

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Lietišķo datorsistēmu institūts
Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedra

Māris Galauskis

Akadēmiskās bakalaura studiju programmas „Intelektuālas robotizētas sistēmas” students
(stud. apl. nr. 171RDB277)

OPTISKĀS PLŪSMAS SENSORU KOPAS PIELIETOJUMS MOBILU ROBOTU POZICIONĒŠANĀ

Bakalaura darbs

Zinātniskais vadītājs
Mg. sc. ing., pētnieks
J.BICĀNS

Rīga 2020

DARBA IZPILDES UN NOVĒRTĒJUMA LAPA

Bakalaura darbs izstrādāts *Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedrā*.

Ar parakstu apliecinu, ka visi izmantotie materiāli ir norādīti literatūras sarakstā un iesniegtais darbs ir oriģināls.

Darba autors:

stud. **M.Galauskis**.....
(paraksts, datums)

Bakalaura darbs ieteikts aizstāvēšanai:

Zinātniskais vadītājs:

Mg.sc.ing., pētnieks **J.Bicāns**.....
(paraksts, datums)

Bakalaura darbs pielaists aizstāvēšanai:

Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedras vadītājs:

Dr.sc.ing., prof. **A.Ņikitenko**.....
(paraksts, datums)

Bakalaura darbs aizstāvēts Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedras Gala

pārbaudījumu komisijasgada.....sēdē un novērtēts ar atzīmi ().....
(gads) (datums, mēnesis)

Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedras Gala pārbaudījumu komisijas

sekretāre.....
(uzvārds, paraksts)

ANOTĀCIJA

MOBILU ROBOTU POZICIONĒŠANA, OPTISKĀS PLŪSMAS SENSORI, KĀPURĶĒŽU ROBOTIZĒTA PLATFORMA

Bakalaura darbā ir pētīti un apkopoti mobilu robotu lokalizēšanā visbiežāk lietotie sensori un tehnoloģijas, to priekšrocības un trūkumi. Ir apskatīti optiskās plūsmas sensori, kā arī optiskās plūsmas koncepts un tās pielietojums lokalizēšanas uzdevumos. Darba praktiskajā daļā ir izstrādāta optiskās plūsmas sensoru testēšanas platformas arhitektūra, par pamatu ņemot un aprīkojot industriāli ražotu mobilu robotu. Ir veikti vairāki eksperimenti, lai salīdzinātu optiskās plūsmas un riteņu odometrijas veiktspēju uz dažādiem grīdas segumiem. Darba noslēgumā ir apkopoti un izvērtēti eksperimentu rezultāti un darba gaitā gūtās atziņas.

Darba pamattekstā ir 52 lappuses, 31 attēls, 9 tabulas un 57 nosaukumu informācijas avoti.

ABSTRACT

MOBILE ROBOTS POSITIONING, OPTICAL FLOW SENSORS, CRAWLER DRIVE ROBOTIC PLATFORM

Commonly used localisation sensors and techniques, their advantages and disadvantages in mobile robotics are studied and reviewed in the bachelor's thesis, emphasising optical flow sensors, concepts and applications in localization tasks. In the practical part a platform for testing of optical flow sensors is being developed, based on mobile robot with crawler drive. Multiple experiments are carried out, comparing performance of the optical flow sensors and wheel odometry on different flooring materials. At the end of the thesis are results of the experiment and conclusions.

The thesis contains 52 pages, 31 figures, 9 tables and 57 information sources.

АННОТАЦИЯ

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ, ДАТЧИКИ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА. РОБОТИЗИРОВАННАЯ ГУСЕНИЧНАЯ ПЛАТФОРМА

В данной бакалаврской работе были рассмотрены и изучены наиболее часто используемые сенсоры для локализации мобильных роботов, а также рассмотрены все их преимущества и недостатки. Углубленно были рассмотрены именно датчики оптического потока, вместе с концептом оптического потока и его применения в решениях где используют мобильных роботов. В практической части данной работы было разработана архитектура платформы для тестирования сенсоров оптического потока. Основой, которой служит индустриально сделанный мобильный робот. Также в работе проводилось множество экспериментов сравнивая между собой оптический поток и одометрию колес на разных напольных поверхностях. В заключении обобщены и оценены результаты экспериментов и выводы, которые были получены в ходе исследования.

Основной текст работы состоит из 52 страниц, 31 рисунок, 9 таблиц и 57 источников информации.

PATEICĪBA

Bakalaura darba autors vēlas pateikties darba vadītājam Jānim Bicānam par atbalstu un motivāciju darba izpildē, mudinot darbu veikt savlaicīgi un kvalitatīvi.

Praktiskajā daļā lietoto optiskās plūsmas sensoru autoram, pētniekam Dr. sc. ing. Andrejam Zujevam par veltīto laiku, sensoru darbības izskaidrošanā un tehnisku jautājumu risināšanā.

Valsts nozīmes pētījumu centra IKSA kolektīvam par atsaucīgumu un padomiem dažādu uzdevumu risināšanas procesā.

SATURS

IEVADS.....	8
1. MOBILU ROBOTU LOKALIZĀCIJA.....	10
1.1. Mobilu robotu veidi.....	10
1.2. Riteņu odometrija.....	11
1.3. Inerciālo sensoru odometrija	12
1.4. Globālā navigācijas satelītu sistēma.....	13
1.5. Raidošu bāku lokalizācijas sistēmas	15
1.6. Orientieru un objektu atpazīšana.....	16
1.7. Radaru un Sonāru tehnoloģijas	17
1.8. Gaismas sensoru sistēmas	18
1.9. Vizuālā odometrija	19
1.10. Sensoru komplekti pozicionēšanas uzdevumos.	20
2. OPTISKĀS PLŪSMAS SENSORU PIELIETOJUMI.....	23
2.1. Optiskā plūsma.....	23
2.2. Optiskās plūsmas pētījumu apskats.....	25
2.3. Optiskās plūsmas sensoru pielietojumu ierobežojumi	26
2.4. Eksperimentā lietotie optiskās plūsmas sensori	27
3. MOBILA KĀPURĶĒŽU ROBOTA LOKALIZĀCIJA AR OPTISKĀS PLŪSMAS SENSORIEM.....	30
3.1. Dr Robot “Jaguar V4” robotizēta platforma	30
3.2. Sensoru kalibrēšana un kinemātiskie modeļi	38
4. VIZUĀLĀS UN RITEŅU ODOMETRIJAS METOŽU VEIKTSPĒJAS SALĪDZINĀJUMS	44
4.1. Eksperimentos izmantotie grīdas segumi.....	44
4.2. Eksperimentu gaita un rezultāti.....	46
SECINĀJUMI.....	52
LITERATŪRA	53

IEVADS

Ikdienā to nemanām, bet roboti ir mūsdienu dzīves neatņemama sastāvdaļa. Tie strādā rūpnīcās, pļauj zāli, uzkopj grīdas, apseko laukus un veic daudzas citas darbības. Tie ir iesaistīti gan preču, gan pārtikas produktu ražošanā. Iepriekš roboti bija sastopami tikai slēgtā, strikti kontrolētā vidē, droši nostiprināti pie rūpnīcas ražošanas līnijas, taču šobrīd, tehnoloģijām attīstoties, paveras arvien vairāk potenciālu pielietojumu gan mājās, gan darba vietā, ļaujot cilvēkiem veltīt laiku ģimenei vai sarežģītākiem uzdevumiem. Tuvā nākotnē mēs pārvietosimies ar pašbraucošām mašīnām, vīrs galvām lidos pasūtījumus piegādājoši bezpilota lidaparāti un par drošību rūpēsies policijas un armijas roboti.

Mobilu robotu tirgus strauji aug. 2019. gadā mobilu robotu tirgus ir novērtēts 29,3 miljardu dolāru apmērā (Psmarketresearch.com, 2020) un ir prognozēts vairāk, nekā 20% pieaugums ik gadu līdz pat 2025. gadam. (Majchrzak, 2020).

Viens no lielākajiem izaicinājumiem robotam kļūstot mobilam ir spēja noteikt tā atrašanās vietu. Eksistē vairāki risinājumi, bet katram no tiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Viens sensors nevar vienlīdz labi strādāt visās situācijās. Ja varētu robotam pievienot pilnīgi precīzu Globālās navigācijas satelītu sistēmu (GNSS) sensoru, kas strādātu gan iekštelpās, gan ārā, tad robotu lokalizācijas problēma būtu atrisināta (Siegwart & Nourbakhsh, 2011). Tomēr tāda sensora 2011. gadā vēl nebija, un nav arī šobrīd, jo globālās pozicionēšanas sistēmas tehnoloģisko ierobežojumu dēļ nespēj darboties iekštelpās, tāpēc risinājumus pētnieki meklē citur, lietojot citas pieejas, kas darbojas, apvienojot datus no vairākiem dažādas uzbūves un darbības principa sensoriem vai izvēloties konkrētai robota darbības videi piemērotākos sensorus.

Šajā bakalaura darbā ir apskatīti aktuālie risinājumi mobilu robotu pozicionēšanā dažādās robotu darbības vidēs. Ir uzskaitītas šo risinājumu priekšrocības un trūkumi, pētījumu apkopojot tabulā pirmās nodaļas beigās. Vairākos ar robotu lokalizāciju saistītos avotos (Aqel et al., 2016; He et al., 2019) ir izteikts pieņēmums, ka optiskās plūsmas tehnoloģija ir viena no perspektīvākajām lokalizācijas uzdevumiem, tāpēc bakalaura darba autors ir izlēmis optiskās plūsmas sensoru pielietojumu pētīt padziļināti, un darba praktiskajā daļā aprīko mobilu robotizētu platformu ar optiskās plūsmas sensoriem un salīdzina to veikspēju ar platformas iebūvēto odometriju.

Darba mērķis ir iepazīties ar robotu lokalizācijas metodēm mobiliem robotiem, padziļināti pētīt optiskās plūsmas sensoru pielietojumu, eksperimentāli novērtēt optiskās

plūsmas un riteņu odometrijas veiktspēju iekštelpu lokalizācijai kāpurķēžu mobilai robotizētai platformai. Eksperimentam ir izmantoti RTU pētnieka Andreja Zujeva vadībā izstrādātie optiskās plūsmas sensori un “Jaguar V4” mobila robotizēta platforma. Bakalaura darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi **uzdevumi**:

- 1) Iepazīties ar aktuālo literatūru par mobilo robotu lokalizācijas paņēmieniem,
- 2) Padziļināti izpētīt optiskās plūsmas sensoru pielietojumu lokalizācijas uzdevumu risināšanā,
- 3) Izstrādāt mobilas robotizētas platformas un optiskās plūsmas sensoru testēšanas komplekta eksperimentālu arhitektūru un aprīkot robotizētu platformu ar optiskās plūsmas sensoriem,
- 4) Realizēt praktisku eksperimentu un novērtēt iegūtos rezultātus.

Bakalaura darba pirmajā nodaļā apskatīta mobilo robotu lokalizācija, biežāk lietotie paņēmieni, sensori un tehnoloģijas, kā arī ir apkopoti populārākie sensoru komplekti lokalizācijas precizitātes uzlabošanai. Darba 2. nodaļā ir pētīta optiskā plūsma, definīcija un pielietojumi robota pozicionēšanas uzdevumu risināšanā, kā arī aprakstīti praktiskajā daļā lietotie sensori. Darba 3. nodaļā ir aprakstīts robotizētas platformas aprīkošanas process ar optiskās plūsmas sensoriem, plānotā eksperimenta gaita un sagaidāmie rezultāti. Darba 4. nodaļā ir analizēti eksperimentā iegūtie dati. Secinājumos ir apkopoti darba rezultāti, gūtās atziņas un galvenie secinājumi.

1. MOBILU ROBOTU LOKALIZĀCIJA

1.1. Mobilu robotu veidi

Mobilie roboti ir robotikas apakšjoma, kura pēta robotus, kas nav piesaistīti konkrētai darbības vietai, tie spēj patstāvīgi vai ar nelielu vadību no malas pārvietoties un izpildīt uzdevumus. Robotu var uzskatīt par mobilu, ja tam piemīt īpašības, kuras savos pētījumos uzskaita Rubio (Rubio et al., 2019) un Alatis un Hanks (Alatis & Hancke, 2020):

- 1) Spēja pārvietoties – atkarībā no vides robotam nepieciešamais pārvietošanās veids, kas attiecīgajai videi ir vispiemērotākais. Piemēram, pa līdzenu segumu riteņi ir efektīvi, tomēr tie nespēj nodrošināt pārvietošanos uz ļoti nelīdzena, šķautņaina seguma. Turpretim mehāniskas kājas labi spēj pārvarēt augstus šķēršļus, bet nespēj ātri pārvietoties pa līdzenu segumu un samazinās robota stabilitāte. Eksistē arī hibrīda pieeja, uzmontējot riteņus kāju galos. Tādējādi iespējams ātri pārvietoties, saglabājot spēju pārvarēt šķēršļus. Piemērs šāda robota uzbūvei dots 1.1. attēlā. Šāda pieeja gan ievērojami palielina robota sarežģītību un, autonomu robotu gadījumā, arī vadības algoritma sarežģītību, jo robotam jāspēj noteikt virsmas veidu, lai izvēlētos piemērotāko pārvietošanās metodi (Saudabayev et al., 2015).



1.1. att. Robots ar hibrīda pārvietošanās metodi, attēls aizgūts no (DevicePlus Team, 2018)

- 2) Spēja uztvert apkārtējo vidi un šajā vidē veikt navigāciju – līdzīgi kā cilvēkiem, arī robotiem jāspēj uztvert apkārtējo vidi, lai spētu tajā darboties. Ir jāspēj laikus ieraudzīt potenciālos šķēršļus, kas jāapbrauc, vai objektus, ar kuriem manipulēt.

Atkarībā no robota vadības veida ir atkarīgs cik daudz un kādi sensori robotam nepieciešami. Piemēram, ja robotu vada operators, tad, iespējams, liela daļa apkārtējās vides tiek uztverta caur operatora acīm vai citiem maņu orgāniem, uz paša robota vien nepieciešama videokamera. Bet pilnīgi autonomu robotu gadījumā sensoru skaits kļūst ievērojami lielāks, jo robotu vadības algoritmi pašlaik vēl nespēj no vienas kameras izskaitļot robota pārvietojumu, absolūto pozīciju un šķēršļus ar pietiekamu precizitāti (Alatise & Hancke, 2020).

- 3) Spēju pieņemt lēmumus – spēja pieņemt lēmumus nepieciešama, lai robots kļūtu pilnībā autonomš. Šādam robotam varētu uzdot augsta līmeņa uzdevumu, un tam pašam būtu jātiek galā ar visām potenciālajām problēmām uzdevuma izpildē. Patiešām autonomi mobili roboti, kas spētu ilgā laika posmā strādāt bez cilvēka iejaukšanās, nav daudz (Rubio et al., 2019). Viens no zināmākajiem piemēriem ir pašbraucošas automašīnas, kas pagaidām strādā testa režīmā. Tām ir dots augsta līmeņa uzdevums: “Nogādā mani šajā vietā!”. Tālāk maršruts tiek izplānots automātiski, un, jebkādas neplānotas, situācijas uz ceļa ir jāatrisina, neiesaistot cilvēku.

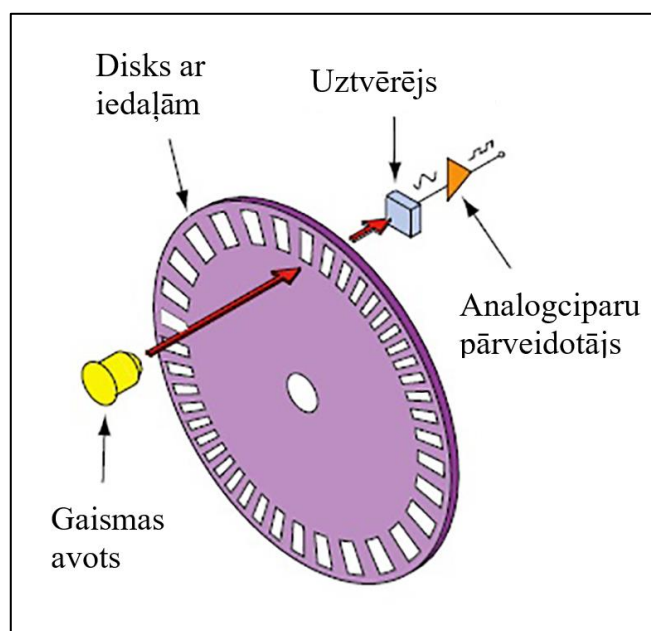
Ir secināts, ka mobili roboti darbojas dinamiskā vidē, ierobežotas informācijas apstākļos, kur jebkurā brīdī var būt negaidīts šķērslis uzdevuma izpildē. Robotam jāspēj to uztvert ar sensoriem, apstrādāt ar algoritmiem un veikt korekcijas savā plānotajā uzdevuma izpildes ceļā reālajā laikā. Būvējot robotu, ir jāparedz, kādā vidē tas darbosies, vai tas būs pilnībā autonomš un cik ilgu laika posmu tam jāspēj darboties bez jaunām operatora instrukcijām. Atkarībā no tā robots jāaprīko ar atbilstošiem sensoriem. Populārākie mobilo robotu pozicionēšanas sensori un risinājumi apskatīti nākamajās apakšnodaļās. Katram no robotu pārvietošanās veidiem ir savas stiprās un vājās puses. Ja robots paredzēts darboties vairākās izteikti dažādās vidēs, var pielietot hibrīda pārvietošanās arhitektūras, piemēram, robots ar kājām, kam piemontēti riteņi, lai varētu ātrāk pārvietoties pa līdzenu segumu.

1.2. Riteņu odometrija

Riteņu odometrija ir viens no izplatītākajiem odometrijas veidiem robotikā (Aqel et al., 2016). Robota pārvietojumu nosaka mērot riteņu apgriezību skaitu. Zinot robota kinemātisko modeli un riteņu diametru, ir iespējams aprēķināt veikto distanci, pašreizējo ātrumu un pagrieziena leņķi. Riteņu apgriezienus iespējams mērīt ar enkoderiem. Enkoderi iedalās absolūtajos, kas spēj nolasīt precīzu riteņu pagrieziena leņķi, un inkrementālajos, kas izvada

konkrētu skaitu pulsu katrā riteņa apgriezienā. Pēc pielietotās sensoru tehnoloģijas, enkoderi iedalās optiskajos un magnētiskajos. Magnētiskie sensori uztver riteņos iebūvētus magnētus, bet optiskie izmanto atstarotās vai uztvertās gaismas stipruma maiņu. Vispārīga optiskā enkodera uzbūve redzama 1.2. attēlā.

Vairāki avoti (Campbell et al., 2018; Noureldin et al., 2013; Borenstein et al., 1997) apskata riteņu enkoderus, kā plaši lietotus, pieejamus, īsos laika posmos precīzus sensorus pārvietojuma noteikšanai. Tomēr riteņu odometrija spēj precīzi strādāt tikai tad, ja riteņi nekad neizslīd (Campbell et al., 2018) un to diametri un novietojums atbilst kinemātiskajā modelī izmantotajam (Borenstein et al., 1997), kas reālajā pasaulē ir grūti sasniedzams. Tāpēc veidojas kļūda, kas uzkrājas, jo katrs nākamais mērījums ir pieskaitīts iepriekšējam. Šī iemesla dēļ pētījumos (Borenstein et al., 1997; Campbell et al., 2018) ir piedāvāts šo sensoru izmantot, apvienojot ar vēl kādu citu odometrijas veidu, vai kā alternatīvu īsos laika posmos, kad kāds precīzāks pozicionēšanas risinājums nav pieejams.



1.2. att. Optiskā enkodera darbības princips, attēls modificēts no (Schweber, 2018)

1.3. Inerciālo sensoru odometrija

Inerciālie mērījumu sensori ir akselerometri, kas mēra lineāro paātrinājumu, un žiroskopi, kas mēra leņķisko ātrumu. Katrs šāds sensors spēj nomērīt vērtības tikai vienā no asīm, tāpēc tos pa 3 savstarpēji perpendikulāri apvieno vienā korpusā, iegūstot 3 asu inerciālo mērījumu sensoru. Pārsvārā šādiem sensoriem ir pievienoti arī 3 asu magnetometri, kas mēra

magnētiskā lauka spēku un virzienu. Šādus gatavus moduļus sauc par inerciālo mērījumu sensoriem (IMU). No sensora nolasītajām lineārā un leņķiskā paātrinājuma vērtībām ir iespējams izrēķināt pārvietojumu un momentāno ātrumu (Woodman, 2007). Vienu reizi integrējot iespējams iegūt pašreizējo ātrumu, vēlreiz integrējot aprēķināto ātrumu, iespējams iegūt pārvietojumu. Šīs dubultās integrēšanas dēļ sensors ir pakļauts lielai rādījumu kļūdai, jo mazs troksnis nolasot paātrinājumu, pārvēršas lielā kļūdā pārvietojumā, pēc dubultās integrēšanas (Woodman, 2007). Inerciālo mērījumu sensoru uzbūves un darbības principu dēļ tie nolasa nelielas paātrinājuma vai pagriezienu vērtības arī pilnīgā miera stāvoklī. Šādu parādību sauc par troksni. Troksni var nofiltrēt, no katra mērījuma atņemot vidējo, iepriekš nomērīto trokšņa vērtību, tomēr, atkarībā no apkārtējās vides temperatūras, mainās trokšņa stiprums, tāpēc nepieciešami apkārtējās vides temperatūras sensori un sarežģīti algoritmi, kas spēj kompensēt šo parādību (Diaz et al., 2018). Viennozīmīgi šādu papildu sensoru un filtru esamība sadārdzina sensora gala cenu. Attiecīgi izvēloties dārgāku inerciālo mērījumu sensoru iespējams panākt tā precīzu darbību ilgāku laiku, pirms nepieciešams precizēt pašreizējo robota atrašanās vietu pret kādu citu pozicionēšanas sistēmu (Qazizada & Pivarčiová, 2016).

