2019” Ķīpsalā no 28. līdz 30. novembrim;
- Izstādē “Skola 2020” Ķīpsalā, no 26. līdz 28. februārim;
- Tehnikas un inovāciju festivālā "Mehatrons 2020", Jelgavā, 5. septembrī;
- Izstādē “Riga COMM 2020” Ķīpsalā, 15. un 16. oktobrī.

Par projektu un izstrādāto nezāļu ierobežošanas robotu ir publicēti raksti dažādos lauksaimniecības nozares izdevumos, presē un citos medijos:

- TV sižets raidījumā Panorāma 17.10.2020 - <https://www.lsm.lv/raksts/dzive--stils/tehnologijas-un-zinatne/lauksaimniecibas-universitate-radits-nezalu-ravesanas-robots-robis.a378359/>
- Raksts ziņu portālā TVNet 20.10.2020 - <https://www.tvnet.lv/7089267/latvijas-petnieki-rada-nezalu-ravesanas-robotu>
- Raksts ziņu portālā Delfi 23.10.2020 - <https://www.delfi.lv/majadarzs/aktuali/bez-sabojata-brivlaika-latviesu-zinatnieki-radijusi-ravesanas-robotu-un-mekle-razotajus.d?id=52586413>
- Raksts elektroniskā žurnāla Profesionālā dārzkopība 13. numurā 2020. gada novembrī (16. pielikums)
- Sižets BBC Russia ziņu aģentūrā 07.12.2020. - <https://www.bbc.com/russian/media-55220110?fbclid=IwAR1urCTvTsUaqubxIcJjllhQ7pFNrNnes6GjOyBjr8EoXGIYciPLqJK2AIQ>
- Raksts laikraksta Latvijas Avīze 2020. gada 14. decembra numurā (17. pielikums)
- Raksts žurnāla AgroTops 2021. gada janvāra numurā (18. pielikums)
- Raksts žurnāla Saimnieks 2021. gada februāra numurā (19. pielikums)

Projekta ietvaros organizētas 3 lauku dienas:



Lauku diena 2020. gada 3. septembrī pie projekta partnera ZS “Atvases”



Lauku diena 2020. gada 4. septembrī pie projekta partnera SIA “Lejasvagaļu dārzs”



Lauku diena 2020. gada 4. septembrī projekta partnera J. Lipska saimniecībā “Absolūts Ēd”