



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lazerinio tolimačio autonominėse transporto priemonėse galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Jazokas
Projekto autorius

doc. Saulius Japertas
Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lazerinio tolmačio autonominėse transporto priemonėse galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Lukas Jazokas
Projekto autorius

doc. Saulius Japertas
Vadovas

doc. Rolandas Makaras
Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Lukas Jazokas

Lazerinio tolimačio autonominėse transporto priemonėse galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Lukas Jazokas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) Lukas Jazokas

1. Baigiamojo projekto tema:

Lazerinio tolimačio autonominėse transporto priemonėse galimybių tyrimas

Research of Laser Rangefinder in Autonomous Vehicles

2. Projekto tikslas:

Ištirti lidaro parodymų tikslumą įvairiomis aplinkos sąlygomis.

3. Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti lidaro struktūra bei jo veikimą.
2. Išanalizuoti lidaro signalo kokybę veikiančius veiksnius, jų kilmę bei ypatybes.
3. Suprojektuoti ir realizuoti lidaro eksperimentinį standą.
4. Atlikti tyrimus esant geroms oro sąlygoms bei krituliams.
5. Įvertinti eksperimentų rezultatų tikslumą.
6. Ištirti realizuoto lidaro eksperimentinio stendo galimybes kurti 3D vaizdus.
7. Pateikti išvadas ir rekomendacijas.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

santrauka, įvadas, literatūros apžvalga, darbo metodika, rezultatų aptarimas, išvados, literatūros sąrašas.

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius	Lukas Jazokas	2020-02-04
	<i>(vardas, pavardė, data)</i>	
Baigiamojo projekto vadovas	doc. Saulius Japertas	2020-02-04
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	
Krypties studijų programų vadovas	prof. Artūras Keršys	2020-02-04
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	

Jazokas Lukas. Lazerinio tolimačio autonominėse transporto priemonėse galimybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Lidaras, lazeris, skenavimas, autonominės transporto priemonės, jutiklis.

Kaunas, 2021. 80 p.

Santrauka

Šio magistrinio darbo tikslas yra ištirti lazerinio tolimačio, kitaip vadinamo lidaro, veikimo galimybes įvairiomis aplinkos sąlygomis. Remiantis moksliniais darbais analizuojama lidaro struktūra, pateikiami parametrai, kurie lemia įrenginio kokybišką aplinkos skenavimą. Taip pat, aprašomi klaidas įtakojuojantys veiksniai, nagrinėjama lietaus, rūko bei sniego daroma įtaka antžeminei LiDAR sistemai. Toliau, tyrimo metodikoje aprašomas tyrimams pasirinktas lidaras, eksperimentų planas ir naudojami statistiniai parametrai rezultatų įvertinimui. Taipogi, projektinėje dalyje pateikiamas eksperimentinio stendo kūrimas, reikalingi komponentai, stendo blokinė schema ir valdymo algoritmas. Po to, naudojant sukurtą realų eksperimentinį stendą atliekami trys eksperimentai fiksuojant konkrečius objektus. Pirmasis eksperimentas vykdomas prie įprastų oro sąlygų (giedras oras) matuojant nuotolį iki tiriamojo objekto keičiant skenavimo dažnius. Antrasis eksperimentas atliekamas irgi matuojant nuotolį iki objekto prie tam tikrų dažnių, tik įprastos aplinkos sąlygos pakeičiamos į lietingą orą. Paskutinis trečiasis eksperimentas vykdomas siekiant nustatyti, kaip lietus gali pakeisti lidaro kuriamą aplinkos matymo kokybę ir diapazoną. Šiame eksperimente koncentruojamasi į žmogaus silueto atkūrimą. Remiantis gautais rezultatais darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

Jazokas Lukas. Research of Laser Rangefinder in Autonomous Vehicles. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Saulius Japertas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: Lidar, laser, scanning, autonomous vehicles, sensor.

Kaunas, 2021. 80 p.