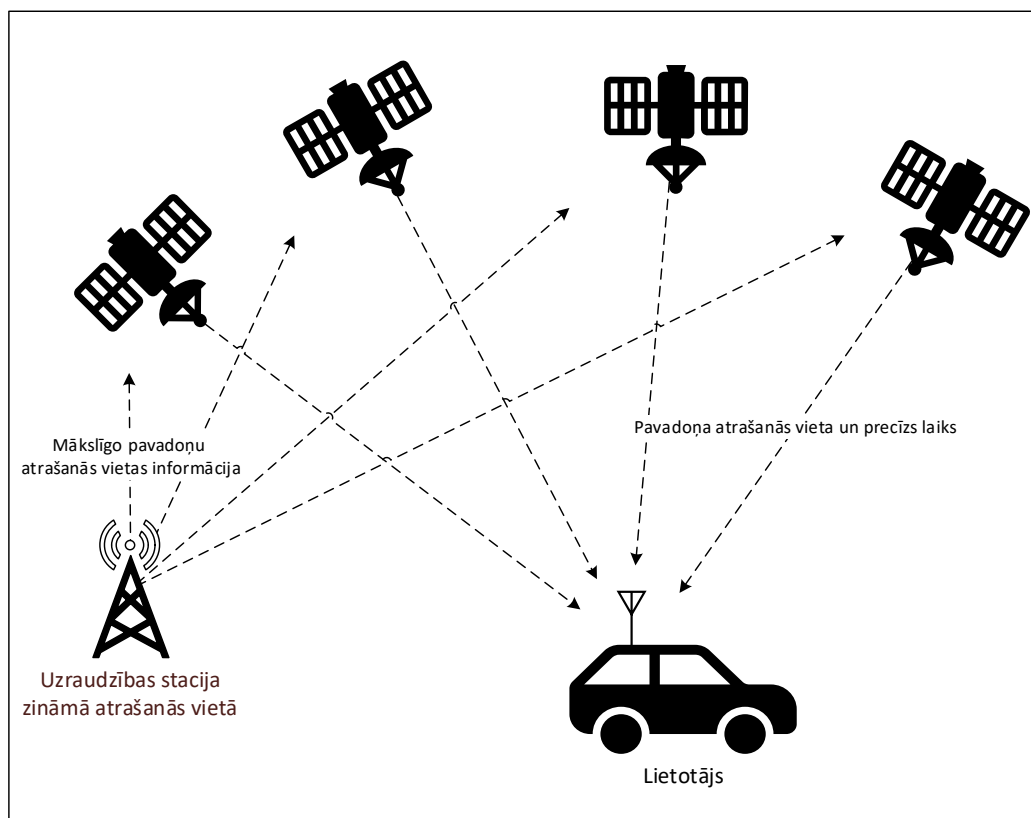
Inerciālo mērījumu sensoru priekšrocības ir reizē arī to trūkumi. Sensoram nav nepieciešama ārējā vide, lai noteiktu ātrumu vai pārvietojumu, tomēr, paļaujoties tikai uz iekšējo sistēmu, kļūdas uzkrāšanās ir nenovēršama.

1.4. Globālā navigācijas satelītu sistēma

Globālā navigācijas satelītu sistēma jeb GNSS ir vairāku mākslīgu zemes pavadoņu navigāciju sistēmu kopums, kas izmanto zemes mākslīgo pavadoņu signālus absolūtās pozīcijas noteikšanai. GNSS ietilpst ASV izstrādātā globālā pozicionēšanas sistēma (GPS), Krievijai piederošā sistēma GLONASS un Eiropas Savienības “Galileo”, kā arī vairāki reģionālie navigācijas risinājumi. Zemes mākslīgie pavadoņi nepārtraukti sūta signālu ar savu precīzu atrašanās vietas informāciju un laiku, kad ziņa izsūtīta. Tā, kā ir zināms šī signāla pārvietošanās ātrums atmosfērā, no vairākiem šādu satelītu signāliem, saņemējam ir iespējams izrēķināt atrašanās vietu. Bez maksas pieejamās frekvencēs raidītais signāls nodrošina pozicionēšanu ar precizitāti līdz 1m, bet komerciālās vai militārās frekvencēs raidītais šifrētais signāls nodrošina atrašanās vietas datus ar precizitāti līdz 1 cm.

Dažādās orbītās ap Zemi riņķo vismaz 24 mākslīgie pavadoņi, nodrošinot to, ka jebkurā vietā, jebkurā laikā iespējams uztvert signālu no vismaz 4 pavadoņiem. Uz Zemes atrodas bāzes stacijas, kas nepārtraukti seko līdz precīzai šo mākslīgo pavadoņu atrašanās vietai un nosūta to

tiem. Pēc tam šo atrašanās vietas informāciju un precīzo laiku noraida uz Zemi. Uztvērējs šos signālus saņem un apstrādā (skatīt 1.3. attēlu) Lai GNSS lietotājs varētu precīzi noteikt savu atrašanās vietu, tam jāuztver vismaz 4 mākslīgo pavadoņu signāli. Pirmie 3 pavadoņi nepieciešami, lai iegūtu garuma un platuma koordināti, kā arī augstumu virs zemes, bet ceturtais pavadoņs nepieciešams, lai sinhronizētu uztvērējā iebūvēto pulksteni, tajā pašā laikā noskaidrojot aprēķinu kļūdu iepriekš saņemtiem datiem.

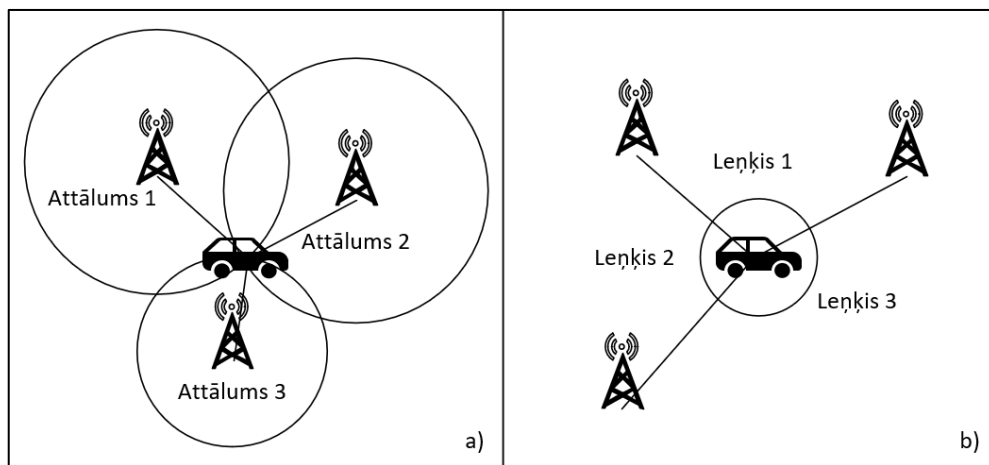


1.3. att. Vienkāršota GNSS darbības shēma

Kad robotam nepieciešama pozīcijas noteikšana apkārtējā vidē, globālā navigācijas sistēma ir viens no labākajiem risinājumiem, kas būtu jāizmanto ikreiz, kad iespējams (Siegwart & Nourbakhsh, 2011). Lai gan tehnoloģija, kas nepieciešama, lai šī sistēma strādātu, ir ļoti sarežģīta un dārga, galalietotājam pietiek vien savam robotam pievienot GNSS uztvērēju. Visus aprēķinus veic uztvērēja modulis, kas izvada koordinātu vērtības. Tomēr šai tehnoloģijai ir vairāki trūkumi. Signāls, ko saņem uztvērējs, ir ļoti vājš, tas neiet cauri ēku sienām – to var apzināti traucēt, slāpēt vai izkropļot. Tāpēc robots nedrīkst paļauties uz GNSS, kā vienīgo pozicionēšanas vai odometrijas risinājumu, nodrošinot papildu sensorus GNSS signāla pazušanas gadījumā.

1.5. Raidošu bāku lokalizācijas sistēmas

Raidošu bāku lokalizācijas sistēmas visbiežāk ir pielietotas patstāvīgās noslēgtās vidēs, piemēram, lidmašīnās, kuģos vai rūpnīcās (Borenstein et al., 1997). Līdzīgi, kā GNSS, robots uztver signālu no vismaz 3 raidošām bākām zināmās atrašanās vietās. Tomēr, atšķirībā no GNSS, šīs bākas atrodas daudz tuvāk nekā mākslīgie pavadoņi, tādējādi nav problēmas ar saņemtā signāla stiprumu un kvalitāti. Eksistē divu veidu raidošu bāku lokalizācijas sistēmas – tādas, kas izmanto trilaterāciju un tādas, kas izmanto triangulāciju. Trilaterācijā pozīciju nosaka, izmantojot attālumu no vismaz 3 zināmiem punktiem telpā (skatīt 1.4. attēlu a)). Attālumu iespējams noteikt ar lidojuma ilguma (angļu val. *time-of-flight*) principu. Nav svarīgi, vai signāls ir raidīts no bākām un uztverts uz robota, vai raidīts no robota un uztverts vairākos punktos apkārtējā telpā. Pirmais variants ir praktiskāks, ja robots darbojas no akumulatoriem, vai telpā paredzēts lokalizēt vairāk nekā vienu robotu, bet otrais tad, ja robota pozīcijas aprēķināšana un vadīšana nenotiek pašā robotā. Triangulācijā pozīciju nosaka, izmantojot leņķus starp uztvertajiem signāliem (skatīt 1.4. attēlu b)). Triangulācijas trūkums ir tāds, ka bākām visu laiku ir jābūt redzes laukā, kas apgrūtina to pielietošanu vidē ar daudz šķēršļiem (Ciezkowski, 2017).



1.4. att. a) vienkāršota trilaterācijas shēma; b) vienkāršota triangulācijas shēma

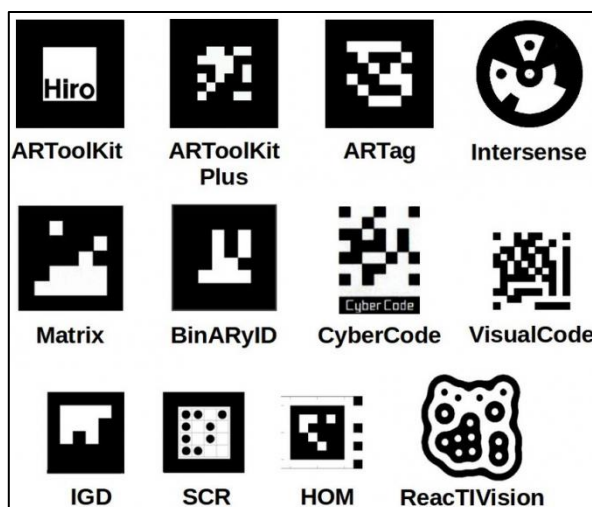
Kā aktīvās bākas var izmantot arī nespecializētas ierīces, kas jau ir sastopamas mums apkārt. Viens no populārākajiem variantiem ir Wi-Fi piekļuves punkti, jo pārsvarā gadījumu infrastruktūra jau ir izveidota. Tad, ja ir zināma precīza šo piekļuves punktu atrašanās vieta, ir iespējams ar trilaterācijas metodi un saņemtā signāla stipruma vērtību aprēķināt robota pozīciju telpā (Malyavej et al., 2013).

Aktīvi raidošo bāku priekšrocības ir augstā uzticamība un precizitāte gan iekšējās, gan ārējās apstākļos, tomēr, lai pielietotu šādu risinājumu, ir nepieciešams pirms tam izveidot infrastruktūru, tāpēc šo metodi ne vienmēr ir iespējams pielietot.

1.6. Orientieru un objektu atpazīšana

Sigvarta un Nurbakša pētījumā (Siegwart & Nourbakhsh, 2011) ir piedāvāts orientierus iedalīt divās grupās – objekti, kas konkrētā vidē atrodas organiski, vai mākslīgi veidoti, piemēram QR kodi vai kāds cits unikāls, ar sensoriem viegli atšķirams veidojums (skatīt 1.5. attēlu). Kad robots ierauga kādu no šiem orientieriem un ir zināma tā precīzā atrašanās vieta, atliek vien noteikt relatīvo robota pozīciju un ir iegūta robota atrašanās vieta ar augstu precizitāti. Viens no priekšnosacījumiem labai orientieru pozicionēšanas sistēmai ir orientiera unikalitāte apkārtējā vidē. Robotam ir jāspēj precīzi noteikt orientiera robežas, pagrieziena leņķi un unikālās iezīmes. Ja orientieris kontrastē ar fonu, to ir iespējams daudz ātrāk atpazīt, nav nepieciešama liela attēlu apstrādes veikspēja, un viss pozicionēšanās process spēj norisināties daudz ātrāk. Tāpēc visbiežāk ir izmantota tieši mākslīgos orientieros bāzēta pozicionēšanās sistēma (Alatise & Hancke, 2020).

Dabīgie orientieri ir objekti, kam apkārtējā vidē ir arī kāds cits pielietojums, nevis tikai robotu pozicionēšana. Piemēram, sienas, stūri, durvis, gaismas. Bakalaura darba autors uzskata, ka gadījumā, ja laikus paredzēts, ka mājā būs jāorientējas robotiem, var izstrādāt arī funkcionālus mākslīgos orientierus, panākot kompromisu, starp pozicionēšanas veikspēju un interjera dizainu, piemēram, izkārtējot mirdzdiodeņu gaismas unikālos rakstos katrai telpai vai iestrādājot šos rakstus griestu paneļos.



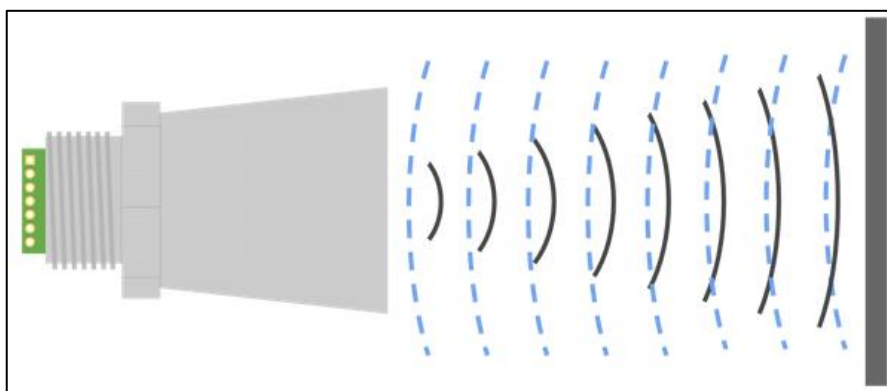
1.5. att. Vairāki mākslīgo orientieru piemēri, attēls aizgūts no (Proni, 2019)

Kā priekšrocības orientieros bāzētai lokalizācijas metodei Kempbells un citi (2020) uzsver augstu precizitāti, uzticamību un mazas sensoru izmaksas, tomēr šīs metodes trūkumi ir, mākslīgo orientieru gadījumā, nepieciešamība iepriekš vidē precīzi izvietot orientierus, un pastāv risks, kādam tos ļaunprātīgi sabojāt. Dabīgo orientieru gadījumā, iespējamās neprecizitātes, un nepieciešama liela skaitļošanas jauda.

1.7. Radaru un Sonāru tehnoloģijas

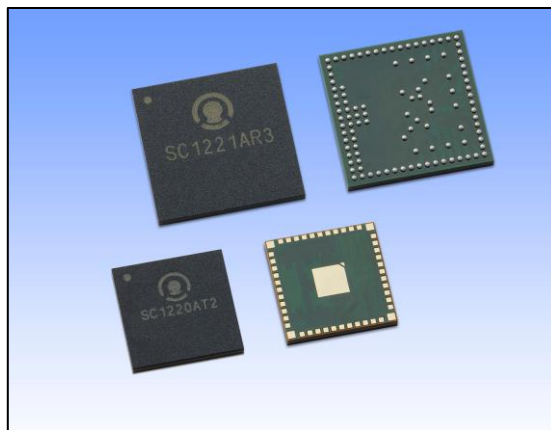
Radaru un sonāru sensori izmanto pašu izstarotus viļņus objektu detektēšanai. Viļņi ir izstaroti un pēc tam uztverti, kad tie atstarojas no kāda objekta. Abas tehnoloģijas izmanto viļņa pārvietošanās ilguma (angļu val. *time-of-flight*) mērījumus, lai noteiktu attālumu līdz objektam. Lai arī pamata ideja abiem sensoriem ir līdzīga – raidīt viļņus un uztvert tos atpakaļ, tomēr pielietojumi tiem ir atšķirīgi.

Sonāru sensori izmanto skaņas viļņus (virs 20KHz) (Kleeman et al., 2008). Tie spēj darboties netīrā, mitrā vidē, tiem nav vajadzīga gaisma, un tie spēj uztvert caurspīdīgus objektus (Zaffar et al., 2018). Tie ir ļoti kompakti, uzticami un strādā plašā leņķī. Pierādījums šo sensoru popularitātei ir pielietojums automašīnu stāvvietā novietošanas sensoros (angļu val. *parking sensors*). Tomēr, kā trūkumi sonāru sensoriem jāuzskaita īss maksimālais mērījumu attālums, mīkstas virsmas absorbē un neatstaro skaņas viļņus, kā arī šiem sensoriem nepieciešama gaisa vai ūdens vide, pa kuru skaņas viļņiem pārvietoties. Vairāki roboti vienā telpā, izmantojot vienādus sensorus, viens otram traucētu. Atsevišķās vidēs, piemēram, zem ūdens, sonāra sensori praktiski ir vienīgais lietojamais risinājums, gaismas trūkuma un skarbo apstākļu dēļ (Kleeman et al., 2008).



1.6. att. Ultraskaņas sensora darbības princips, attēls aizgūts no (Bakker, 2019)

Radari turpretim mērījumos izmanto radio viļņus, spējot novērtēt attālumu un ātrumu attiecībā pret citiem objektiem. Sākotnēji tehnoloģija izmantoja lielas antenas un tika izstrādāta militārām vajadzībām, lai noteiktu ienaidnieka lidmašīnas un raķetes. Mūsdienās radaru pielietojums kļuvis krietni plašāks – automātiska durvju atvēršana, automašīnu ātruma kontrole uz ceļiem, žestu vadība elektroniskām ierīcēm, automašīnu adaptīvā kruīza kontrole, u.c. Attiecīgi pielietojumam, ir pieejami vairāku izmēru un jaudu radari, no metra attālumā žestu uztveršanai paredzētiem, līdz pat 150m attālumā šķērslī detektējošiem. Drīzumā masu ražošanā nonāks pavisam mazs mikroskāpā integrēts 60GHz radars, kas paredzēts precīzai žestu nolasīšanai elektroniskās ierīcēs (Kalnoskas, 2019) (skatīt 1.7. attēlu). To noteikti varēs pielietot arī mazos robotos apkārtējās vides uztverei. Tā, kā radari tipiski izmanto daudz augstākas frekvences viļņus nekā ultraskaņas sensori, tiem ir lielāka izšķirtspēja, kas ļauj noteikt vairākus objektus vienlaicīgi (Campbell et al., 2018). Izmantojot Doplera efektu, radars spēj noteikt arī uztvertā objekta pārvietošanās ātrumu un virzienu. Radari līdzīgi kā sonāri spēj darboties netīrās, izaicinošās vidēs bez gaismas, bet to trūkums ir ierobežotais redzes leņķis un maza informācija par detektēto objektu.

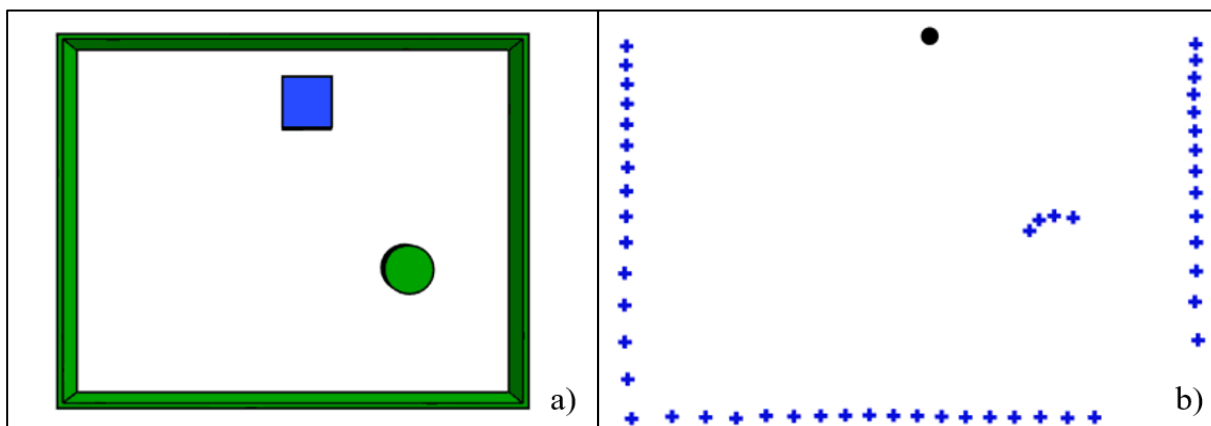


1.7. att. mikroskāpā iebūvēts 60GHz radars, attēls aizgūts no (Socionext, 2018)

1.8. Gaismas sensoru sistēmas

Gaismas sensori izmanto gaismas starus, lai noteiktu attālumu līdz šķērslim. Šādi sensori pārsvarā strādā infrasarkanās gaismas spektrā, lai nekaitētu cilvēku acīm. Optisko sensoru darbības princips ir līdzīgs sonāru sensoriem, tikai skaņas viļņu vietā ir gaisma. Tajos iebūvēts gaismas avots izvada gaismas impulsu, un uztvērējs mēra, vai šis impulss nonāk atpakaļ sensorā. Vienkāršākie no risinājumiem, ko parasti pielieto šķēršļu detektēšanā, spēj noteikt tikai vai to priekšā ir vai nav kāds objekts, iepriekš fiksētā attālumā, atkarībā no sensora modeļa vai kalibrācijas. Sarežģītāki risinājumi spēj noteikt arī attālumu līdz šķērslim,

sasniedzot ļoti augstu precizitāti. Tas ir panākts mērot laiku, līdz izvadītais gaismas impulss nonāk atpakaļ sensorā (angļu val. *time-of-flight* princips). Šāda darbības principa sensorus literatūrā bieži klasificē zem abreviatūras LIDAR (angļu val. *light detection and ranging*). Eksistē arī skenējošie laidari, kas, rotējot ap savu vertikālo, asi spēj iegūt punktu mākonī ar attālumiem plaknē (skatīt 1.8. attēlu), pievienojot arī rotāciju ap horizontālo asi, iespējams iegūt 3 dimensiju punktu mākoņus (Bi et al., 2018). Tā, kā mērījumos ir pielietots šaurs gaismas stars, tiek iegūtas precīzas, bet diskrētas attālumu vērtības, kas pēc tam ar algoritmiem jāsavieno, lai iegūtu informāciju par apkārtējo vidi.



1.8. att. Plaknē skenējoša lāzera sensora iegūto datu aptuvena ilustrācija: a) vide; b) iegūtie mērījumi, attēls modificēts no (Wikipedia, 2020)

Optisko sensoru priekšrocība ir augsta mērījumu precizitāte un izšķirtspēja, tomēr tehnoloģija joprojām ir dārga un, mērījumos lietotās gaismas īpašību dēļ, nav iespējams detektēt vairākus materiālus, tai skaitā stiklu.

1.9. Vizuālā odometrija

Termins “vizuālā odometrija (VO)” pirmo reizi tika definēts 2004. gadā Nistera et al. darbā ar tādu pašu nosaukumu (2004). Šāds nosaukums tika izvēlēts, jo vizuālajai odometrijai ir līdzīgs darbības princips ar riteņu odometriju (Scaramuzza & Fraundorfer, 2011). Vizuālajā odometrija pēta, kā no vairākiem pēc kārtas sekojošiem kameras kadriem noteikt kameras trajektoriju un pārvietojumu (He et al., 2019). Attiecīgi, šādu kameru piestiprinot pie robota, būtu iespējams noteikt arī robota pārvietojumu telpā.

Lai arī pamatā vizuālā odometrija ir pārvietojuma noteikšana starp 2 vai vairākiem pēc kārtas sekojošiem kameras kadriem, ir vairākas metodes šī pārvietojuma noteikšanai, katra ar saviem ieguvumiem un trūkumiem. Darbos (Fantoni & Sanahuja, 2014; Aqel et al., 2016) ir apkopotas 3 galvenās pieejas pārvietojuma iegūšanai no attēliem:

- 1) Iezīmju bāzēta pieeja – šajā metodē attēlā tiek atrastas iezīmes, izteiktas līnijas, stūri, kuras pēc tam tiek sameklētas arī nākamajā kadrā, pikseļu pārvietojumu šīm iezīmēm starp kadriem var pārvērst reālajā pārvietojumā. Šī metode ir vairāk piemērota vidēm ar izteiktu tekstūru.
- 2) Pikseļu intensitātes pieeja – šajā metodē netiek meklētas atsevišķas iezīmes, bet tiek salīdzināts pikseļu intensitātes pārvietojums. Šī metode ir vairāk piemērota vidēm bez izteiktas tekstūras.
- 3) Hibrīda pieeja (iezīmju un intensitātes) – dažās situācijās, kad ne viena ne otra metode nesniedz uzticamus rezultātus, nepieciešams izmantot hibrīda pieeju. Šāds algoritms arī būtu jāpielieto, ja iepriekš precīzi nav zināms, kādā vidē odometrija būs jāveic.

Vizuālajai odometrijai var pielietot praktiski jebkādu kameru, tomēr stereo vai krāsu un dziļuma kameras spēs nolasīt arī dziļuma datus, kas var noderēt robota uzdevumu veikšanā. Palielinoties iegulto sistēmu skaitļošanas jaudām un algoritmu optimizācijai, ir iespējams veikt vizuālai odometrijai nepieciešamos aprēķinus ar lielu skaitu kadru sekundē, ļaujot šo metodi pielietot arī robotos, kas pārvietojas salīdzinoši ātri, piemēram, bezpilota lidaparātos (Forster et al., 2014). Vizuālās odometrijas priekšrocības ir salīdzinoši mazas izmaksas, augsta precizitāte un iespēja iegūt papildu informāciju no attēliem (He et al., 2019).

Vizuālās odometrijas trūkumi ir nepieciešamā skaitļošanas jauda un nepieciešamība pēc labi izgaismotas vides ar izteiktām tekstūrām, ēnas, kas krīt no kustīgiem objektiem vai paša robota var negatīvi ietekmēt šī risinājuma precizitāti (Aqel et al., 2016).

1.10. Sensoru komplekti pozicionēšanas uzdevumos.

Šī darba mērķis nav padziļināti apskatīt pozicionēšanā lietotos sensoru datu sapludināšanu algoritmus, tomēr ir jāpiemin, ka apvienojot vairāku veidu sensoru rādījumus, iespējams, ievērojami veicināt visas sistēmas kopējo veiktspēju un novērst katra individuālā sensora trūkumus. Pētījumos (Alatise & Hancke, 2020; Campbell et al., 2018; Tariq et al., 2017) ir apskatīti vairāku sensoru datu sapludināšanas koncepti, ar attiecīgiem ieguvumiem un skaitļošanas izmaksām. Šo avotu piedāvātie risinājumi apkopoti. 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Sensoru kombinācijas un to ieguvumi

Sensoru komplekts	Ieguvumi
GNSS un inerciālo mērījumu sensors	Spēja noteikt pozīcijas izmaiņas laikā, kad nav pieejams GNSS signāls. Inerciālā mērījumu sensora uzkrāto kļūdu likvidē izmantojot atsaisti pret GNSS. Rezultātā tiek iegūts precīzāks pozicionēšanas risinājums, nekā, ja tiktu izmantots tikai GNSS, kas kādu laika posmu spēj strādāt arī traucētas GNSS signāla uztveres apstākļos. Šāds risinājums neprasa daudz skaitļošanas jaudas.
Inerciālo mērījumu sensors un magnetometrs	Magnētiskā lauka mērījumos bieži ir anomālijas, kas rodas magnetometram apkārt esošo elektroierīču vai metāla objektu dēļ. Inerciālo mērījumu sensors šo anomāliju laikā spēj kompensēt kļūdu, kā rezultātā var iegūt uzticamākus datus par robota rotāciju. Līdzīga sistēma ir iebūvēta arī eksperimentā lietotā “Jaguar V4” platformā, kur telemetrijas datus robota rotāciju aprēķina robota kontrolleris, sapludinot kompasa un inerciālo mērījumu rādījumus. Bieži vien abi šie sensori jau atrodas vienā modulī, tāpēc nav nepieciešami atsevišķi sensori, lai veiktu šo datu sapludināšanu.
Kamera un inerciālo mērījumu sensors	Uzlabota pozicionēšanas precizitāte, būtiski nepalielinot risinājuma izmaksas
Saņemtā signāla stipruma indikators un inerciālais sensors	Uzlabota pozicionēšanas precizitāte un noturība pret trokšņiem.
Riteņu enkoderi, inerciālo mērījumu sensors	Uzlabota pozicionēšanas precizitāte, palielinot robota pagrieziena leņķa precizitāti.
Kamera un skenējošais lāzera sensors	Apvienojot punktu mākoņa datus no skenējošā lāzera sensora un krāsas datus no kameras iespējams ne tikai lokalizēties telpā, bet arī veikt apkārtējo objektu atpazīšanu un izsekošanu, atļaujot veikt sarežģītākus uzdevumus. Iespējams izveidot detalizētu apkārtējas vides karti, kas, piemēram, gadījumā, ja robotu vada operators, palīdzētu labāk saprast apkārt notiekošo.
Vizuālā navigācija un riteņu enkoderi	Apvienojot abas sistēmas, tiek iegūta precizitāte, kas pārspēj katru no sistēmām atsevišķi.

Pētot informācijas avotus un apkopojot datus par lokalizācijas risinājumiem, var secināt, ka katram robota darbības scenārijam ir jāatrod vispiemērotākais sensoru kopums, kas iekļaujas budžeta, veiktspējas un skaitļošanas jaudas kritērijos. Ne vienmēr šādu rezultātu iespējams panākt, izmantojot tikai vienu no apskatītajiem sensoriem, tāpēc, lai sabalansētu iegūto datu precizitāti ar izmaksām ir vērts izmantot vairākus lētākus sensorus ar dažādiem darbības principiem, pēc tam apvienojot iegūtos datus. Visbiežāk, kā papildu sensoru izmanto tieši

inerciālo mērījumu sensoru, tā vienkāršās lietošanas un mazo izmaksu dēļ, tomēr kļūdas uzkrāšanās to neļauj pilnvērtīgi pielietot kā galveno sensoru pozicionēšanas sistēmas. 1.2. tabulā redzams apskatīto pozicionēšanas risinājumu priekšrocību un trūkumu apkopojums.

1.2. tabula

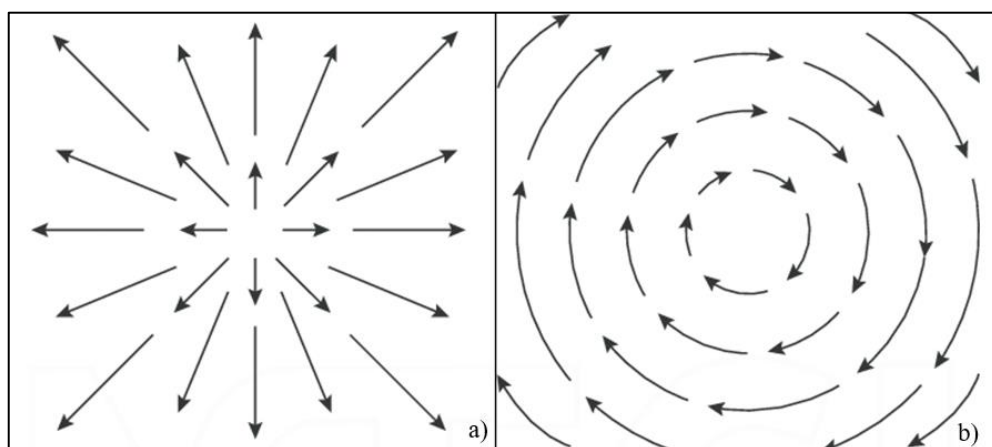
Dažādu pozicionēšanas sensoru tehnoloģiju priekšrocību un trūkumu apkopojums

Sensora / tehnoloģijas veids	Priekšrocības	Trūkumi
Riteņu odometrija	Lēti, vienkārši, lielai daļai industriālu motoru jau iebūvēts risinājums.	Nevar ilgstoši lietot bez atsaistes pret citu absolūto pozicionēšanas sistēmu, jo kļūda uzkrājas.
Inerciālā navigācijas sistēma	Nav nepieciešama ārējā vide, lai veiktu mērījumus.	Nevar ilgstoši lietot bez atsaistes pret citu absolūto pozicionēšanas sistēmu, jo kļūda uzkrājas. Neliels troksnis nomērītā paātrinājumā veido lielu kļūdu pārvietojuma aprēķinos.
Raidošu bāku lokalizācijas sistēmas	Augsta precizitāte, gan iekštelpās, gan āra apstākļos	Iepriekš jāsagatavo infrastruktūra, precīzi izvietojot signālu raidošās bākas.
Orientieru un objektu atpazīšana	Augsta precizitāte iekštelpās, sevišķi atpazīta objekta tuvumā.	Iepriekš jāsagatavo infrastruktūra, precīzi izvietojot dažādus orientierus vidē, kur plānots pielietot šo metodi.
Globālā navigācijas sistēma	Nepieciešams tikai uztvērējs, ko viegli pievienot robotam. Infrastruktūra jau ir izveidota. Precizitāte līdz 1m jebkādos vizuālos apstākļos.	Nestrādā iekštelpās, vai māju tuvumā. GNSS signāli ir vāji, tos kāds var ļaunprātīgi slāpēt, vai tajos var rasties traucējumi apkārtējās vides dēļ.
Radaru un ultraskaņas tehnoloģijas	Plats sensora redzes leņķis. Nav nepieciešama gaisma. Spēj darboties izaicinošās vidēs.	Sensoru lasījums ļoti atkarīgs no priekšmeta materiāla vai novietojuma
Optiskie sensori	Augsta precizitāte.	Sensoru lasījums ļoti atkarīgs no priekšmeta materiāla vai novietojuma, lielākā daļa risinājumu neredz stiklu. Precīzākie risinājumi joprojām ir dārgi
Vizuālā odometrija	Vidēji augsta precizitāte. Salīdzinoši mazas izmaksas. Var izmantot parastas kameras. Kameras datus var paralēli lietot citiem mērķiem, piemēram, objektu atpazīšanai.	Precīzākie risinājumi ir dārgi un specifiski. Atkarībā no izšķirtspējas var būt nepieciešama liela skaitļošanas jauda.

2. OPTISKĀS PLŪSMAS SENSORU PIELIETOJUMI

2.1. Optiskā plūsma

Optiskās plūsmas ideja ir cēlusies no bioloģijas pētījumiem, kur ir apskatīts veids, kā kukaiņu un putnu acis redz vidi tiem apkārt (Chao et al., 2014). Šobrīd ir divas plaši lietotas optiskās plūsmas definīcijas, tai skaitā šķietamas attēla kustības un ātrumu vektoru lauka definīcija (Baker et al., 2011). Būtībā starp abām definīcijām atšķiras tikai iegūto datu veids. Šķietamās attēla kustības definīcijas gadījumā tiek iegūts pikseļu pārvietojuma ātrums, bet vektoru lauka gadījumā – pārvietojuma vienības. Optiskā plūsma ir šķietama attēla iezīmju kustība, kas radusies no relatīvas kustības starp kameru un attēlā redzamiem objektiem (Fantoni & Sanahuja, 2014). Praktiski optisko plūsmu varētu salīdzināt ar attēla izplūšanu acs radzenē, kad tiek novērota ātra kustība. Izskaitļoto plūsmas vērtību vizualizē ar vektoru lauku, kuru virzieni apzīmē pikseļu kustības virzienus, bet garumi pārvietojumus vai ātrumus. “Optiskā plūsma spēj dot informāciju par objektu izkārtojumu telpā un šī izkārtojuma izmaiņu ātrumu” (Horn & Schunck, 1981). Šo informāciju par objektu robežām iespējams iegūt no vektoru nesakritībām iegūtajos plūsmu gradientos. Optiskā plūsma sevī ietver gan kameras pārvietojuma, gan uztverto objektu savstarpējā pārvietojuma vērtības (Chao et al., 2014), būtiski palielinot no viena sensora iespējami iegūstamo informācijas daudzumu. 2.1. attēlā redzami optiskās plūsmas vektoru gradientu piemēri divām no iespējamām kameras kustībām telpā.



2.1. att. Optiskās plūsmas gradienti – a) kustība uz priekšu; b) rotācija; attēls aizgūts no (de et al., 2012)

Vairāku gadu laikā ir veikts liels skaits pētījumu, kuros secināts, ka optisko plūsmu dzīvnieku pasaulē dažādās situācijās noteikti pielieto gan putni, gan kukaiņi, gan arī zīdītāji

(Chao et al., 2014). Piemēram, bites, paceļoties un nolaižoties uz augu ziediem, spēj veikt manevrus ar apbrīnojami augstu precizitāti un piekorigēt savu trajektoriju, lai kompensētu sava svara izmaiņas, pēkšņas vēja brāzmas vai izvairītos no šķēršļiem (Chao et al., 2014). Šie un citi bioloģijā bāzēti atklājumi veicinājuši pētījumus par jaunu, bioloģiskos procesos bāzētu sensoru izveidi, piemēram, sarežģītu, cilvēka acij līdzīgu kameru, vai tieši pretēji, relatīvi vienkāršu, no vairākām mazām šūnām sastāvošu “kukaiņa aci” (Chao et al., 2014).

Optisko plūsmu nosaka starp vairākiem pēc kārtas sekojošiem kameras kadriem, tāpēc nav nepieciešama specifiska kamera, lai to pielietotu. Tomēr iegūto attēlu kvalitāte var ietekmēt aprēķinātās plūsmas un attiecīgi arī pārvietojuma vērtības. Jāņem vērā arī kameras izšķirtspēja un kadru skaits sekundē, jo lielākam datu apjomam nepieciešama lielāka skaitļošanas jauda. Kad ir iegūts attēls, to ir nepieciešams apstrādāt. Daļai no sensoriem ir iebūvēts attēlu apstrādes procesors mikrokontroliera vai FPGA veidolā, kas atvieglo šāda risinājuma implementēšanu galaproduktā. Šādi vienā korpusā savietoti sensori un skaitļošanas mehānismi ir robusti un spēj izvadīt jau gatavas pārvietojuma vērtības, tomēr tiem nevar mainīt pielietoto plūsmas aprēķina metodi, kā rezultātā sensors var vienkārši nestrādāt nepieciešamajā vidē (Baker et al., 2011). Turpretim risinājumi, kas sastāv no atsevišķas kameras un attēla apstrādes procesora, ir daudz konfigurējamāki. Lietotājam ir pilna kontrole pār visiem kameras un attēla apstrādes procesora iestatījumiem, kā arī iespējams lietot jebkuru algoritmu, ko iespējams implementēt pielietotajā attēlu apstrādes procesorā.

Visiem zināms piemērs optiskās plūsmas sensoram ir optiskajās datorpelēs pielietotie sensori. Datorpeles darbojas strikti kontrolētos apstākļos, uz līdzenas virsmas, sensoram visu laiku atrodoties fiksētā attālumā no virsmas, izmantojot savu kontrolētu apgaismojumu. Tāpēc ir iespējams sasniegt konstantus paredzamus mērījumus, kur noteiktās pārvietojuma vienības mērogs, virsmas kvalitāte un mērījumu precizitāte nemainās laikā. Datorpeļu gadījumā sistēma strādā slēgtās cilpas režīmā, kur jebkādas nobīdes tiek kompensētas, lietotājam redzot kursoru datora ekrānā. Mēģinot optiskās plūsmas sensorus pielietot vidēs ar mazāk zināmiem ierobežojumiem, piemēram, lielākā attālumā no virsmas, nav vienkārši, jo, visticamāk, šis attālums laikā mainīsies. Izmainoties šim attālumam, izmainās arī pārvietojuma mērogs. Lai novērstu šādas problēmas, kā iepriekš apskatīts, izmanto datu sapludināšanu ar inerciālo mērījumu sensoriem. Vēl viena problēma ir apgaismojums. Datorpelēs lietotie sensori strādā infrasarkanās gaismas spektrā. Saules gaisma satur šo spektru, tāpēc dienasgaismā ārpus telpām problēmām nevajadzētu būt, bet iekštelpās, vai ēnainā vidē apgaismojums var būt nepietiekams. Ir iespējams izvietot infrasarkanās mirdzdiodes, lai izgaismotu sensora uztverto virsmu, bet

šādas infrasarkanās diodes patērē lielu daudzumu elektrības, kā rezultātā samazinās potenciālais mobila robota darbības laiks.