Summary

The aim of this master's thesis is to research the possibilities of operation of a laser rangefinder, otherwise known as lidar, in various environmental conditions. Based on the scientific works, the structure of the lidar sensor is analyzed, the parameters which determine the quality of the device environmental scan are presented. Also, the factors influencing the errors are described, the influence of rain, fog and snow to the terrestrial LiDAR system is analyzed. Furthermore, the study methodology describes selected lidar for the research, design of the experimentals and used statistical parameters for results evaluation. Also, the design part presents the development of the experimental stand, the required components, describes block diagram of the lidar stand and his control algorithm. After this part, using the created real experimental stand, three experiments are performed to capture specific objects. The first experiment is performed under normal weather conditions (clear air) by measuring distances to the object by changing the scanning frequencies. The second experiment is also performed by measuring distances to the object at certain frequencies, only the normal ambient conditions are changed to rainy air. The final third experiment is conducted to determine how rain can change quality and range of environmental vision created by lidar. This experiment focuses on human body silhouette creation in three-dimensional space. Based on the obtained results, conclusions are presented at the end of the work.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų sąrašas	13
Įvadas.....	14
1. Lidaro svarba autonominiame automobilyje	15
1.1. LiDAR įrenginys	15
1.2. Lidaro matematinis modelis	17
2. Žemės paviršiaus duomenų apdorojimas.....	18
3. Autonominės transporto priemonės lokalizavimas.....	21
4. Lidaro klaidas įtakojantys veiksniai.....	23
4.1. Lietaus, rūko ir sniego parametrai, darantys įtaką lidaro veikimui.....	24
4.2. Lietaus daroma įtaka antžeminei LiDAR sistemai pavyzdys	26
5. Lazero spindulio atspindėjimo nuo įvairių objektų įvertinimas.....	27
6. SLAM ir ROS operacinės sistemos taikymas	30
7. Tyrimo metodika.....	32
7.1. Eksperimentams pasirinktas naudoti lidaras.....	33
7.2. Eksperimentų scenarijai.....	35
7.3. Rezultatų apdorojimas ir statistiniai parametrai išmatuotų duomenų įvertinimui ...	36
8. Projektinė dalis.....	38
8.1. Blokinė schema.....	38
8.2. Pasirinktas mikrovaldiklis	39
8.3. Akselerometro / giroskopo modulio panaudojimas.....	40
8.4. Naudojamas variklis platformos sukimui atlikti	41
8.5. Pokrypio kampo, lidaro skenavimo greičio ir aplinkos temperatūros indikavimas... 	41
8.6. Lidaro sąsaja su kompiuteriu	42
8.7. Stendo valdymo algoritmas.....	43
8.8. Stendo konstrukcijos kūrimas	45
9. Eksperimentai.....	49
9.1. Eksperimentas Nr. 1	49
9.2. Eksperimentas Nr. 2	53
9.3. Eksperimentų Nr. 1 ir Nr. 2 rezultatų lyginimas	56
9.4. Eksperimentas Nr. 3	59
Išvados	64

Literatūros sąrašas	65
Priedai.....	70
1 priedas. Eksperimento Nr. 1 rezultatai	70
2 priedas. Eksperimento Nr. 2 rezultatai	73
3 priedas. Eksperimentų Nr. 1 ir Nr. 2 sklaidos diagramos	76
4 priedas. Duomenų apdorojimo pavyzdys su „Microsoft Excel“ programa	79
5 priedas. Sertifikatas.....	80

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Kalmano filtro ir EKF parametrai [17].....	22
2 lentelė. Klaidų susidarymo priežastys [21]	23
3 lentelė. Lietaus ir rūko parametrai [21].....	25
4 lentelė. Snaigių parametrai [21]	26
5 lentelė. „Slamtec RoboPeak A1M8“ pagrindiniai techniniai parametrai [41].....	34
6 lentelė. Mechanizmo sisteminiai elementai	49
7 lentelė. Eksperimento rezultatai 1 m ir 6 m nuotolyje prie gerų oro sąlygų	51
8 lentelė. Eksperimento rezultatai 1 m ir 6 m nuotolyje imitavus lietu	54
9 lentelė. Atkuriamo žmogaus silueto taškų kiekis.....	62
10 lentelė. Eksperimento rezultatai prie gerų oro sąlygų.....	70
11 lentelė. Eksperimento rezultatai imitavus lietu	73
12 lentelė. Sklaidos diagramos.....	76