Algoritmi optiskās plūsmas aprēķiniem attēlos ir balstīti parciālos atvasinājumos, diferenciālvienādojumos un signālu teorijā (Beauchemin & Barron, 1996). Liela daļa algoritmu bija izstrādāti jau pirms vairāk nekā 40 gadiem, tolaik neeksistēja tehnoloģija, kas tos spētu reālajā laikā darbināt pat uz tā laika jaudīgākajām un dārgākajām darbstacijām (Horn & Schunck, 1981). Šobrīd, tehnoloģijām strauji attīstoties, iespējams sarežģītus un precīzus algoritmus darbināt uz mobiliem robotiem vai lidaparātiem, veicinot šīs tehnoloģijas popularitāti starp lokalizēšanas risinājumiem. Daži aktuālie pētījumi apskata iespējamus mākslīgo neironu tīklu pielietojumus optiskās plūsmas noteikšanā izmantojot paralēlus procesus vēl labākas veiktspējas iegūšanai (Ilg et al., 2017; Lee et al., 2020). Šī bakalaura darba mērķis ir apskatīt optiskās plūsmas sensoru pielietojumus, padziļināti nepētot to algoritmu matemātiskos pamatojumus un algoritmu darbības principus.

2.2. Optiskās plūsmas pētījumu apskats

Vairākos avotos (Nadour et al., 2019; Barron et al., 1994; Fantoni & Sanahuja, 2014), kā galvenās ir apskatītas 4 optiskās plūsmas noteikšanas algoritmu grupas:

- 1) Fāzu korelācijā bāzētas metodes – Šajā metodē tiek noskaidrotas attēla pikseļu relatīvās frekvences un, analizējot šo frekvenču izmaiņu ar signālu teorijas principiem, iespējams noteikt attēla pārvietojumu. Tēma plašāk apskatīta darbā (Beauchemin & Barron, 1996).
- 2) Enerģijā bāzētas metodes – Šajā metodē ir pielietoti speciāli attēla filtri, kas aprēķina “enerģiju” konkrētam pikseļu blokam. Šī vērtība tiek salīdzināta ar enerģijas vērtībām no nākamā kadra. Plašāk pielietotā metode apskatīta darbos (Zimmer, 2009; Horn & Schunck, 1981).
- 3) Diferenciālās metodes – Šīs metodes izmanto blakus esošu pikseļu intensitātes funkcijas atvasinājumus, lai noteiktu pikseļu intensitātes pārvietojumu. Plašāk metode apskatīta šādos avotos (Giachetti et al., 1998; Beauchemin & Barron, 1996; Baker et al., 2011)
- 4) Blokos bāzētas metodes – Šīs metodes salīdzina lielus pikseļu blokus starp diviem kadriem, lai noteiktu optisko plūsmu. Plašāk apskatīta darbos (Fuh & Maragos, 1989; Barron et al., 1994).

Mobilu robotu aprīkošana ar optiskās plūsmas sensoriem pētīta vairākos darbos, daļa no tiem uzskaitīti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Pētījumi, kuros mobils robots tiek aprīkots ar optiskās plūsmas sensoriem

Robots	Izmantotais sensors	Pielietojums	Avots
Mobils robots ar 3 riteņiem un “kiwi-drive” piedziņu	“ADNS-9500” optiskās peles sensors	Lokalizācijas uzlabošana salīdzinājumā ar riteņu odometriju.	(Tajti et al., 2016)
Miniatūrs četru rotoru lidaparāts	Modificēts “ADNS-9500” optiskās peles sensors	Lokalizācijas uzlabošana salīdzinājumā ar inerciālo odometriju.	(Briod et al., 2013)
Mobils robots ar divu riteņu piedziņu	Agilent “ADNS-2051” optiskās peles sensors	Lokalizācijas uzlabošana salīdzinājumā ar riteņu odometriju.	(Sorensen et al., 2003)
Vertikālās pacelšanās lidaparāts	Kamera	Lidošana virs un nolaišanās uz braucošas platformas	(Herissé et al., 2012)
Bezpilota lidaparāts (helikoptera modelis)	CMOS kameras sensors	Navigācijas precizitātes uzlabošana sapludinot GNSS, IMU un kameru	(Ding et al., 2009)

Pētījumā (Sorensen et al., 2003) tiek risināta līdzīga problēma bakalaura darba praktiskās daļas eksperimentam, bet avotos (Tajti et al., 2016) un (Briod et al., 2013) tiek pielietots tāds pats optiskās plūsmas sensora modulis, kāds atrodas praktiskajā daļā pielietotajos sensoros.

2.3. Optiskās plūsmas sensoru pielietojumu ierobežojumi

Kā ir secināts darba 1. nodaļā, katram sensoram ir savas priekšrocības un trūkumi, kā arī darbības vides ierobežojumi, tai skaitā arī optiskās plūsmas sensoriem. Pētījumā (Giachetti et al., 1998) apkopoti tipiski optiskās plūsmas sensoru pielietojuma ierobežojumi:

- 1) *Lieli pārvietojumi starp uzņemtiem kadriem* – viens no svarīgākajiem priekšnosacījumiem veiksmīgai optiskās plūsmas sensoru darbībai ir kustības ātrumam atbilstošs uzņemto kadru skaits sekundē. Gadījumā, kad sensors strādā lēni un robota pārvietošanās ātrums ir nesamērīgi liels, vairs nav iespējams savienot iezīmes no viena attēla otrā. Visi optiskās plūsmas aprēķināšanas

algoritmi darbojas tikai ar nosacījumu, ka veiktais pārvietojums starp kadriem ir relatīvi mazs (Beauchemin & Barron, 1996).

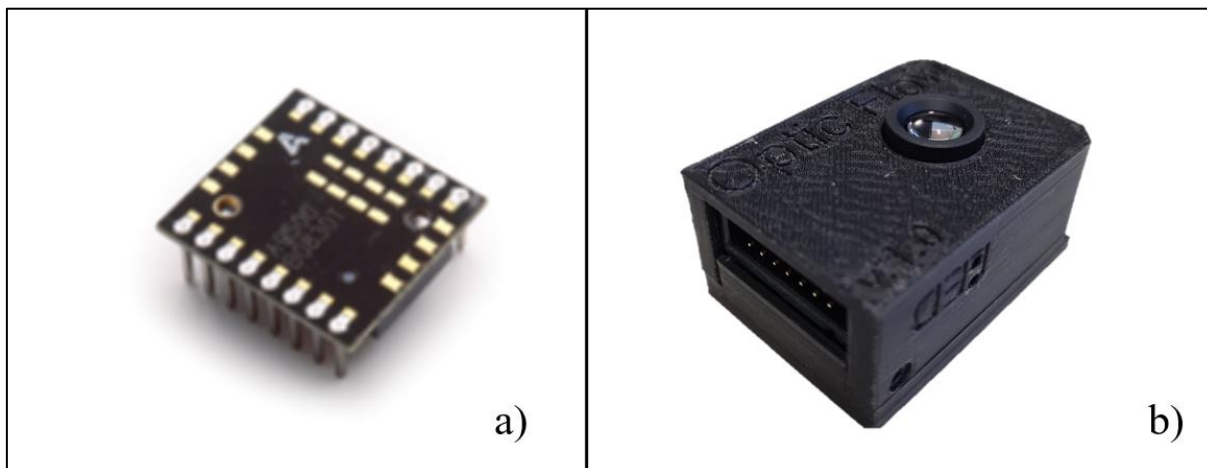
- 2) *Tekstūras trūkums apkārtējā vidē* – svarīgs faktors sensora darbībā ir apkārtējās vides tekstūru daudzums. Ja sensors atrodas tuvu vienkāršai vienmuļai virsmai, tas spēs uztvert vismazākos virsmas negludumus, pārvēršot tos iezīmēs un veiksmīgi aprēķinot optiskās plūsmas vērtību, bet, ja sensoru no šādas virsmas attālinās, tā kļūs par vienmuļu plankumu sensora matricā, nedodot nekādu pienesumu optiskās plūsmas aprēķinos.
- 3) *Triecieni un vibrācijas* – scenārijā, kad robots pārvietojas pa nelīdzenu virsmu lielā ātrumā, vai robota riteņi nav nobalansēti, ir iespējamās vibrācijas un triecieni, kas ietekmē sensoru nolasītos kadrus, radot augstas frekvences pikseļu pārvietojumus. Ja netiek pielietots šādu trokšņu nofiltrēšanas algoritms, katra šī pikseļu kustība tiek pieskaitīta aprēķinātajai optiskās plūsmas vērtībai, potenciāli radot kļūdu.

Bakalaura darba autors secina, ka veiksmīgai optiskās plūsmas implementācijai robota lokalizācijas sistēmā nepieciešams atrisināt visas 3 no iepriekšminētajām problēmām. Lai novērstu lielu pārvietojumu rašanās iespēju starp kadriem, nepieciešams izvēlēties tādu kameru, kas spēs nodrošināt nepieciešamo kadru skaitu sekundē un, gadījumā, ja attēla apstrādes procesors netiek galā ar datu apjomu, nāksies samazināt lietoto izšķirtspēju. Pret tekstūras trūkumu vidē pilnīgi nodrošināties nav iespējams, bet var pielietot algoritmu, kas spēj darboties vidē ar mazāk izteiktām tekstūrām. Lai novērstu triecienu un vibrāciju ietekmi uz kameru, var izmantot optisko attēla stabilizāciju vai kameru piestiprināt pie robota, izmantojot triecienus slāpējošu ierīci.

2.4. Eksperimentā lietotie optiskās plūsmas sensori

Eksperimentā robotizētā platforma ir aprīkota ar četriem optiskās plūsmas sensoriem, kas ir izstrādāti RTU pētnieka Andreja Zujeva vadībā. Šie sensori ir bāzēti uz “ADNS-9500” spēļu datorpeles sensora (skatīt 2.2. attēlu a)) (Pcr & Kit, 2012), kam ir izstrādāta speciāla nesējplate, pievienojot inerciālo mērījumu sensoru un SPI (angļu val. *Serial peripheral interface*) funkcionalitāti. Eksperimentā inerciālo mērījumu sensors netiks izmantots. SPI funkcionalitāte nepieciešama, lai varētu pārslēgties starp komunikāciju ar inerciālo sensoru vai optiskās plūsmas sensoru. Optiskās plūsmas sensoriem ir izveidots korpuss ar vītņi lēcas regulēšanai (skatīt 2.2. attēlu b)) un vietu, papildu apgaismojuma stiprinājumam. Papildu

apgaismojumu nodrošina izmantojot infrasarkanās diodes. Šīs modifikācijas ļauj sensoram nolasīt optiskās plūsmas rādījumus daudz lielākā attālumā no virsmas, nekā sākotnējai versijai. Teorētiski maksimālo iespējamo virsmas attālumu ietekmē lēcas parametri, virsmas tekstūra un apgaismojums.



2.2. att. a) ADNS-9500 optiskās plūsmas attēla sensors; b) RTU izstrādātā optiskās plūsmas sensora samontēta versija

Lai komunicētu ar sensoriem un nolasītu šo sensoru rādījumus, projekta ietvaros ir izstrādāts arī FPGA bāzēts risinājums, kas spēj vienlaikus nolasīt līdz pat 8 optiskās plūsmas sensorus (skatīt 2.3. attēlu). Šāda ierīce nepieciešama, jo mikrokontrolieriem vai datoriem pārsvarā nav tik daudz virknes komunikācijas pieslēgvietu, lai pievienotu vairākus sensorus. Sensoru rādījumu nolasīšanas ierīce komunicē ar datoru izmantojot virknes pieslēgvietu. Tāpat sensoru nolasīšanas iekārta nodrošina ar barošanu un iespējo spilgtuma regulēšanu infrasarkanajām apgaismojuma diodēm. Bakalaura darba autors nav līdzdarbojies sensoru un nolasīšanas ierīces izstrādē, bet ir realizējis platformu sensoru veikspējas pētījumiem. Ir svarīgi sensorus lasīt vienlaicīgi, lai uzlabotu iegūto datu kvalitāti un nezaudētu lokalizācijas precizitāti, jo kinemātiskajos modeļos ir pieņemts, ka visi mērījumi ir notikuši vienlaicīgi un katra laika nobīde starp sensoru lasījumiem ievieš papildu kļūdu rezultātos.



2.3. att. RTU izstrādāta FPGA bāzēta iekārta paralēlai sensoru nolasīšanai

“ADNS-9500” optiskās plūsmas sensoru savos pētījumos ir izmantojuši arī Briods (2013) un Tajti et al. (2016), attiecīgi, lai kontrolētu bezpilota lidaparātu un robotu ar riteņiem. Tajti et al. (2016) savā darbā apraksta mobila robota aprīkošanas procesu ar nemodificētiem ADNS-9500 sensoriem, lai uzlabotu mobila robota lokalizēšanas precizitāti. Līdzīgs scenārijs ir plānots bakalaura darba praktiskajā daļā. Atšķirībā no bakalaura darba, Tajti et al. (2016) uzlabo lokalizāciju 3 riteņu robotam ar “Kiwi-drive” piedziņas mehānismu.

“ADNS-9500” sensoru priekšrocības pielietojumam šādos pētījumos ir tā kompaktais izmērs, iespēja izvadīt individuālu pikseļu vērtības, optiskās plūsmas aprēķinu veic uz sensora plates esošais mikrokontrolieris, kā arī sensoram ir iespējams konfigurēt vairākus parametrus, kā kadru skaitu sekundē, izšķirtspēju u.c.

3. MOBILA KĀPURĶĒŽU ROBOTA LOKALIZĀCIJA AR OPTISKĀS PLŪSMAS SENSORIEM

Bakalaura darba praktiskajā daļā ir paredzēts uz kāpurķēžu mobilas robotizētas platformas uzstādīt optiskās plūsmas sensorus ar mērķi praktiski salīdzināt un novērtēt to veikspēju un precizitāti salīdzinājumā ar platformā iebūvētu pozicionēšanas risinājumu. Platformas pozicionēšanai ražotājs primāri ir paredzējis izmantot GNSS uztvērēju, taču iekšējās šīs risinājums nestrādā, kā paskaidrots iepriekšējās nodaļās. Kā alternatīva ir pieejamas riteņu piedziņas motoru enkoderu vērtības un kompasa sensora rādījumi. Bakalaura darba autors platformu papildus aprīko ar RTU izstrādātiem optiskās plūsmas sensoriem un to nolasīšanas risinājumu. Darba autora pienesums praktiskajā daļā ir industriāli ražotas robotizētas platformas “Jaguar V4” aprīkošana ar papildu sensoriem, robota vadīšanas risinājums ar radio vadāmo modeļu pulti un arhitektūra datu nolasīšanai, uzkrāšanai un vairāku pozicionēšanas risinājumu salīdzināšanai. Ir veikts eksperiments, kurā ir salīdzināta optiskās plūsmas sensoru veikspēja pret riteņu odometriju kāpurķēžu robota pozicionēšanā iekšējās uz dažādiem grīdas segumiem.

3.1. Dr Robot “Jaguar V4” robotizēta platforma

“Jaguar V4” ir mobila robotizēta platforma (turpmāk tekstā platforma), paredzēta lietot gan iekšējās, gan ārējās apstākļos, kas spēj pārvietoties sarežģītā un nevienmērīgā apvidū. Platformai ir 2 kāpurķēdes un 4 pa pāriem kustināmas “rokas”. Platformas vispārējo uzbūvi var apskatīt 3.1. attēlā. Platforma tiek vadīta caur 802.11n bezvadu savienojumu, no vadības datora nosūtot komandas teksta veidā, izmantojot TCP/IP protokolu. Ir iespējama autonoma navigācija ārpus telpām, izmantojot GNSS un IMU sensorus. Platformas svars ir 30 kg, un tā ir laikapstākļu droša. Platforma var braukt pa kāpnēm un pārvarēt līdz 30 cm augstu šķērslī. Platformā ir iebūvēts kameras modulis, kas var nodrošināt audio un video straumēšanu.

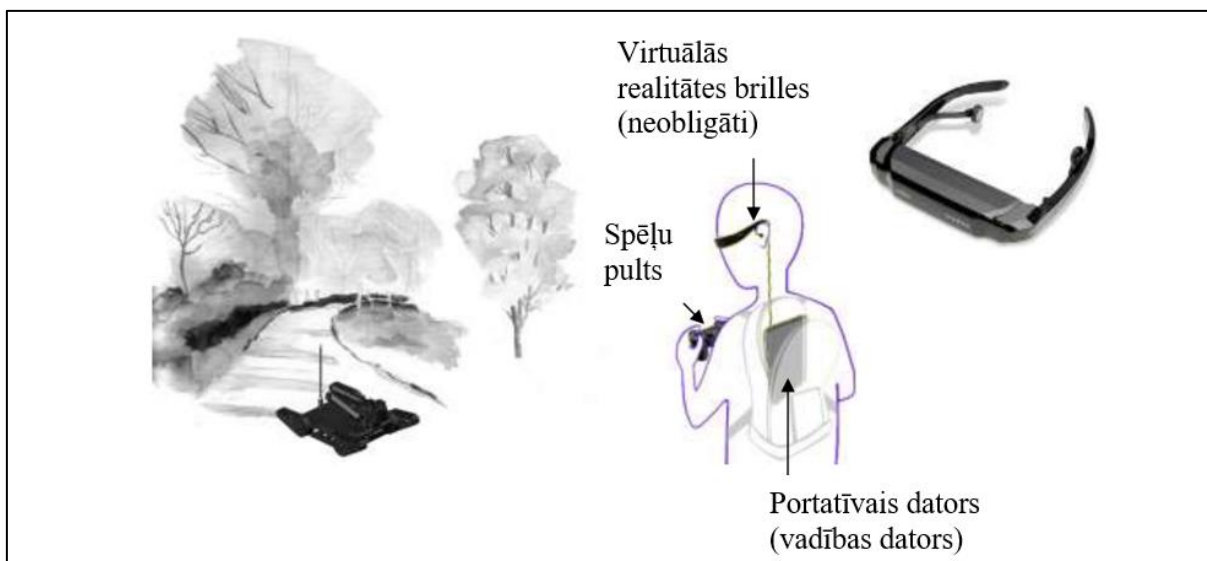
Platformas ārējie izmēri ir: garums – 98cm, platums – 70cm, augstums – 17,6cm. Maksimālā kravnesība uz līdzenas virsmas ir 15kg, un vilkšanas spēja ir 50kg. Maksimālais ātrums 1,5m/s. Platformai ir 6 motori (4 piedziņai, 2 “roku” kustināšanai), kas darbojas ar 24V spriegumu. Robotam ir divi litija polimēru akumulatori ar 22,2V darba spriegumu un 10Ah ietilpību. (DrRobot, 2018)



3.1. att. “Jaguar V4” robotizētā platforma

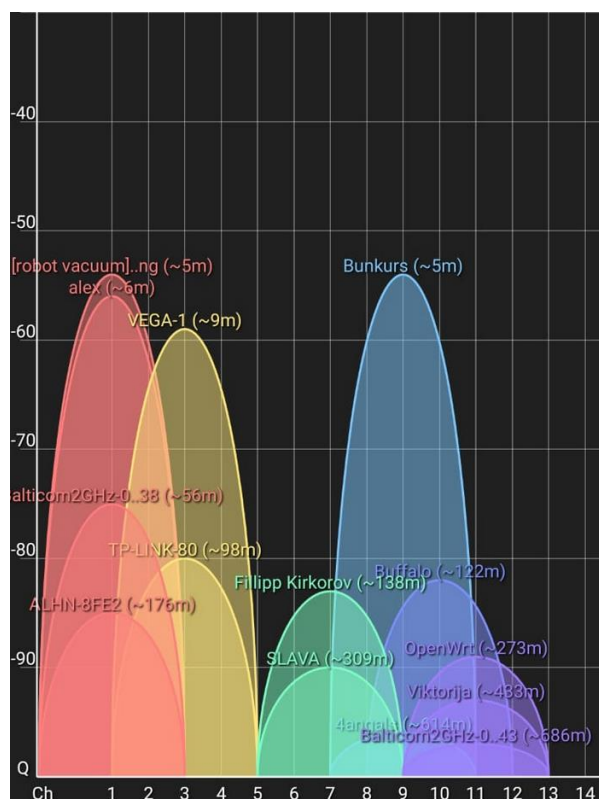
Šai robotizētajai platformai ir pieejamas GNSS, 3 asu akselerometra un piedziņas motoru enkoderu mērījumu vērtības, kā arī robota kontroliera aprēķināta pagrieziena vērtība. Tā, kā eksperimentu ir plānots veikt iekštelpās, kur GNSS signāls ir vājš, un iegūtie dati ir neprecīzi, GNSS sensora mērījumi netiks ņemti vērā pārvietojuma aprēķinos. Viens no priekšnosacījumiem “Jaguar V4” robotizētās platformas izmantošanai bija tas, ka nedrīkst iekļauties tās sākotnējā konstrukcijā. Visi nepieciešamie papildinājumi ir jānostiprina, neizmainot vai nesabojājot robota oriģinālo konstrukciju. Lai izpildītu šo nosacījumu, tika uzmodelēta un izfrēzēta finiera plāksne 25mm biezumā. Uz šīs plāksnes pēc tam ir iespējams pēc vajadzības pieskrūvēt visu nepieciešamo aprīkojumu. Plāksni izgatavoja VNPC darbinieks Artūrs Ardavs. Pie platformas ar divpusējo līmlenti ir pielīmētas skrūves, savukārt uz šīm skrūvēm ar uzgriežņiem ir pieskrūvēta plāksne, lai varētu ērti visu noņemt nepieciešamības gadījumā. 3.4. attēlā redzama plāksnes forma ar nošķeltu augšdaļu, lai atstātu vietu platformas GPS uztvērējam, un izgriezumam vidū akumulatora nomaīnai.

Ražotāja noteiktais platformas vadības modelis sastāv no datora un bezvadu spēļu pults (skatīt 3.2. attēlu). Pults ir savienota ar datoru, kas operatora ievadi pārvērš teksta komandās un nosūta robotam. Savienojumam ar robotu tiek izmantots 2.4 GHz Wi-Fi bezvadu savienojums vai Ethernet kabelis. Autoram pieejamā robota komplektācijā nav iekļauta Ethernet pieslēgvietā, tāpēc savienojumam ir jāizmanto bezvadu Wi-Fi savienojums.



3.2. att. Platformas ražotāja paredzētā darbības shēma, attēls aizgūts no (DrRobot, 2018)

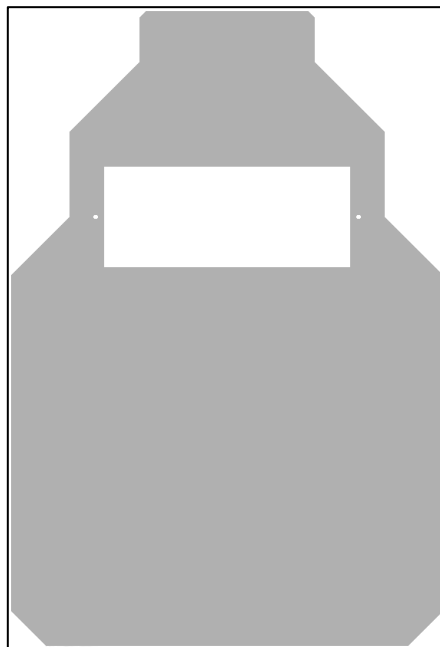
Bezvadu tīkli ar 2.4 GHz frekvenci ir plaši izplatīti un pilsētvidē ļoti noslogoti. Gadījumos, kad tīkla Wi-Fi maršrutētājs darbojas automātiskā kanālu pārslēgšanās režīmā, un kāds no kanāliem ir pārslogots (skatīt 3.3. attēlu), maršrutētājs pārslēdzas uz citu kanālu. Tas atstāj ietekmi uz aktīvā savienojuma stabilitāti un ātrdarbību.



3.3. att. 2.4GHz Wi-Fi noslodze praktiskās daļas veikšanas telpās

Testējot platformu, vairākas reizes tika novēroti traucējumi savienojumā starp vadības datoru un robotizēto kāpurķēžu platformu, izraisot bīstamas situācijas, kurās robots nekontrolēti turpināja kustību (attālums virs 4m vai bez tiešas redzes līnijas). Tā, kā robota svars ir 30kg un maksimālais braukšanas ātrums ir līdz pat 1,5m/s, bakalaura darba autors nolēma lietot citu risinājumu. Lai samazinātu iespēju, ka pazūd savienojums starp vadības datoru un platformu un paaugstinātu eksperimenta norises drošību, tika nolemts, ka platformas vadības dators un sensoru datu apstrādes modulis tiks uzstādīts uz pašas platformas, kurai tiek pievienoti optiskās plūsmas sensori.

Eksperimentālās platformas implementācijā ir lietots “Raspberry Pi 3B” miniatūrs dators, radio vadāmo modeļu “Taranis 9XD” programmējama tālvadības pults ar “X8R” uztvērēju un telemetrijas iespēju, finiera plāksne, Arduino kontrolieris.



3.4. att. Fieniera plāksnes forma aprīkojuma stiprināšanai uz robota

Ar radio vadāmo modeļu pultīm tipiski ir paredzēts vadīt lidmodeļus, auto modeļus, laivu modeļus, bezpilota lidaparātus u.c. Tās izmanto komplektā ar uztvērējiem, kas piedāvā standartizētas impulsa platuma modulācijas (turpmāk tekstā IPM) (angļu val. *PWM-pulse width modulation*) izejas, kuras iespējams savienot ar servo motoriem vai motoru ātruma regulatoriem (angļu val. *ESC-electronic speed controller*), kā arī specifiskas virknes komunikācijas pieslēgvietas, ar kurām var pievienot attiecīgā ražotāja papildaprīkojumu, piemēram, telemetrijas funkcionalitātes paplašinājumu. Šajā gadījumā bija nepieciešams no tālvadības

pults “X8R” uztvērējā saņemtās vērtības nolasīt vadības datorā “Raspberry Pi 3B”, kam neeksistē standartizēts risinājums.

Meklējot risinājumu “Raspberry Pi” ražotāja uzturētajā atbalsta forumā, tika pieņemts lēmums nolasīt uztvērēja izvadītos IPM signālus, nevis izmantot virknes komunikācijas pieslēgvietu. Šāds risinājums tika izvēlēts, jo virknes komunikācijas pieslēgvietas “X8R” uztvērējā izmanto specifisku komunikāciju standartu, kura atkodēšanas risinājums būtu laikietilpīgs un ārpus šī darba risināmajām problēmām.

“Raspberry Pi 3B” ir pieejamas GPIO (angļu val. *General purpose input output*) pieslēgvietas, kurām varētu pieslēgt uztvērēja IPM signālus, tomēr tas ir dators un nestrādā reālajā laikā, tādējādi nespēj uzticami un precīzi nolasīt saņemtos signālus. Bakalaura darba autors “Raspberry Pi” interneta forumā atrada risinājumu (*Reading PWM from RC receiver*, 2017), kur ir piedāvāts IPM signālu nolasīt ar mikrokontrolieri, un pēc tam, izmantojot virknes komunikāciju, datus nosūtīt uz “Raspberry Pi”.

Tika izmantota “Arduino Uno” izstrādes plate, jo autoram tā bija uzreiz pieejama, kā arī tās izmēra un uzbūves dēļ, to ir ērti nostiprināt. Ar “Arduino Uno” palīdzību IPM signāls tiek konvertēts uz UART protokolu, un caur pieslēgto USB kabeli informācija jau ciparu formātā tiek padota datoram “Raspberry Pi 3B”. Lai nolasītu Arduino digitālajam izvada padoto IPM signālu, tiek izmantota Arduino platformas iebūvēta funkcija *pulsein()*, kas ērti nosaka ieejas frekvenci. Šai funkcijai var norādīt laika posmu mikrosekundēs, kurā, nenotiekot signāla svārstībām, nolasītā vērtība tiek pielīdzināta nullei. To var pielietot, implementējot drošību signāla pazušanas gadījumā. Funkcijas nolasītās vērtības, izmantojot X8R uztvērēju, ir skaitļi robežās no 500 līdz 1500, kas atbilst slēdžu un vadības sviru stāvoklim uz pults.

3.1. tabula

Vadības IPM signālu atšifrējums

Kanāls / Vērtība	500-900	900-1100	1100-1500
1-ātrums un virziens	Maksimāli atpakaļ	Stāvēt	Maksimāli uz priekšu
2-pagrieziena leņķis	Maksimāli pa kreisi	Taisni	Maksimāli pa labi
3-roku vadība vai braukt	Kustināt aizmugurējās rokas	Braukt	Kustināt priekšējās rokas
4-maksimālais ātrums	Lēns (30%)	Vidējs (70%)	Ātrs (100%)

Tālāk šos skaitļus saņem “Raspberry Pi 3B”, kas tos pārvērš attiecīgās teksta komandās “Jaguar V4” vadībai. Dati tiek sūtīti teksta veidā sākot ar “#”, atdalot katru kanālu

ar domuzīmi un noslēdzot ar ”@”. Nav iemesla lietot tieši šos simbolus, galvenais, lai tie ir dažādi. Šie simboli ir vajadzīgi, lai, saņemot datus, varētu saprast, kad sākas un kad beidzas datu kopa.

```

1 unsigned long channel1, channel2, channel3, channel4;
2
3 void setup() {
4   pinMode(3, INPUT);
5   digitalWrite(3, HIGH);
6   pinMode(4, INPUT);
7   digitalWrite(4, HIGH);
8   pinMode(5, INPUT);
9   digitalWrite(5, HIGH);
10  pinMode(6, INPUT);
11  digitalWrite(6, HIGH);
12  Serial.begin(9600);}
13
14 void loop() {
15   channel1 = pulseIn(3, HIGH, 50000);
16   channel2 = pulseIn(4, HIGH, 50000);
17   channel3 = pulseIn(5, HIGH, 50000);
18   channel4 = pulseIn(6, HIGH, 50000);
19   Serial.print("#");
20   Serial.print(channel1);
21   Serial.print("-");
22   Serial.print(channel2);
23   Serial.print("-");
24   Serial.print(channel3);
25   Serial.print("-");
26   Serial.print(channel4);
27   Serial.println("@");}

```

3.5. att. Arduino kods, kas nolasa IPM signālus un nosūta tos uz “Raspberry Pi 3B”

“Jaguar V4” tiek vadīts ar specifiskām teksta komandām, piemēram, “MMW !M -200 200” liek platformai braukt taisni ar relatīvu ātrumu 200 no maksimālā 1000. Komandas pirmie simboli veido robota vadības bloka identifikatoru, kuram tiek sūtīta komanda. Attiecīgi “MM2” apzīmē motoru vadības bloku, kas maina robota roku pagrieziena leņķi, bet “MMW” ir apzīmējums abiem piedziņas motoru blokiem (MM0 un MM1), tādējādi atļaujot vadīt abus motoru kontrolierus, nosūtot 1 vadības komandu. 3.3. tabulā apkopotas izmantotās “Jaguar V4” vadības komandas.

3.2. tabula

Izmantotās “Jaguar V4” vadības komandas

Komanda	Darbība	Mainīgie
MM2 !EX	Ieslēgt avārijas bremzes robota rokām.	-
MM2 !MG	Izslēgt avārijas bremzes robota rokām.	-
MM2 !PR x y	Pagriezt robota rokas par enkoderu vienībām.	x = 1 – priekšējās rokas; 2 – aizmugurējās rokas.

Komanda	Darbība	Mainīgie
		y = enkodera vienību skaits.
MMW !EX	Ieslēgt avārijas bremzes piedziņas motoriem.	-
MMW !MG	Izslēgt avārijas bremzes piedziņas motoriem.	-
MMW + !M -x y	Braukt ar relatīvu jaudu, izmantojot atvērtās cilpas metodi.	x = kreisā motora relatīvā jauda (-1000 – 1000). y = labā motora relatīvā jauda (-1000 – 1000).
PING	Tiek sūtīts vismaz 3 reizes sekundē, lai nodrošinātu avārijas apstāšanos savienojuma zaudēšanas brīdī.	-
MM0 ?C	Tiek pieprasīta kāpurķēžu enkoderu informācija, kas konkrētajam “Jaguar V4” modelim atrodas motoru blokā MM0.	-
MM0 !C x y	Tiek iestatīta enkoderu vērtība.	x = enkoderu skaitītāja numurs (1 – kreisā kāpurķēde; 2 – labā kāpurķēde). y = jaunā enkodera skaitītāja vērtība.

Lai atvieglotu programmēšanu un ietaupītu laiku tiek izmantota C++ bibliotēka “async-sockets-cpp”, kas nodrošina gan datu pakešu nosūtīšanu, gan asinhronu to saņemšanu, kas ir ļoti noderīgi, lai netērētu procesora laiku nepārtraukti pārbaudot, vai ienāk jauni dati. Platforma “Jaguar V4” uz vadības datoru sūta telemetriju. Katra datu pakete sākas ar simboliem, kas nosaka, kas tiek sūtīts (skatīt 3.3. tabulu).

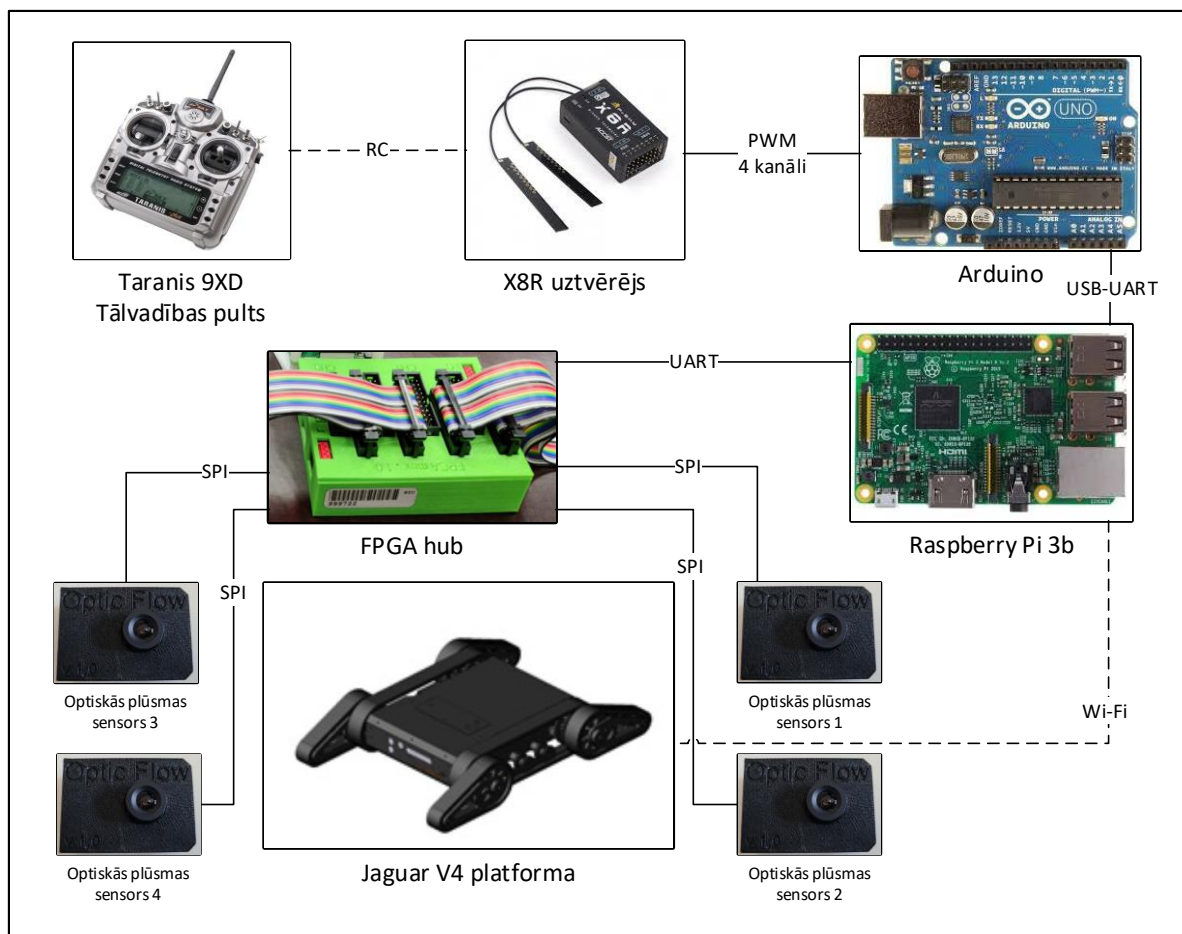
3.3. tabula

Datu pakešu iedalījums pēc pirmajiem simboliem

Pirmie simboli	Kas tiek sūtīts	Biežums
\$GPRMC	GPS moduļa dati	5Hz
MM0; MM1; MM2; MM3	Motoru dziņu dati	5Hz
#	IMU dati	50Hz

Tā, kā sākotnējā testēšanas fāzē tika novērotas potenciāli bīstamas situācijas gadījumos, kad robots paliek bez vadības signāla, tika pastiprināti testētas un programmatūrā novērstas iespējas tam notikt. “Jaguar V4” ir iebūvēta drošība gadījumā, ja pārtrūkst Wi-Fi savienojums starp vadības datoru un galveno platformas kontrolieri. Tas panākts šādi: nepārtraukti ar frekvenci, kas pārsniedz vismaz 4Hz platformai, tiek sūtīta “PING” komanda, kad šī komanda vairs netiek saņemta, kontrolieris automātiski ieslēdz avārijas bremzes. Tas nodrošina robota pilnīgu apstāšanos, sekundes laikā kopš signāla pazušanas brīža. “Taranis 9XD” tālvadības pultij arī ir iespējams ieprogrammēt rīcību signāla pazušanas gadījumā. Uztvērējam iespējams

iesaldēt pēdējās saņemtās vērtības, izvadīt iepriekš izvēlētas vērtības vai neizvadīt neko (izvadīt 0). Autors eksperimentāli noskaidroja, ka šī uztvērēja funkcija aizņem aptuveni 1 sekundi bez saņemta signāla, lai nostrādātu. Tika pieņemts lēmums izmantot izvadīt 0 variantu, jo tādējādi tiktu nodrošināta aizsardzība arī gadījumā, ja pazustu savienojums starp uztvērēju un Arduino prototipēšanas plati. Gadījumā, ja pazustu savienojums vienā vai vairākos kanālos, tad nolasītā vērtība būtu 0, un varētu attiecīgi rīkoties “Raspberry Pi 3B” programmas kodā, nosūtot robotam komandu apstāties. Kad tika testēts, vai drošība strādā, atklājās, ka noraujot vadu, tika nolasītas gadījuma vērtības, kas nav vienādas ar 0. Tas notika tādēļ, ka mikrokontroliera izejas izvadām nebija iestatīta atsaistes pretestība, pārvēršot šo izvadu par antenu. Programmiski iestatot atsaistes rezistoru ar funkciju *digitalWrite()*, problēma tika atrisināta. Vēl no drošības viedokļa jāapskata savienojums starp Arduino izstrādes plati un “Raspberry Pi 3B”. Šim savienojumam ir izmantots USB-UART savienojums. To, vai šis savienojums ir pazudis, ir iespējams noskaidrot ar WiringSerial C++ bibliotēkas funkciju *serialDataAvail()*, ja šī funkcija izvada -1, tad savienojums ir pārtrūcis un var attiecīgi rīkoties, apturot visu motoru darbību un paziņojot par kļūdu.



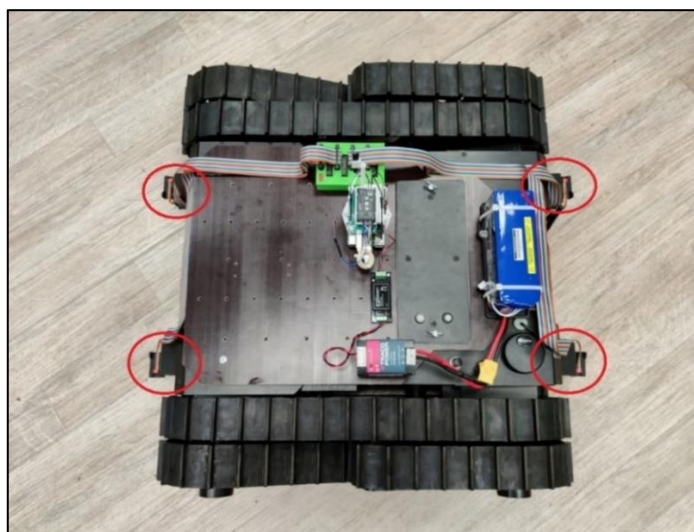
3.6. att. Bakalaura darba praktiskās daļas arhitektūrā izmantotie savienojumu veidi

3.2. Sensoru kalibrēšana un kinemātiskie modeļi

Izmantojot kāpurķēžu robota kinemātisko modeli (Kurc & Szybicki, 2011) iespējams izrēķināt robota pārvietojumu, tomēr, kā aprakstīts darbā (Kurc & Szybicki, 2011), precīzs kāpurķēžu robota kinemātiskais modelis ir samērā sarežģīts ar daudz mainīgajiem, kur nepieciešams nomērīt tādas rādītājus, kā kāpurķēdēs izmantotās gumijas berzes koeficientu un motoru paātrinājumus, u.c.. Šāda kāpurķēžu robota kinemātiskā modeļa implementēšana un kalibrēšana būtu ārpus šī bakalaura darba tvēruma, tāpēc tā vietā ir izmantots vienkāršāks “differential drive” kinemātiskais modelis (Olson, 2004), pieņemot, ka katra no kāpurķēdēm efektīvi ir ritenis, kas novietots pa vidu katram no robota sāniem.