Paveikslų sąrašas

1 pav. Lidaro vidinė struktūra [7]	16
2 pav. Gautas taškų debesis skenuojant aplinką su lidarą [14]	18
3 pav. Aplinkos objektų rūšiavimo algoritmas [14].....	19
4 pav. Apdorojimo algoritmas vertikalia ir horizontalia kryptimis [14].....	19
5 pav. Aplinkos taškų debesis kokybinis palyginimas: kairėje pusėje naudotas tik „fast ground segmentation“ skenavimas, o dešinėje pusėje pavaizduoti rezultatai, kai tyrime pritaikytas 3 pav. segmentavimo algoritmas (mėlyna spalva – vertikali linija, raudona spalva – horizontali linija) [14]	20
6 pav. Sugeneruotas nežinomos aplinkos žemėlapis, kai naudojamas Kalmano filtras (kairėje) ir jo netaikant (dešinėje) [18]	23
7 pav. Užmirimo Q_{EXT} ir atgalinės sklaidos Q_B efektyvumų funkcinės priklausomybės nuo vandens lašelio skersmens D , kai $\lambda = 905 \text{ nm}$ [21].....	24
8 pav. Lietaus lašelių pasiskirstymas $N(D)$, pagal D. Deirmendjian modifikuotą „Gama“ funkciją [21]	26
9 pav. Diapazono mažėjimas didėjant kritulių intensyvumui: kairėje 0 mm/h, viduryje 9 mm/h, dešinėje 17 mm/h [29]	27
10 pav. Nuskaitytų taškų skaičius (kairėje) ir pasirinkto objekto nuotolio aptikimas (dešinėje) per vieną skenavimo ciklą esant skirtingiems lietaus intensyvumams [29]	27
11 pav. Virtualių jutiklių modeliavimas su „Pro-SiVIC“ pavyzdžiai [31, 32]	28
12 pav. Lidaro lazerio spindulio atspindėjimo simuliacija programa „Pro-SiVIC“ [33]	28
13 pav. Santykio signalas / triukšmas kitimas priklausomai nuo atstumo tarp lidaro ir konkrečios automobilio išorinės vietos [33]	29
14 pav. Objektų aptikimo ir matymo kokybė skirtingais atstumais keičiantis matomumui rūko sąlygomis (kairėje) ir kritulių kiekiui (dešinėje) [33].....	29
15 pav. „Visual SLAM“ bei „LiDAR SLAM“ aplinkos žemėlapiai naudojant RGB-D kamerą (kairėje) ir dvimatį lidarą (dešinėje) [35]	30
16 pav. Autonominio roboto navigavimo blokinė schema paremta SLAM funkcija [36].....	31
17 pav. Sugeneruotas aplinkos žemėlapis atvaizduotas ROS aplinkoje, naudojant atviro kodo „Hector SLAM“ programinį paketą [37]	31
18 pav. ROS operacinėje platformoje „Ubuntu“ sugeneruotas aplinkos 2D taškų debesis naudojant lidarą	32
19 pav. Lidaras „Slamtec RoboPeak A1M8“	33
20 pav. „RoboPeak A1“ komplektacijos brėžinys [40]	33

21 pav. „RP-LiDAR Frame Grabber“ programinis langas ir duomenų failo pavyzdys [42].....	34
22 pav. Tyrimo Nr. 1 scenarijus prie įprastų oro sąlygų.....	35
23 pav. Tyrimo Nr. 2 scenarijus inicijuojant dirbtinį lietu.....	35
24 pav. Tyrimo Nr. 3 pirmo etapo scenarijus prie įprastų oro sąlygų.....	36
25 pav. Tyrimo Nr. 3 antro etapo scenarijus inicijuojant dirbtinį lietu.....	36
26 pav. Lidaro „Slamtec RoboPeak A1M8“ stendo valdymo blokinė schema 2D ir 3D aplinkos skenavimams	38
27 pav. Plokštė su integruotu lustu – STM32F103C8T6 mikrovaldikliu ir naudojamas programavimo adapteris STLinkV2.....	40
28 pav. Giroskopas – akcelerometras MPU-6050.....	40
29 pav. Servo variklis MG996R	41
30 pav. Informacinių elementų ir valdymo klavišų išdėstymas.....	42
31 pav. Lidaro skenavimo dažnis valdomas elektrine grandine [42] į kurią tiekiami kintamos skverbties stačiakampio formos (PWM) signalas	42
32 pav. „RoboPeak A1“ (kairėje) serijos modelio prijungimas prie USB RS232 adapterio (dešinėje), kuris naudojamas duomenims perduoti į kompiuterį [42].....	43
33 pav. „RoboPeak A1M8“ stendo valdymo algoritmas	44
35 pav. Servo variklio laikiklis su dirželio įtempimo mechanizmu (slankiojanti struktūra)	46
36 pav. Laikančiųjų konstrukcijų stabilumo ir tvirtumo užtikrinimui naudojamos skersinės sijos..	46
37 pav. Ašies lygio reguliatorius ir tvirtinamieji elementai ant ašies	47
38 pav. Pagrindas sustiprintas kampiniais profiliais	47
39 pav. Lidaro stendo veikimo funkcijos: pozicija ties +90° (kairėje), ties 0° (viduryje) ir -90° (dešinėje)	47
40 pav. Eksperimentinio stendo svorio įvertinimas	48
41 pav. Surinktos konstrukcijos matmenys.....	48
42 pav. Realizuotas stendas su valdymo pultu.....	49
43 pav. Eksperimento Nr. 1 vykdymas (kairėje) ir lokalinio žemėlapiu atvaizdavimo pavyzdžiai (dešinėje) prie skirtingų skenavimo dažnių	50
44 pav. Sklaidos diagrama prie įprastų oro sąlygų 1-o metro nuotolyje.....	52
45 pav. Sklaidos diagrama prie įprastų oro sąlygų 6-ių metrų nuotolyje.....	53
46 pav. Eksperimento Nr. 2 vykdymas (kairėje) ir lokalinio žemėlapiu atvaizdavimo pavyzdžiai (dešinėje) prie skirtingų skenavimo dažnių	54
47 pav. Sklaidos diagrama imitavus lietu 1-o metro nuotolyje.....	56

48 pav. Sklaidos diagrama imitavus lietu 6-ių metrų nuotolyje.....	56
49 pav. Standartiniai nuokrypiai be lietaus ir esant lietai vieno bei dviejų metrų nuotoliuose	57
50 pav. Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas vieno ir dviejų metrų nuotoliuose, kai skenavimo dažnis yra 2 Hz.....	57
51 pav. Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas vieno ir dviejų metrų nuotoliuose, kai skenavimo dažnis yra 3,5 Hz.....	58
52 pav. Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas vieno ir dviejų metrų nuotoliuose, kai skenavimo dažnis yra 7 Hz.....	58
53 pav. Eksperimento Nr. 3 eiga.....	59
54 pav. Nuskenuotos aplinkos 3D taškų debesis	60
55 pav. Nuskenuotas žmogaus siluetas 2,5 m atstumu prie gerų oro sąlygų (aukščiau) ir imitavus lietu (žemiau).....	61
56 pav. Nuskenuotas žmogaus siluetas 5 m atstumu prie gerų oro sąlygų (aukščiau) ir imitavus lietu (žemiau).....	62

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

LiDAR (angl. *Light Detection and Ranging*) – impulsinis lazeris matuojantis atstumus iki objektų, vadinamas lidarų.

IMU-GPS (angl. *inertial measurement unit – global positioning system*) – inercijos matavimo įrenginio ir globalios padėties nustatymo sistema.

SLAM (angl. *simultaneous localization and mapping*) – sinchroninis pozicijos ir aplinkos žemėlapių kūrimas.

ADAS (angl. *advanced driver-assistance systems*) – sistema padedanti vairuotojui saugiai valdyti transporto priemonę.

EKF (angl. *extended Kalman filter*) – išplėstinis Kalmano filtras.