Lai riteņu enkoderu nolasīto vērtību pārvērstu pārvietojumā, ir nepieciešams eksperimentāli noteikt, kāds robota pārvietojums atbilst konkrētam iedaļu skaitam (Mandow et al., 2007). Robots jāpastumj par konkrētu attāluma vienību, nodrošinot pilnu saķeri ar virsmu. Pēc tam pārvietojuma vienība jāizdala ar enkoderu rādījumu katrai no kāpurķēdēm. Ir iegūts koeficients, ar ko sareizinot enkoderu nolasītās vērtības, var tikt aprēķināta reālā pārvietojuma vērtība (skatīt 3.4. tabulu).

Optiskās plūsmas sensori ir izvietoti pēc iespējas izkliedētāk uz robota, bet iekļaujoties robota gabarītos, lai palielinātu iespēju, ka vismaz viens no sensoriem katrā pusē atradīsies uz kvalitatīvas virsmas labā apgaismojumā. Ja apgaismojums nav pietiekams, katram no sensoriem ir pieejama papildu infrasarkanā mirdzdiode virsmas izgaismošanai. Faktiskais sensoru izvietojums uz robota redzams 3.7. attēlā. Lai izrēķinātu pārvietojumu, optiskās plūsmas sensoriem tiks pielietots līdzīgs kinemātiskais modelis, kā riteņu enkoderiem, sadalot to rādījumus pa pusēm, imitējot sānos novietotus riteņus.



3.7. att. Optiskās plūsmas sensoru izvietojums uz robota

Lai nodrošinātu optiskās plūsmas sensoru precīzu darbību, tie ir jānokalibrē mērījumiem konkrētā augstumā virs zemes un apgaismojuma intensitātē. Šiem sensoriem, līdzīgi kā riteņu enkoderiem, ir jānosaka reālā pārvietojuma attiecība pret sensora nolasīto pārvietojuma vienību. Lai to izdarītu, ir:

- 1) Jānofokusē sensora lēca, pēc iespējas asākam attēlam, uzmontētajā attālumā no virsmas. To var izdarīt, savienojot sensoru ar datoru, izmantojot sensoru autora izstrādātu ierīci un programmatūru, kas spēj nolasīt attēlu no sensora un izvadīt datora ekrānā. Piemērs logam, ko izveda šī programma redzams 3.8. attēlā.
- 2) Jānoregulē infrasarkanās gaismas diodes spilgtums, lai attēla kvalitāte būtu augstākā iespējamā, izmantojot iepriekš minēto ierīci un programmatūru.
- 3) Jāpārvieto sensors pa konkrēta pārvietojuma vienību, piemēram, 10cm un jāiegūst rādījumi.
- 4) No iegūtajiem datiem var izrēķināt koeficientu, izdalot reālo pārvietojumu ar sensora nolasītajām vienībām (skatīt 3.4. tabulu).



3.8. att. Ekrāna uzņēmums no programmas, kas nolasa attēlu no sensora

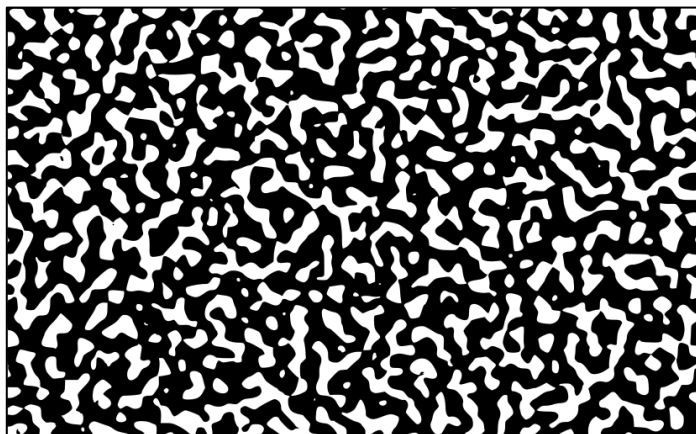
3.4. tabula

Sensoru kalibrācijas vērtības

Sensors	Pārvietojums	Nolasītā vērtība	Iegūtais koeficients
Kreisais riteņu enkoders	38cmm	305	1,25mm / iedaļa
Labais riteņu enkoders	38cm	305	1,25mm / iedaļa
Optiskās plūsmas sensors 1	5cm	183	0,27mm / iedaļa
Optiskās plūsmas sensors 2	5cm	179	0,28mm / iedaļa
Optiskās plūsmas sensors 3	5cm	178	0,28mm / iedaļa
Optiskās plūsmas sensors 4	5cm	185	0,27mm / iedaļa

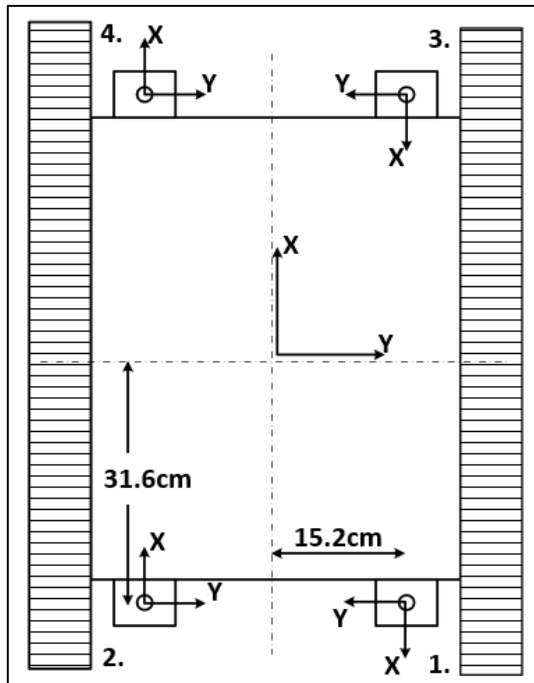
Pielietotie optiskās plūsmas sensori nodrošina attēla kvalitātes rādījumus, katram lasījumam, tādējādi var pieņemt lēmumu neņemt vērā rādījumus, ja to kvalitāte ir zem kādas sliekšņa vērtības. Piemēram, kalibrēšanas laikā tika izmantota trokšņa ilustrācija (skatīt 3.9. attēlu), lai pārlicinātos, ka sensors atradīs lielu skaitu ar unikālām iezīmēm. 3.8. attēlā redzams, ka virsmas kvalitāte kalibrēšanas procesā ir 140 no 169 iespējamā, tāpēc var apgalvot, ka virsmas kvalitāte kalibrējot ir bijusi laba.

Kad visi sensori ir nokalibrēti un ir notestēta “Raspberry Pi” spēja reizē nolasīt sensoru datus un saglabāt tos teksta dokumentā ar laika atskaiti (.CSV fails), var veikt eksperimentu. Eksperimentā robotu ar pulti aptuveni vada pa iepriekš noteiktu trajektoriju, precīzi nomērot trajektorijas sākuma un beigu punktus. Tā, kā netika rasts veids, kā precīzi elektroniski nomērīt robota pārvietojumu, pret ko salīdzināt abus testētos pozicionēšanas risinājumus, faktiskais robota pārvietojums tiks mērīts manuāli, izmantojot mērlenti un atzīmes uz grīdas pret robota centru.



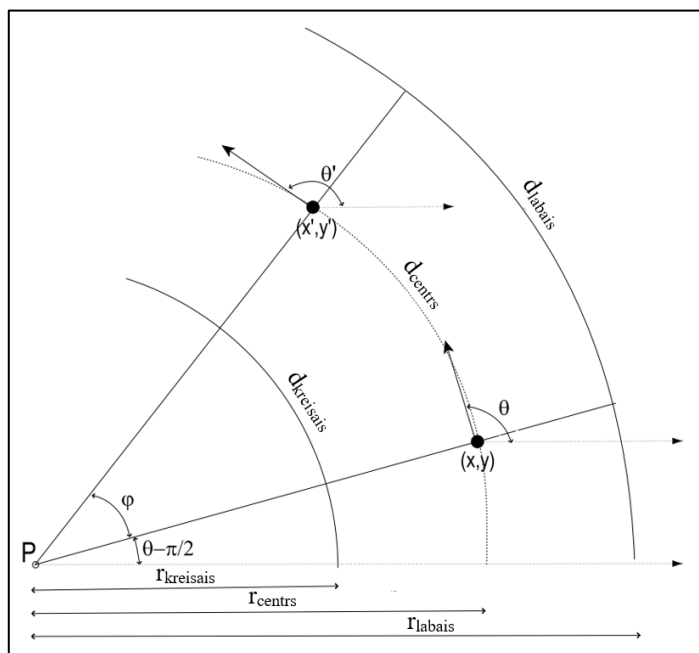
3.9. att. Trokšņa ilustrācija, kas tika lietota optiskās plūsmas sensoru kalibrēšanai, attēls aizgūts no (Physics&ComputingBlog, 2017)

Ir plānots veikt 2 trajektoriju eksperimentus – taisnā līnijā un slēgtā taisnstūrveida trajektorijā. Sensoru vērtības tiks nolasītas un saglabātas CSV failos, bez papildu aprēķiniem uz robota. Iegūtie lasījumi pēc tam tiks apstrādāti datorā, aprēķinot aktuālo x un y pārvietojuma koordināti katram sensoru lasījumam. Pēc tam šīs vērtības varēs salīdzināt ar patiesajiem nomērītajiem pārvietojumiem un uzzīmēt XY izkliedes diagrammu, lai vizuāli salīdzinātu iegūtās trajektorijas un novērtētu radušās kļūdas. 3.10. attēlā redzams optiskās plūsmas sensoru izvietojums uz robota ar relatīvajām sensoru virzienu asīm. Attiecīgi 1. un 3. sensora rādījumi ir jāsareizina ar koeficientu -1, lai visu sensoru lasījumi būtu ar vienādu asu virzienu. “Jaguar V4” platformas specifikas dēļ arī kreisās puses riteņu enkodera vērtības ir jāsareizina ar -1.



3.10. att. Optiskās plūsmas sensoru izvietojums uz robota un to relatīvās virzienu asis

Platformas pārvietojuma aprēķinos ir izmantots (Olson, 2004) aprakstītais kinemātiskais modelis. Šajā kinemātiskajā modelī ir pieņemts, ka robots starp katriem diviem sensoru mērījumiem izbrauc arku (skatīt 3.11. attēlu). Ja ir zināms robota kreisās un labās puses pārvietojums, kā arī attālums starp šīm pusēm, ir iespējams izrēķināt jaunās x un y koordinātes, kā arī pagriezienu leņķi pēc šī pārvietojuma.



3.11. att. kinemātiskā modeļa arkas ilustrācija (Olson, 2004)

- 1) Tā, kā robota pozīcija ir mērīta tā centrā, ir jāizrēķina relatīvais centra pārvietojums. To iegūst, izrēķinot vidējo aritmētisko vērtību no abiem sānu pārvietojumiem (formula 3.1).

$$d_{centrs} = \frac{d_{kreisais} + d_{labais}}{2} \quad (3.1)$$

- 2) Lai aprēķinātu robota pagriezenia leņķa izmaiņu pēc pārvietojuma, jāizmanto formula 3.2:

$$\phi = \frac{d_{labais} - d_{kreisais}}{platums} \quad (3.2)$$

Kur *platums* apzīmē starpību starp kāpurķēžu kontaktvirsmas viduspunktiem = 530mm;

- 3) Jauno robota pozīciju un pagriezenia leņķi var aprēķināt pēc formulām 3.3; 3.4; un 3.5:

$$\theta' = \theta + \phi \quad (3.3)$$

$$x' = x + d_{centrs} * \cos(\theta) \quad (3.4)$$

$$y' = y + d_{centrs} * \sin(\theta) \quad (3.5)$$

Lai šo pašu kinemātisko modeli varētu pielietot robota pārvietojuma aprēķinos ar optiskās plūsmas sensoriem, nepieciešams no to nolasītajām sensoru vērtībām iegūt atbilstošas pārvietojuma vērtības kāpurķēdēm. Tas tiek panākts izrēķinot vidējo aritmētisko x ass pārvietojumu katrai no robota pusēm. Attiecīgi $d_{kreisais}$ = vidējā x vērtība no 2. un 4. sensora, bet d_{labais} = vidējā vērtība no 1. un 3. sensora. Tā, kā optiskās plūsmas sensoru y mērījumu ass attālums no robota rotācijas centra ir lielāks nekā x asij, bakalaura darba autors nolēma lietot nolasītos y ass pārvietojumus robota pagriezenia leņķa aprēķinos. Attiecīgi (3.2) formula tiek pārveidota par (3.6) formulu.

$$\phi = \frac{\frac{(y_{opt4} + y_{opt3})}{2} - \frac{(y_{opt2} + y_{opt1})}{2}}{platums} \quad (3.6)$$

Kur $platums = 2 * 31,6\text{cm} = 63,2\text{cm}$

Pēc eksperimenta veikšanas, veicot pārvietojuma aprēķinus, tika secināts, ka leņķiskā precizitāte iegūtajiem pārvietojumiem ir vāja. Ņemot piemēru no 1.10 apakšnodaļas, par sensoru

komplektu izmantošanu darba autors nolēma pielietot no robotizētās platformas telemetrijas datiem iegūto pagriežiena vērtību. Kā rakstīts platformas ražotāja instrukcijā (DrRobot, 2018), šī pagriežiena vērtība radiānos tiek iegūta, sapludinot inerciālo mērījumu sensora datus ar GPS datiem, izmantojot virzienu kosinusu matricu, tātad šai virziena vērtībai jābūt precīzākai nekā no riteņu enkoderiem vai optiskās plūsmas sensoriem nolasītajai. Darbā (Wang & Rajamani, 2018) ir aprakstīta teorija un algoritms, kā strādā virzienu kosinusu matrica. No platformas saņemto pagriežiena vērtību attiecīgi ievieto pašreizējajā leņķī θ abiem izveidotajiem kinemātiskajiem modeļiem. Rezultātā ir iegūti 4 kinemātiskie modeļi:

- Optiskās plūsmas sensori.
- Optiskās plūsmas sensori izmantojot nolasīto pagriežiena vērtību.
- Riteņu odometrija.
- Riteņu odometrija izmantojot nolasīto pagriežiena vērtību.

4. VIZUĀLĀS UN RITEŅU ODOMETRIJAS METOŽU VEIKTSPĒJAS SALĪDZINĀJUMS

Jebkura pozicionēšanas risinājuma mērķis ir pēc iespējas precīzāk noteikt robota pašreizējo atrašanās vietu telpā, tāpēc viens no galvenajiem mēriem veikspējas salīdzināšanā ir starpība starp nomērīto un faktisko atrašanās vietu robotam. Tā, kā darba autoram nav pieejams aprīkojums precīzai platformas trajektorijas nomērīšanai eksperimenta brauciena laikā, tiks mērīts platformas pārvietojums trajektorijas beigās, izmantojot atzīmes uz virsmas un mērlenti. Šādu mērījumu precizitāte ir +/- 1cm.

4.1. Eksperimentos izmantotie grīdas segumi

Eksperimenti ir veikti uz 3 vizuāli un mehāniski dažādām virsmām:

- 1) Linolejs ar lamināta rakstu. Lai gan vizuāli šim materiālam ir koka dēlīšu raksts, pati virsma faktiski ir gluda un vienmērīgi matēta. Šāds materiāls ir bieži sastopams birojos, skolās un sabiedriskās telpās. Platformas kāpurķēdes pa šo segumu labi slīd. Eksperimenta veikšanas laikā apgaismots ar dienasgaismas spuldzēm.
- 2) Tumši zils filca paklājs. Paklāja virsmai ir vienmērīga faktūra un nav īpašu rakstu, bet uz tā ir sakrājušies putekļi un dažādi gruži. Šāds materiāls ir sastopams izstādēs un pasākumos, kur ar to apsedz sporta zāļu parketa grīdas. Pa šo materiālu platformas kāpurķēdes neizslīd, kā rezultātā pagriezienos tas kratās, ietekmējot sensoru rādījumus. Eksperimenta veikšanas laikā izgaismots ar tiešiem un netiešiem saules stariem.
- 3) Kokskaidu plātne. Materiāls ar vizizteiktāko rakstu un faktūru no trim testētajiem. Šāds materiāls ir sastopams jaunbūvēs, kā arī industriālās telpās. Vairākās vietās uz seguma atrodas svītraina līmlente. Platformas kāpurķēdes pa šo segumu slīd. Eksperimenta veikšanas laikā apgaismots ar tiešiem un netiešiem saules stariem.

Katram no optiskās plūsmas sensoriem iespējams nolasīt ne tikai dx un dy datus, bet arī virsmas kvalitātes datus. Skaitlis, ko apzīmē ar SQUAL (Pcr & Kit, 2012) robežās no 1 līdz 169 apzīmē sensora attēlā redzamo unikālo iezīmju skaitu (Iezīmju skaits = SQUAL*4).

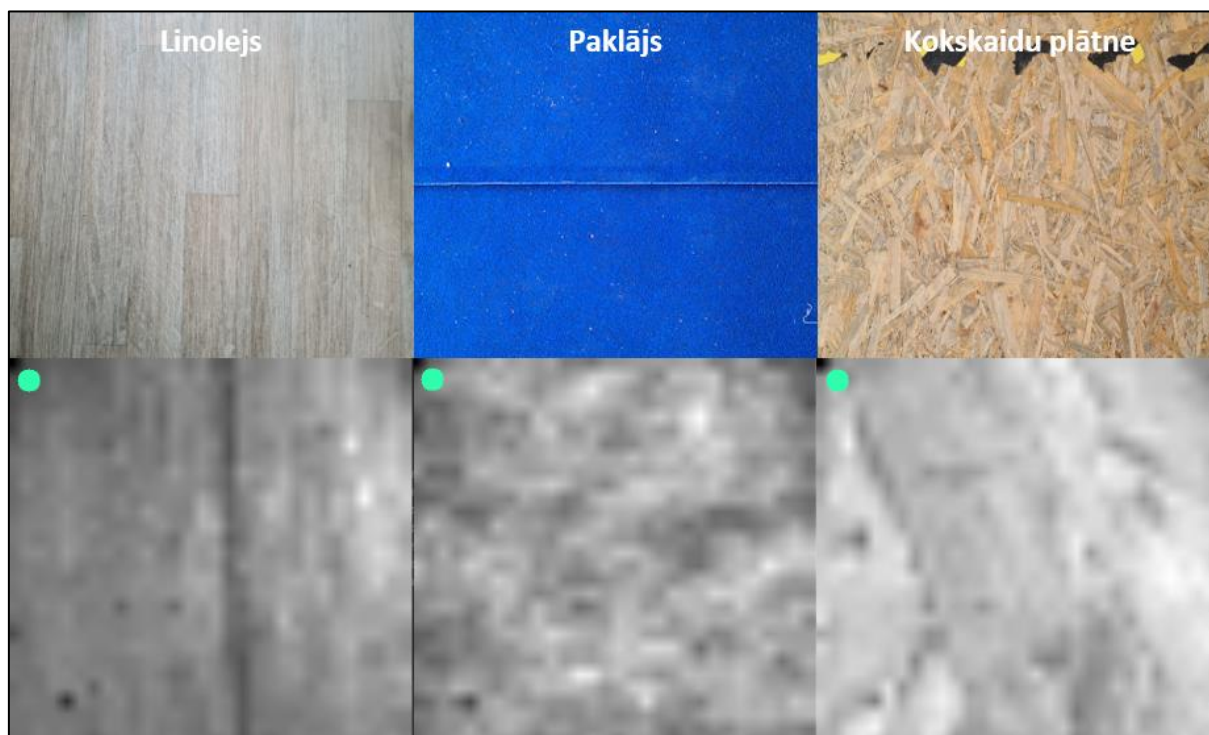
Attiecīgi ir iespējams novērtēt, vai konkrētajā laika momentā uzticēties sensora rādījumiem pozīcijas aprēķināšanā. Testēto materiālu attēlu kvalitātes rādījumi apkopoti tabulā.

tabula

Testēto grīdas segumu attēlu kvalitātes rādījumi

	Vidējais rādījums	Lielākais rādījums	Mazākais rādījums
Linolejs	84	145	3
Kokskaidu plātne	99	139	11
Paklājs	84	134	6

Var secināt, ka vispiemērotākais no testētajiem segumiem optiskās plūsmas sensoriem ir kokskaidu plātne, jo vidējā attēla kvalitāte ir vislielākā. Šādi rezultāti ir robota plūdenās pārvietošanās un izteiktās tekstūras dēļ. 4.1. attēlā redzami eksperimentos testētie grīdas segumi un tas, kā šos materiālus “redz” optiskās plūsmas sensors. Eksperimentos lietoto optiskās plūsmas sensoru izšķirtspēja ir 30x30 pikseļi un tie atrodas 7cm augstumā no virsmas. Tāpēc virsmas daļa, ko šie sensori uztver ir salīdzinoši maza.



4.1. att. Eksperimentos izmantotie grīdas segumi un to attēli optiskās plūsmas sensoros

4.2. Eksperimentu gaita un rezultāti

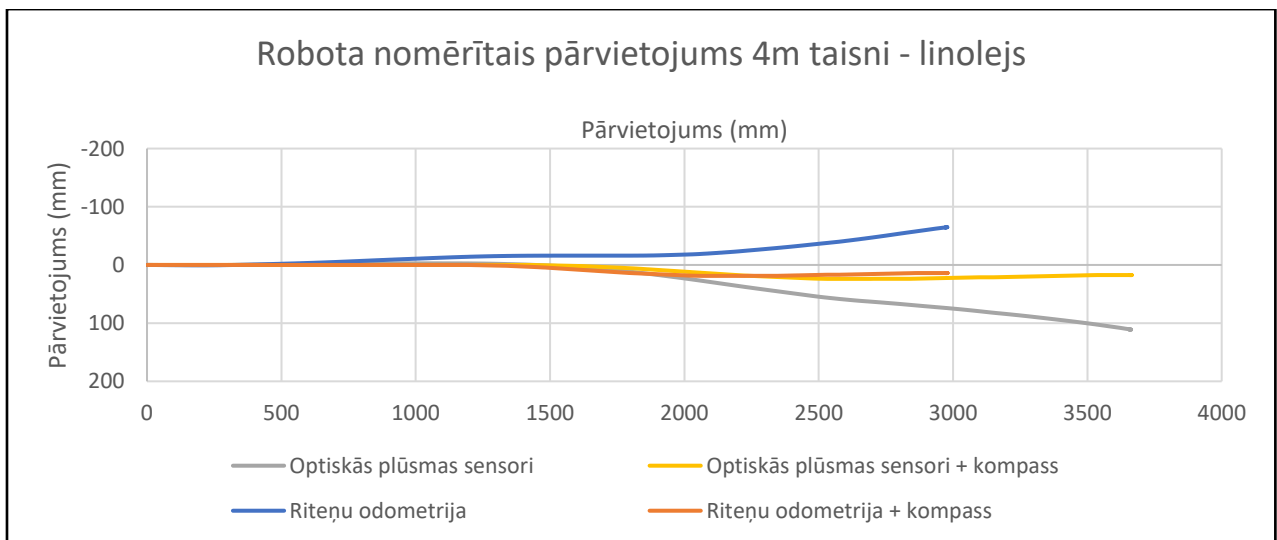
Tā, kā netika atrasts veids, kā nomērīt precīzu robota trajektoriju tā kustības laikā, tika veikti divu nozīmīgāko trajektoriju eksperimenti. Pirmā trajektorija ir taisna līnija 4 metru \pm 1 cm garumā. Robota vidējais ātrums braucienā laikā ap 0,5m/s. Ar šī eksperimenta palīdzību iespējams noteikt, vai sensoru kalibrācija ir bijusi veiksmīga. Attiecīgi cik lielu pārvietojumu un nobīdi no trajektorijas uzrādīs katrs no 4 kinemātiskajiem modeļiem.

Eksperimentu laikā tika lasīti un uzkrāti šādi dati:

- Četru optiskās plūsmas sensoru x un y pārvietojums, virsmas kvalitāte,
- Platformas riteņu enkoderu rādījumi un pagrieziena leņķis,
- Laiks kopš eksperimenta sākuma milisekundēs.

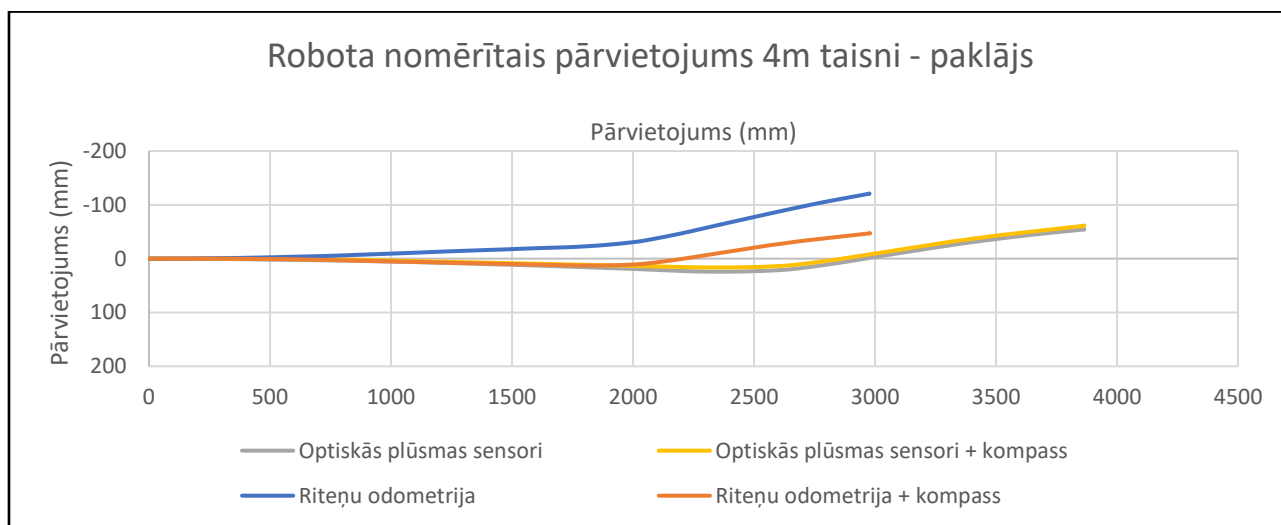
Vidēji riņķu trajektoriju eksperimentos sensori tika nolasīti 2620 reizi, bet taisno līniju trajektoriju eksperimentos 1028 reizes. Intervāls starp lasījumiem 18 milisekundes. Grafikos no platformas nolasītais pagrieziena leņķis pazīmēts kā compass.

Eksperimentā uz linoleja grīdas seguma (skatīt 4.2. attēlu) ir secināts, ka robots ir patiešām braucis taisni, jo, izmantojot telemetrijas pagrieziena leņķi, trajektorijas ir taisnas, un nobīde no x ass ir minimāla. Optiskās plūsmas sensoriem šajā eksperimentā vidējā virsmas kvalitātes vērtība labajā pusē bija 77,5, bet kreisajā pusē 72,7. Minimālā virsmas kvalitāte abām pusēm bija 33. Tātad grīdas seguma kvalitāte nav šīs nobīdes cēlonis. Tomēr, iespējams, ka vienai pusei virsma bija vairāk apgaismota, nekā otrai. Vēl 4.2 attēlā redzams, ka optiskās plūsmas sensori sasniedz apmēram 3550mm distanci, bet riteņu odometrija uzrāda vien 3000mm pārvietojumu. Ir secināts, ka riteņu enkoderu kalibrācija nav bijusi veiksmīga, un tai būtu jāpielieto cita metode.



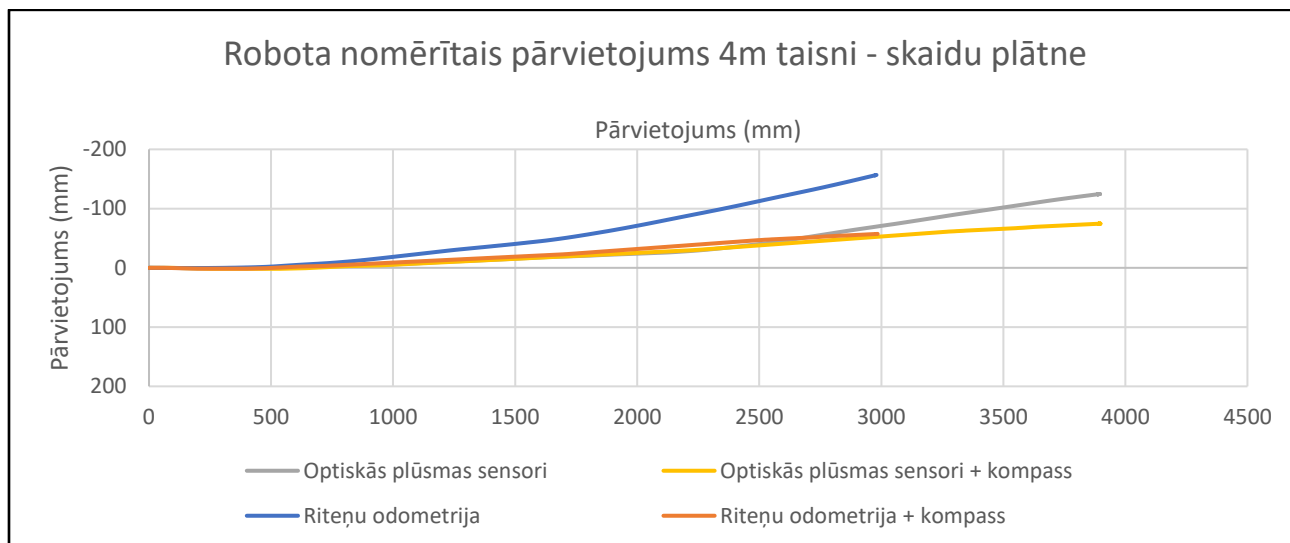
4.2. att. Robota nomērītā pārvietojuma grafiks trajektorijai 4m taisni – linolejs

Eksperimentā uz paklāja seguma (skatīt 4.3. attēlu) ir redzams, ka optiskās plūsmas sensori ar telemetrijas pagrieziena leņķi uzrāda tādu pašu trajektoriju, kā optiskie sensori vieni paši. Tātad gadījumos, kad virsmas kvalitāte un apgaismojums ir nemainīgi, arī ar vienkāršu kinemātisko modeli optiskās plūsmas sensori spēj uzrādīt precīzas pārvietojuma vērtības. Riteņu odometrija arī šajā eksperimentā uzrāda daudz īsāku pārvietojumu nekā patieso, kā arī tiecas uz kreiso pusi.



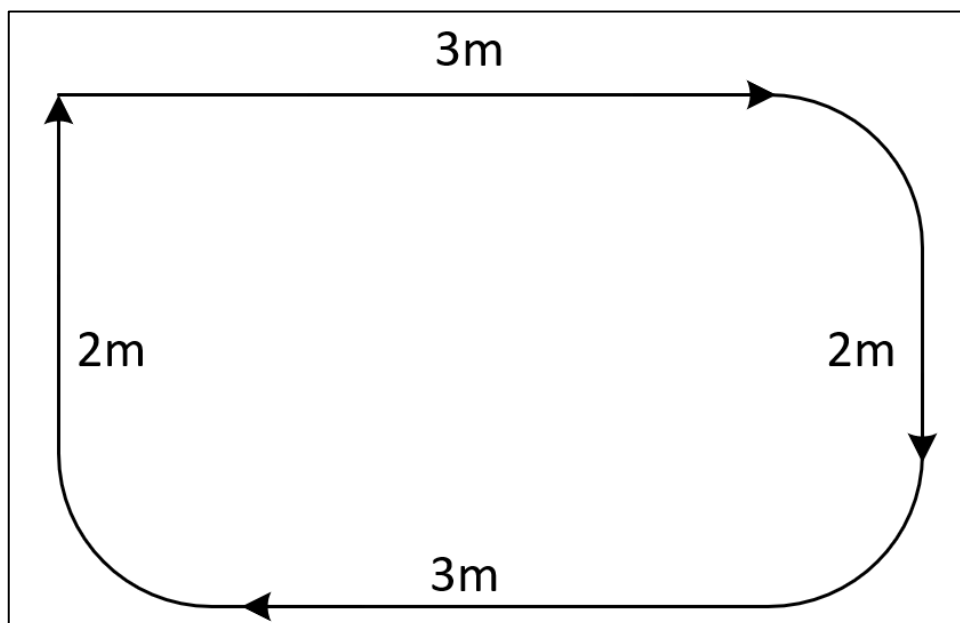
4.3. att. Robota nomērītā pārvietojuma grafiks trajektorijai 4m taisni – paklājs

Trešais brauciens notika uz skaidu plātnes, kas ir slidena, bet ar izteiktu tekstūru. Iegūtajos 4m taisnas trajektorijas mērījumos (skatīt 4.4. attēlu) redzams, ka riteņu odometrija joprojām tiecās uz kreiso pusi. Var izdarīt secinājumus, ka riteņu enkoderu mazās izšķirtspējas dēļ tos nav iespējams nokalibrēt, veicot tik īsu attālumu, kā ar optiskās plūsmas sensoru, tā vietā vajag eksperimentāli noteikt koeficientus katram no enkoderiem, lai to rādījumi atbilstu pārvietojumam un būtu savā starpā vienādi braucot taisni. Optiskās plūsmas sensori bez kompasa brauciena sākumā uzrāda līdzīgu trajektoriju, kā riteņu odometrija ar kompasu un plūsmas sensori ar kompasu, tomēr noslēgumā arī nobīdās uz kreiso pusi. Jāpiemin, ka patiesā trajektorija nevienā no braucieniem nebija pilnīgi taisna, robota uzbūves un vadības veida dēļ.



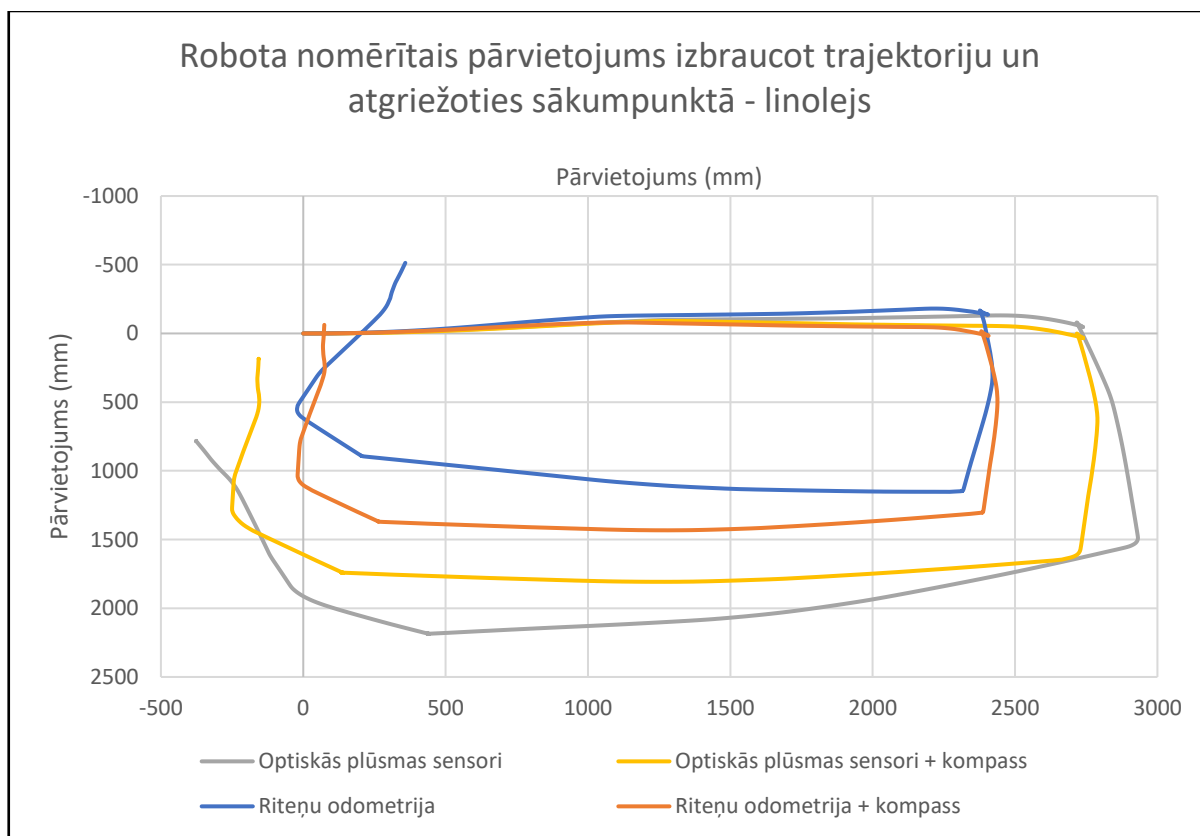
4.4. att. Robota nomērītā pārvietojuma grafiks trajektorijai 4m taisni – skaidu plātne

Otrā eksperimentu trajektorija ir slēgts taisnstūris ar malu garumiem 3x2m un noapaļotiem stūriem (skatīt 4.5. attēlu). Eksperimenti izbraucot trajektoriju un atgriežoties sākumpunktā paredzēti, lai novērtētu kļūdas pārvietojumā, kas rodas robotam pagriežoties, piemēram, riteņu izslīdēšanas rezultātā nobīdās riteņu enkoderu nolasītās vērtības, vai robots sāk vibrēt, traucējot optiskās plūsmas sensoru darbību.



4.5. att. Otrā eksperimenta trajektorija

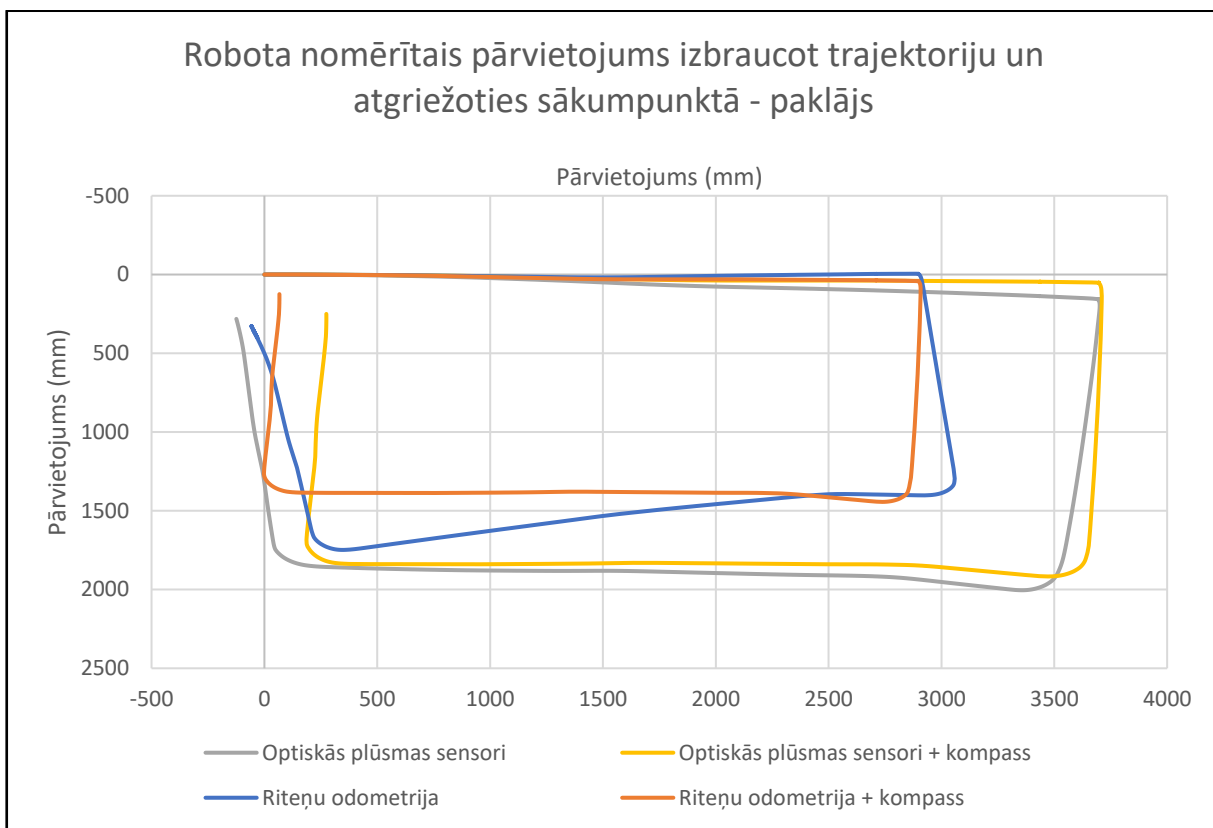
Otrajā eksperimentā uz linoleja grīdas seguma (skatīt 4.6. attēlu) var novērot, ka riteņu odometrija visos pagriezienos ir nomērījusi lielāku pagrieziena leņķi nekā faktiskais, savukārt optiskās plūsmas sensori tieši pretēji – mazāku, kā rezultātā riteņu odometrijas trajektorija brauciena beigās atrodas 625mm attālumā no patiesās pozīcijas, izmantojot robota telemetrijas pagrieziena vērtību, precizitāte palielinās līdz 95mm, bet optiskās plūsmas sensoru odometrija palika 860mm attālumā bez kompasa un 240mm attālumā ar kompasu. Var secināt, ka uz linoleja gan riteņu odometrija, gan optiskās plūsmas sensoru odometrija uzrāda vienlīdz sliktus rezultātus, tomēr, kinemātiskajā modelī pielietojot pagrieziena leņķi, iespējams manāmi uzlabot šo risinājumu precizitāti.