LCD (angl. *Liquid-Crystal display*) – skystųjų kristalų ekranėlis.

PWM (angl. *Pulse Width Modulation*) – impulso pločio moduliacija.

ROS (angl. *Robot Operating System*) – robotikos operacinės sistemos.

RMS (angl. *root mean square*) – vidutinė kvadratinė paklaida.

CDF (angl. *Cumulative distribution function*) – normaliojo skirstinio kaupiamojo pasiskirstymo funkcija.

PDF (angl. *Probability density function*) – normaliojo skirstinio tikimybinio tankio funkcija.

Įvadas

Autonominiai automobiliai be abejonės keičia transporto pramonę. Šiuolaikiniai automobiliai jau turi autonominio automobilio užuomazgų, nes turi integruotas atitinkamas automatizuotas funkcijas, tokias kaip parkavimo sistema, kliūčių aptikimas, autonominis stabdymas, autopilotas ir kt. Nors automobilių, sunkvežimių ir kitų transporto priemonių automatizuotos vairavimo sistemos vis dar yra vystomos, netolimoje ateityje tikimasi didžiulių pokyčių ir spartaus naujų galimybių integravimo transporte. Tikimasi, kad naujausios technologijos šioje srityje ir naujo vairavimo ypatybių plėtra turės teigiamą poveikį ekonomikai, gamtinei ir socialinei aplinkai [1, 2].

Autonominių transporto priemonių sistema geba aptikti supančios aplinkos įvairius objektus bei tuo pačiu vertinti nuotolio atstumus lazerinio tolinačio (toliau – lidaras) dėka. Šis prietaisas laikomas kaip vienu iš svarbiausių, nes bepilotei antžeminei transporto priemonei suteikiama galimybė matyti aplinką realiu laiku. Įrenginys dažniausiai montuojamas ant transporto priemonės stogo, nes taip yra geriausiai perteikiamas matymo laukas, kuris atvaizduojamas į dvimatį arba trimatį aplinkos žemėlapi. Tačiau, sklandžiam ir neprikaištingam lidaro veikimui kyla sunkumų, kai pavyzdžiui užklumpa lietingos oro sąlygos, rūkas, mieste vyrauja smogas ir panašiai. Tad, atsirandantys įvairūs nepageidaujami efektai atmosferoje paveikia ir susilpnina bepilotės transporto priemonės įprastą matymo lauko spindulį. Tai padidina bei iššaukia automobilį valdančio kompiuterio klaidas, kurios kelyje sukeltų nemalonių situacijų bei padidintų avarijos tikimybę.

Neabejojama, jog autonominio transporto sistemos sudedamoji dalis – lidaras bei kitos intelektualiosios priemonės toliau tobulės, leis užtikrinti didesnę saugumą, be klaidų optimizuos maršrutą ir pagerins eismo dalyvių saugumą [3, 4].

Naujumas

Šiuo metu autonominiai automobiliai yra bandymų fazėje. Kol kas, tokios transporto priemonės dar nėra įsitvirtinusios rinkoje, nes susiduriama su keblumais, kuriuos iššaukia sistemų netobulumas. Kiekvienais metais autonominės transporto priemonės patenka į avarijas, kurių priežastimi tampa tam tikroje sistemos dalyje atsiradusios klaidos. Viena iš esminių problemų kyla su lidaro veikimu sudėtingomis oro sąlygomis. Tad, šiuo darbu siekiama parodyti, kaip lidaro veikimą gali paveikti aplinkos sąlygų pasikeitimas.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas - ištirti lidaro parodymų tikslumą įvairiomis aplinkos sąlygomis. Darbo uždaviniai būtų:

- Išanalizuoti lidaro struktūra bei jo veikimą.
- Išanalizuoti lidaro signalo kokybę veikiančius veiksnius, jų kilmę bei ypatybes.
- Suprojektuoti ir realizuoti lidaro eksperimentinį stendą.
- Atlikti tyrimus esant geroms oro sąlygoms bei krituliams.
- Įvertinti eksperimentų rezultatų tikslumą.
- Ištirti realizuoto lidaro eksperimentinio stendo galimybes kurti 3D vaizdus.
- Pateikti išvadas ir rekomendacijas.