4.6. att. Robota nomērītā pārvietojuma grafiks trajektorijai ar atgriešanos sākumpunktā – linolejs

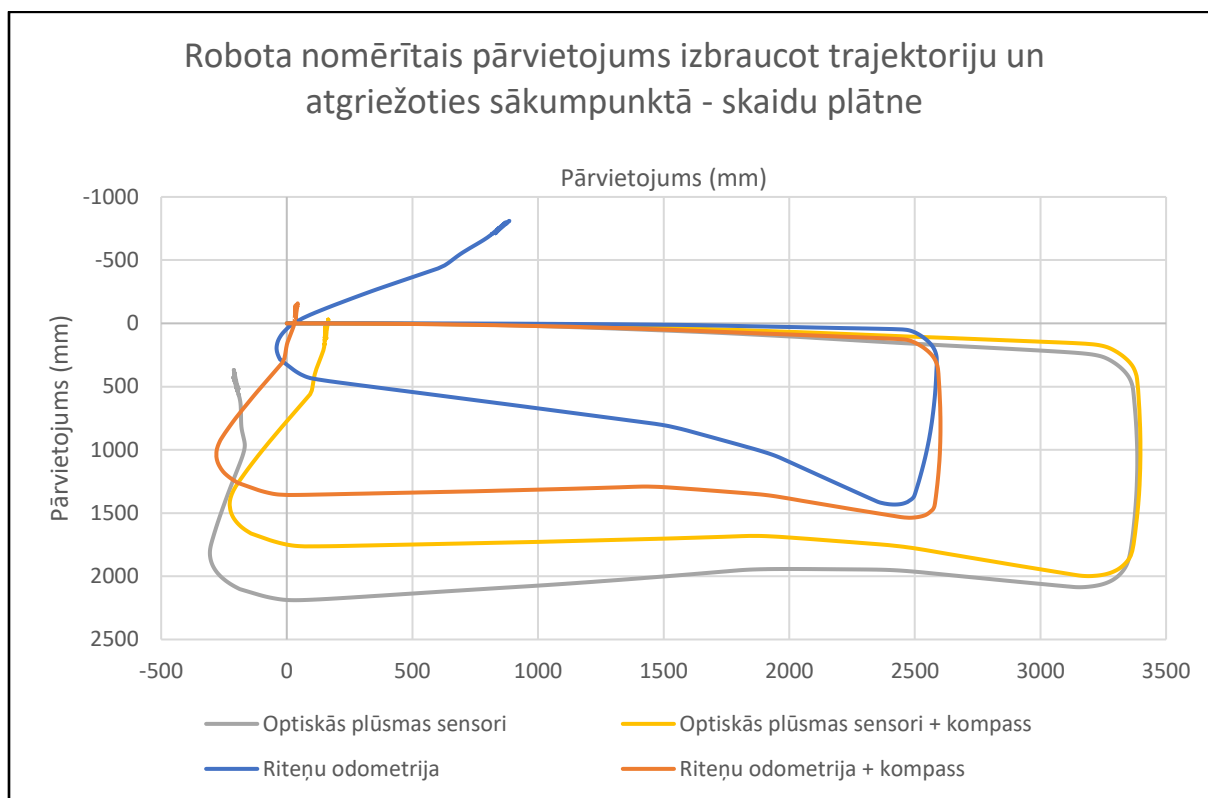
Eksperimentā ar atgriešanos sākumā uz paklāja (skatīt 4.7. attēlu) riteņu odometrija neprecīzi nomērīja pirmo pagriezienu, kā rezultātā viss pārējais pārvietojums nobīdījās un iegūtais gala attālums līdz sākumpunktam ir 350mm. Izmantojot robota telemetrijas pagrieziena leņķi, riteņa odometrija sasniedz ievērojami labāku precizitāti – 90mm. Uz šī seguma un trajektorijas optiskās plūsmas sensoru odometrija sasniedz 180mm precizitāti. Savukārt optiskās plūsmas sensori ar kompasu sasniedz tikai 260mm precizitāti. Optiskās

plūsmas sensoru precizitātes kritumu salīdzinājumā ar 4m taisni uz paklāja eksperimentu var skaidrot ar faktu, ka kāpurķēžu neizslīdēšanas dēļ robotizētā platforma pagriezienos spēcīgi kratījās, potenciāli traucējot optiskās plūsmas sensoru darbību.



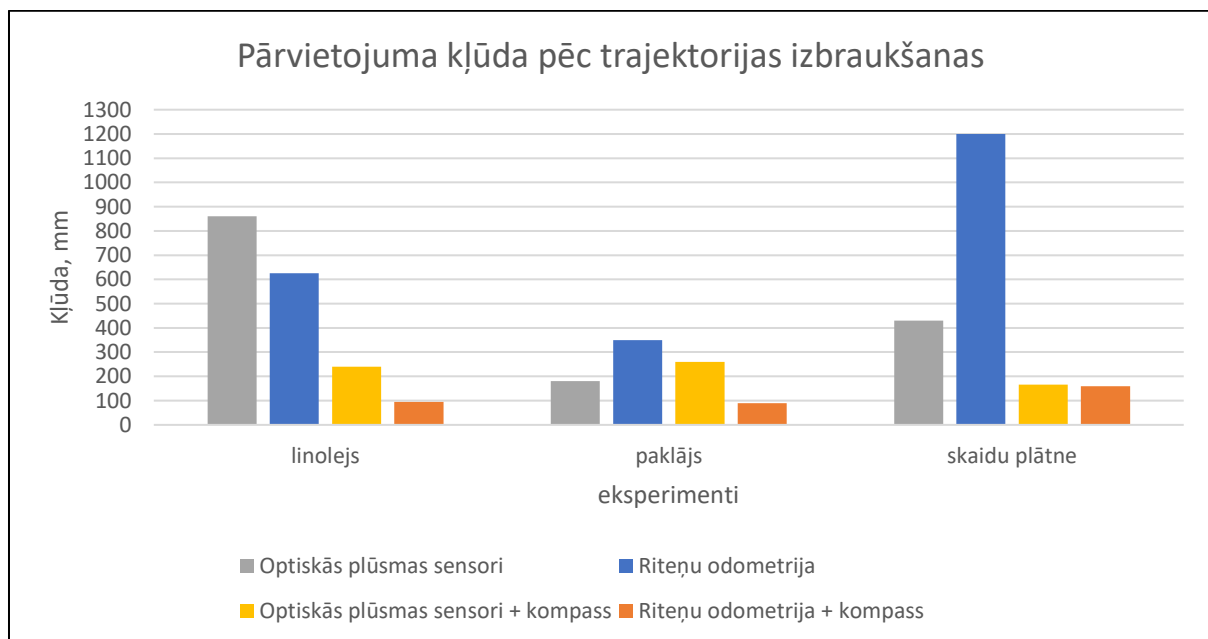
4.7. att. Robota nomērītā pārvietojuma grafiks trajektorijai ar atgriešanos sākumpunktā – paklājs

Otrajā eksperimentā uz skaidu plātnes (skatīt 4.8 attēlu) var novērot, ka riteņu odometrija atkal visos pagriezienos ir nomērījusi lielāku pagrieziena leņķi nekā faktiskais, to var skaidrot ar to, ka gan šis grīdas segums, gan linolejs ir slideni, un griešanās laikā kāpurķēdes izslīd, savukārt uz paklāja izslīdēšana nav tik izteikta un enkoderu rādījumi ir tuvāk patiesajam pārvietojumam. Šajā braucienā riteņu odometrija sasniedza 1200mm precizitāti, bet izmantojot pagrieziena leņķi – 160mm. Optiskās plūsmas sensoru precizitāte ir 430mm, un, izmantojot pagrieziena leņķi, tā uzlabojas līdz 166mm.



4.8. att. Robota nomērītā pārvietojuma grafiks trajektorijai ar atgriešanos sākumpunktā – skaidu plātne

Riņķveida trajektoriju eksperimentu gala pozīciju nobīdes visiem kinemātiskajiem modeļiem apkopotas 4.9. attēlā. Var novērot, ka optiskās plūsmas sensori pārsvarā ir precīzāki nekā riteņu odometrija, bet, izmantojot pagrieziena lenķi no platformas telemetrijas, riteņu odometrija ir visprecīzākā visos 3 eksperimentos.



4.9. att. Visu 4 kinemātisko modeļu pārvietojuma kļūdu salīdzinājums

SECINĀJUMI

Šobrīd mobilu robotu lokalizācija ir plaši pētīts temats un notiek daudzu jaunu risinājumu izstrāde. Atrašanās vietas noteikšana mobilu robotu nozarē ir viens no svarīgākajiem izaicinājumiem, kas jāatrisina, lai mobili roboti varētu droši pārvietoties un pildīt savus uzdevumus starp cilvēkiem, iekļaujoties dinamiskā vidē. Ir pieejams plašs literatūras klāsts, kas apskata robotu lokalizāciju, tomēr ne visiem rakstiem ir iespējams piekļūt, kā arī pietrūkst jaunāko lokalizācijas tehnoloģiju apkopojumi, kas atsauktos uz jauniem, neseniem zinātniskajiem rakstiem.

Gan optiskās plūsmas sensori, gan riteņu odometrija testētajos apstākļos nebija viennozīmīgi precīzāks mobila robota lokalizācijas risinājums, tomēr abi no risinājumiem uzrādīja ievērojamu precizitātes pieaugumu, kad kinemātiskajā modelī tika pielietots no inerciālo mērījumu moduļa iegūts pagrieziena leņķis. Optiskās plūsmas sensori kalibrējas precīzāk un tiem ir labāka izšķirtspēja, tomēr testētajos apstākļos risinājums ar riteņu odometriju uzrādīja augstāku precizitāti.

Ir secināts, ka industriāli ražotu robotizētu platformu var aprīkot ar papildu sensoriem, izmantojot robotikā un elektronikā pielietotus standartus un komunikācijas protokolus, tai skaitā TCP, UART, SPI, u.c. Vairāku sensoru, kā arī vairāku dažādu veidu sensoru pielietošana viena uzdevuma veikšanai spēj ievērojami uzlabot iegūto rezultātu. Ja vairāki vienādi sensori mēra vienu lielumu, ir iespējams atklāt nobīdes un bojāto sensoru neņemt vērā.

Bakalaura darba rezultātā ir izveidota sensoru testa platforma, kā arī uzlabots “Jaguar V4” vadīšanas risinājums. Ar nelieliem uzlabojumiem, šo platformu un sensoru testa arhitektūru būs iespējams lietot citiem studentiem un pētniekiem, izmantojot kā pamatu saviem eksperimentiem, un zinātniskajai darbībai.

Kopumā visi plānotie darba mērķi ir sasniegti un uzdevumi ir izpildīti. Eksperimentālā risinājumā varētu uzlabot sensoru lasīšanas biežumu. Optiskās plūsmas sensorus ir iespējams lasīt ar daudz lielāku frekvenci, nekā tas tika veikts eksperimentā, iespējams, tādējādi uzlabojot mērījumu precizitāti. Tāpat varētu pilnveidot lietotos kinemātiskos modeļus, ņemot vērā arī optiskās plūsmas sensoru uzticamības rādījumus. Robotizēto platformu teorētiski ir iespējams vadīt, izmantojot UDP protokolu, kas spētu strādāt ātrāk, tādējādi būtu iespējams platformu vadīt precīzāk, kā arī biežāk saņemt telemetrijas datus.

LITERATŪRA

- Alatise, M. B., & Hancke, G. P. (2020). A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access*, 8, 39830–39846.
- Aqel, M. O. A., Marhaban, M. H., Saripan, M. I., & Ismail, N. B. (2016). Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. *SpringerPlus*, 5(1).
- Baker, S., Scharstein, D., Lewis, J. P., Roth, S., Black, M. J., & Szeliski, R. (2011). A database and evaluation methodology for optical flow. *International Journal of Computer Vision*, 92(1), 1–31.
- Bakker, B. de. (2019). *MaxBotix MB7389 weather-resistant distance sensor tutorial*.
<https://www.makerguides.com/maxbotix-mb7389-arduino-tutorial/>
- Barron, J. L., Fleet, D. J., & Beauchemin, S. S. (1994). Performance of Optical Flow Techniques. *The Philosophy Behind Physics*.
- Beauchemin, S. S., & Barron, J. L. (1996). The Computation of Optical Flow. *DWI Reports*, 117(3), 1–672.
- Bi, Y., Chen, G., Deng, Q., & Wang, Y. (2018). *Embedded Systems Technology* (Vol. 857). Springer Singapore.
- Borenstein, J., Everett, H. R., Feng, L., & Wehe, D. (1997). Mobile robot positioning: Sensors and techniques. *Journal of Robotic Systems*, 14(4), 231–249.
- Briod, A., Zufferey, J.-C., & Floreano, D. (2013). Optic-Flow Based Control of a 46g Quadrotor. *IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- Campbell, S., O’Mahony, N., Carvalho, A., Krpalkova, L., Riordan, D., & Walsh, J. (2020). *Path Planning Techniques for Mobile Robots A Review*. 12–16.
- Campbell, S., O’Mahony, N., Krpalcova, L., Riordan, D., Walsh, J., Murphy, A., & Ryan, C. (2018). Sensor Technology in Autonomous Vehicles : A review. *29th Irish Signals and Systems Conference, ISSC 2018*, 1–4.
- Chao, H., Gu, Y., & Napolitano, M. (2014). A survey of optical flow techniques for robotics navigation applications. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 73(1–4), 361–372.
- Ciezkowski, M. (2017). Triangulation positioning system based on a static IR beacon-receiver system. *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2017*, 84–88.
- de, V., Rouat, J., & Vanden-Abee, J. (2012). Models of Information Processing in the Visual Cortex. *Visual Cortex - Current Status and Perspectives, August 2016*. <https://doi.org/10.5772/50616>
- DevicePlus Team. (2018). *Legs or Wheels: Which Is the Robotic Future?*
<https://www.deviceplus.com/trending/legs-wheels-robotic-future/>

- Diaz, E. M., Ahmed, D. B., & Kaiser, S. (2018). A review of indoor localization methods based on inertial sensors. In *Geographical and Fingerprinting Data for Positioning and Navigation Systems: Challenges, Experiences and Technology Roadmap*. Elsevier Inc.
- Ding, W., Wang, J., Han, S., Almagbile, A., Garratt, M. A., Lambert, A., & Wang, J. J. (2009). Adding Optical Flow into the GPS/INS Integration for UAV navigation. *Proc. of International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium, June 2014*, 1–13.
- DrRobot. (2018). *Jaguar V4 Mobile Platform & Jaguar V4 with Manipulator Arm User Guide*.
- Fantoni, I., & Sanahuja, G. (2014). Optic Flow-Based Control and Navigation of Mini Aerial Vehicles. *AerospaceLab*, 8, 1–9.
- Forster, C., Pizzoli, M., & Scaramuzza, D. (2014). *SVO Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry 2014 cited_266.pdf*.
- Fuh, C. S., & Maragos, P. (1989). *Region-based optical flow estimation*. 130–135.
- Giachetti, A., Campani, M., & Torre, V. (1998). The use of optical flow for road navigation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(1), 34–48.
- He, M., Zhu, C., Huang, Q., Ren, B., & Liu, J. (2019). A review of monocular visual odometry. *Visual Computer*.
- Herissé, B., Hamel, T., Mahony, R., & Russotto, F. X. (2012). Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(1), 77–89.
- Horn, B. K., & Schunck, B. G. (1981). Determining optical flow. *Techniques and Applications of Image Understanding*, 0281, 319–331.
- Ilg, E., Mayer, N., Saikia, T., Keuper, M., Dosovitskiy, A., & Brox, T. (2017). FlowNet_2.0_Evolution_CVPR_2017_paper. *Cvpr2017*, 1–9.
- Kalnoskas, A. (2019). *Radar sensors work at 60 GHz for high-precision sensing*.
<https://www.microcontrollertips.com/sc1220-series-radar-sensors-work-at-60-ghz-high-precision-sensing/>
- Kleeman, L., Kleeman, L., Kuc, R., & Kuc, R. (2008). Sonar Sensin 21. *Robotics*, 491–519.
- Kurc, K., & Szybicki, D. (2011). Kinematics of a Robot with Crawler Drive. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 15(4), 93–101.
- Lee, C., Kosta, A., Zhu, A. Z., Chaney, K., Daniilidis, K., & Roy, K. (2020). *Spike-FlowNet: Event-based Optical Flow Estimation with Energy-Efficient Hybrid Neural Networks*. 1–16.
- Majchrzak, M. (2020). *Autonomous mobile robot market expanding at record pace*.
<https://www.controleng.com/articles/autonomous-mobile-robot-market-expanding-at-record-pace/>
- Malyavej, V., Kumkeaw, W., & Aorpimai, M. (2013). Indoor robot localization by RSSI/IMU sensor fusion. *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2013*.

- Mandow, A., Martínez, J. L., Morales, J., Blanco, J. L., García-Cerezo, A., & González, J. (2007). Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1222–1227.
- Nadour, M., Boumehraz, M., Cherroun, L., & Puig, V. (2019). Mobile robot visual navigation based on fuzzy logic and optical flow approaches. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 10(6), 1654–1667.
- Nistér, D., Naroditsky, O., & Bergen, J. (2004). Visual odometry. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1.
- Noureddin, A., Karamat, T. B., & Georgy, J. (2013). Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration. In *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-Based Positioning and their Integration*.
- Olson, E. (2004). *A primer on odometry and motor control*. 1–15.
- Pcr, A., & Kit, L. (2012). ADNS-9500 datasheet. *고생물학회지*, 31402(September 2004), 0–1.
- Physics&ComputingBlog. (2017). *Creating Bitmaps with Random Patterns*.
<https://physicscomputingblog.com/tag/random-noise/>
- Proni, F. (2019). *Localisation with Artificial Landmarks*. <https://avp-project.uk/localisation-with-artificial-landmarks>
- Psmarketresearch.com. (2020). *Autonomous Mobile Robots Market Research Report*.
<https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/autonomous-mobile-robots-market>
- Qazizada, M. E., & Pivarčiová, E. (2016). Mobile robot controlling possibilities of inertial navigation system. *Procedia Engineering*, 149(June), 404–413.
- Reading PWM from RC receiver*. (2017).
<https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?t=196611>
- Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 1–22.
- Saudabayev, A., Kungozhin, F., Nurseitov, D., & Varol, H. A. (2015). Locomotion strategy selection for a hybrid mobile robot using time of flight depth sensor. *Journal of Sensors*, 2015.
- Scaramuzza, D., & Fraundorfer, F. (2011). Tutorial: Visual odometry. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 18(4), 80–92.
- Schweber, B. (2018). *Rotary encoder basics and applications, Part 1: Optical encoders*.
<https://www.analogictips.com/rotary-encoders-part-1-optical-encoders/>
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2011). *Mobile Robot Localization*.
- Socionext. (2018). *Electromagnetic Wave Sensors*.
<http://socionextus.com/products/sensors/electromagnetic-wave-sensors/>
- Sorensen, D. K., Ovinis, M., & Lee, S. (2003). *On-Line Optical Flow Feedback*. October.

- Tajti, F., Szayer, G., Kovács, B., Barna, P., & Korondi, P. (2016). Optical flow based odometry for mobile robots supported by multiple sensors and sensor fusion. *Automatika*, 57(1), 201–211.
- Tariq, Z. Bin, Cheema, D. M., Kamran, M. Z., & Naqvi, I. H. (2017). Non-GPS positioning systems: A survey. *ACM Computing Surveys*, 50(4).
- Wang, Y., & Rajamani, R. (2018). Direction cosine matrix estimation with an inertial measurement unit. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 109, 268–284.
- Wikipedia. (2020). *Lidar*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- Woodman, O. J. (2007). *An introduction to inertial navigation*. 696.
- Zaffar, M., Ehsan, S., Stolkin, R., & Maier, K. M. D. (2018). Sensors, SLAM and Long-term Autonomy: A Review. *2018 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, AHS 2018*, 285–290.
- Zimmer, H. (2009). *Complementary Optic Flow*. 207–220.