1. Lidaro svarba autonominiame automobilyje

Šiuo metu automobilių pramonėje vyksta perversmo laikotarpis. Vis daugiau gamintojų (*Volkswagen*, *BMW*, *Mercedes-Benz*, *Renault* ir kt.) įsitraukia į modernizacijos periodą, kuriame įprastinius automobilius pakeis į autonominius – bepiločius, kurie gali būti valdomi be žmogaus įsikišimo. Autonominiai automobiliai geba stebėti ir įvertinti aplinką: žemės reljefą, oro sąlygas, eismo intensyvumą, kelio ženklus, šviesoforų signalus, kitų automobilių manevrus, pėsčiųjų ir dviratininkų judėjimą.

Antžeminių bepiločių transportų priemonių sklandus autonomiško režimo veikimas priklauso nuo jutiklių, elektroninių pavarų, sudėtingų algoritmų, mašininio mokymosi sistemos, mikroprocesorių ir programinės įrangos valdymo. Priimami signalai iš jutiklių yra apdorojami elektroninio valdymo bloko, kuris perduoda atitinkamus signalus link pavaros, kurios pagrindinis tikslas yra valdyti transporto priemonę. Šie automobiliai važiavimo metu sukuria aplinkos žemėlapi iš aptiktų objektų. Gaunama informacija iš sukurto žemėlapio perduodama į vartotojo sąsają, kuri valdo automobilio judėjimą, priima kliūčių išvengimo algoritmus. Būtent, sudaryti aplinkos žemėlapi padeda lidaro sistema, kuri yra autonominio automobilio aplinkos matymo priemonė. Lidaras įvertina atstumus tarp kitos pro šalį važiuojančios transporto priemonės ir bet kurios kitos transporto priemonės, esančios priešais ją. Pagal gaunamus duomenis iš lidaro borto kompiuteris sukuria erdvinį vaizdą. Tai padeda kontroliuoti automobilio efektyvų stabdymą ar sustojimą, o kai kelias priekyje yra laisvas sistema leidžia transporto priemonei greitėti iki leistino greičio. Visa autonominio automobilio valdymo struktūra paprastai apjungiamą į dvi sistemas: suvokimo ir sprendimų priėmimo. Suvokimo sistemą sudaro posistemės, atsakingos už automobilio lokalizaciją, kliūčių žemėlapio sudarymą, judančių objektų aptikimą, sekimą ir atpažinimą. Sprendimų priėmimo sistemos posistemė atlieka maršruto planavimą, automobilio veiksmų ir manevrų planavimą. Atitinkamai lidaras yra suvokimo sistemos posistemė. Taipogi, įprastai LiDAR technologija priskiriama, kaip viena iš pagrindinių mašininio matymo priemonių.

Tad, įtraukiant LiDAR technologiją į automobilių pramonę, tikslas yra skatinti ir plėtoti transportų priemonių modernizaciją, pasiekti maksimaliai sklandų važiavimą ir išvengti susidūrimo atveju aptinkant kliūtį. Taip pat, pagerinti priemiestinių kelionių saugumą bei sumažinti avarines rizikas, siekiant visiškai panaikinti žmogiškąjį faktorių, minimalizuoti avaringų situacijų tikimybę.

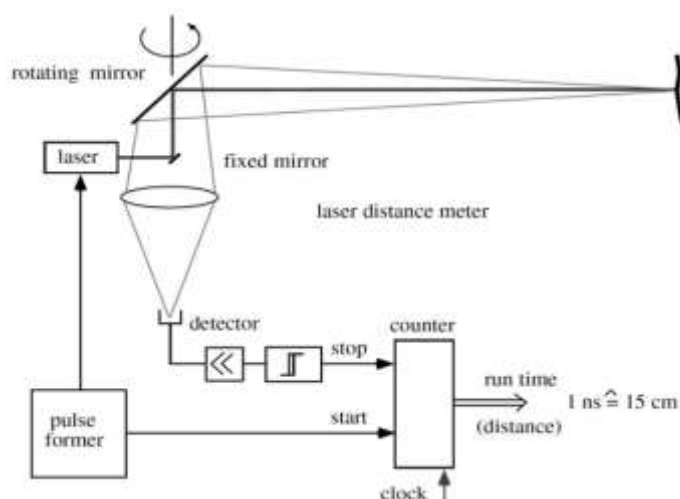
1.1. LiDAR įrenginys

LiDAR (angl. *Light Detection and Ranging*) – tai nuotolinio stebėjimo metodas, kurio metu impulsinis lazeris matuoja atstumus iki objektų ir geba juos vizualizuoti. Lidaro skaitytuvas skleidžia lazerinių impulsų srautus, o atstumas tarp objekto ir skaitytuvo yra matuojamas apskaičiuojant laiką, per kurį lazerio impulsas nukeliauja nuo skaitytuvo į objektą ir atgal. Po to, išmatuotas laiko intervalas paverčiamas atstumu. Kiekvieno atspindėto lazerio impulso koordinatės yra apskaičiuojamos kombinuojant: atstumą ar diapazoną, nuskaitymo kampą, jutiklio vietą ir orientaciją [5]. Norint sėkmingai aptikti objektą, gautas optinis signalas turi būti didesnis už imtuvo jautrumo ribą. Gaunamiems duomenims paklaidos pasireiškia dėl netinkamų oro sąlygų (rūkas, lietus, sniegas), žemės dangos (kalnai, įvairūs augalai). Aukšta žolė, tankūs miškai bei reljefo kalnuotumas paprastai sukelia didesnes aukščio paklaidas negu atviras ir lygus reljefas. Tad, ši nuotolinio stebėjimo technika gautus duomenis apdoroja į informaciją, kurioje pateikiama apie žemės paviršiaus ypatybes bei aplink esančius objektus. Šiuolaikiniai lidarai turi gerą skiriamąją gebą ir veikia dideliais diapazonais, tai

padeda aptikti ir sekti tokias kliūtis kaip automobilius, pėsčiuosius ar dviratininkus, kurie identifikuojami pagal judėjimo pobūdį, kryptį ir greitį.

Lidarą sudarantys pagrindiniai komponentai yra įvardinti toliau [6, 7]:

- Lazerinis siųstuvas - skleidžia šviesos impulsus į atmosferą. Lazeriai skirstomi pagal bangos ilgį. Naudojami dvigubų diodų su neodimo (Nd) jonais bei kieto kūno aktyvia terpe – itrio aliuminio granatu (YAG).
- Optinis mazgas - paprastai teleskopas, kuris surenka dalį išsklaidytos radiacijos (atspindėti signalai) patenkančios į optinį filtrą, kuriame optinis signalas filtruojamas, siekiant sumažinti pašalinės radiacijos triukšmus.
- Fotodetektorius – nuskaityo ir įrašo į sistemą atgalinį signalą. Nufiltruotas optinis signalas paverčiamas elektriniu signalu.
- Skaitmenizavimo blokas - signalas yra sustiprinamas, skaitmenizuojamas bei paruošiamas parametrų pateikimui. Duomenys apdorojami naudojant specialiai sukurtas kompiuterizuotas programines įrangas.



1 pav. Lidaro vidinė struktūra [7]

Detektorius įtvirtinamas ant kolonėlės, kurią suka elektrinis variklis atitinkamu dažniu. Dabartiniuose įrenginiuose gali būti 8, 16, 32 arba 64 spindulių lazeriai, išdėstyti tam tikrais kampais, kad būtų sudarytas tikslus 360 laipsnių sferinis aplinkos vaizdas. Robotikos srityje plačiai naudojami komerciniai 3D diapazono, daugiaspinduliniai lidarai *HDL-64E*, *HDL-32E* ir *VLP-16*, kuriuos gamina „Velodyne“. Šie modeliai daugiausiai skiriasi lazerio / detektorių skaičiumi, esančių besisukančioje galvutėje. Pastaraisiais metais atsirado naujų lazerinių tolimačių, kurie remiasi kietojo kūno technologija [8], pavyzdžiui *S3 LiDAR* serija, kuriuos gamina „Quanergy“. Pagrindinis šių jutiklių pranašumas yra didelė greitis, todėl yra tinkami naudoti transporto priemonėms, judančioms dideliu greičiu. Tačiau jų vertikalė skiriamoji geba yra ribota bei yra brangesni nei 2D lazeriniai tolimačiai. Įprastai lidarų lazeriai skirstomi į keturias kategorijas: nuo didelio intensyvumo (*klasė 4*) iki saugiausios ir žemiausios (*klasė 1*). Skleidžiamas *klasės 1* spindulys nėra kenksmingas žmogaus akims. Dažniausiai naudojami lazerio spindulio bangos ilgiai: 1550, 1064, 905, 780, 532,

355 nm. Moksliniuose tyrimuose dažniausiai naudojami virš 1000 nm bangos ilgio infraraudonųjų spindulių lazeriai, nes jie pasižymi ilgesniu matavimo diapazonu ir yra atsparesni nepageidaujamiems aplinkos poveikiams esant rūkui ar lietu.

1.2. Lidaro matematinis modelis

Lidaro nuotolinio stebėjimo metodo veikimas pagrįstas laiko skaičiavimu, kuris nurodo, kiek užtrunka atspindėto lazerinio spindulio grįžimas atgal į šaltinį. Atsižvelgiant į šviesos greitį, tikslaus atstumo matavimo procesas yra itin spartus. Atstumas r iki objekto nustatomas pagal žemiau pateiktą formulę (1):

$$r = \frac{c \cdot (t - t_0)}{2}; \quad (1)$$

čia c – šviesos greitis [$\approx 3 \cdot 10^8$ m/s]; t – grįžtančiojo signalo laikas [s]; t_0 – perduodamo signalo laikas [s].

Grįžtančio signalo pernešama galia $P(r)$ laike t , aprašoma (2) išraiška:

$$P(r) = P_0 \cdot \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot A \cdot \frac{\beta(r)}{r^2} \cdot e^{-2 \int_0^r \sigma(r') dr'} \cdot C_1; \quad (2)$$

čia P_0 – perduodama signalo galia [W] laiko momentu t_0 ; c – šviesos greitis; τ – impulsų trukmė [s]; A – sistemos imtuvo efektyvus plotas [m²]; r – atstumas iki objekto [m]; $\beta(r)$ ir $\sigma(r)$ – atitinkamai tūrio grįžtamasis ryšys (atgalinė sklaida) [1/m · sr] ir atmosferos silpninimo koeficientas signalui [1/m]; C_1 – lidaro sistemos parametras.

Patogesnis išreiškimas signalo kintamojo S išraiškai yra logaritminė pakoreguoto diapazono galia, kuri apibrėžiama sekančiai:

$$S(r) = \ln[r^2 \cdot P(r)]. \quad (3)$$

Tariant, kad $S = S(r)$ ir $S_0 = S(r_0)$, kai r_0 yra duotas pastovus atskaitos diapazonas, grįžtančio signalo pernešama galia (2) gali būti išreikšta nuo sistemos nepriklausoma forma:

$$S - S_0 = \ln \frac{\beta}{\beta_0} - 2 \int_{r_0}^r \sigma dr'; \quad (4)$$

kur $\beta_0 = \beta(r_0)$.

Diferencialinė lygtis pagal (4) formulę yra išreiškiamą taip:

$$\frac{dS}{dr} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{d\beta}{dr} - 2\sigma. \quad (5)$$

Sprendimas, kuris akivaizdžiai reikalauja žinojimo darant prielaidą tarp β ir σ , kada $d\beta/dr \neq 0$. Kita vertus, jei atmosfera yra homogeninė (vienalytė), kai $d\beta/dr = 0$, slopinimo koeficientą galima tiesiogiai išreikšti signalo kritimu (angl. *signal slope*):

$$\sigma_{hom} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{dS}{dr}. \quad (6)$$

Remiantis atliktais moksliniais tyrimais autoriai traktuoja, jog esant atmosferinėms dujoms (t. y. drėgnos oro sąlygos, rūkas, dulkės) β ir σ gali būti susieti taip:

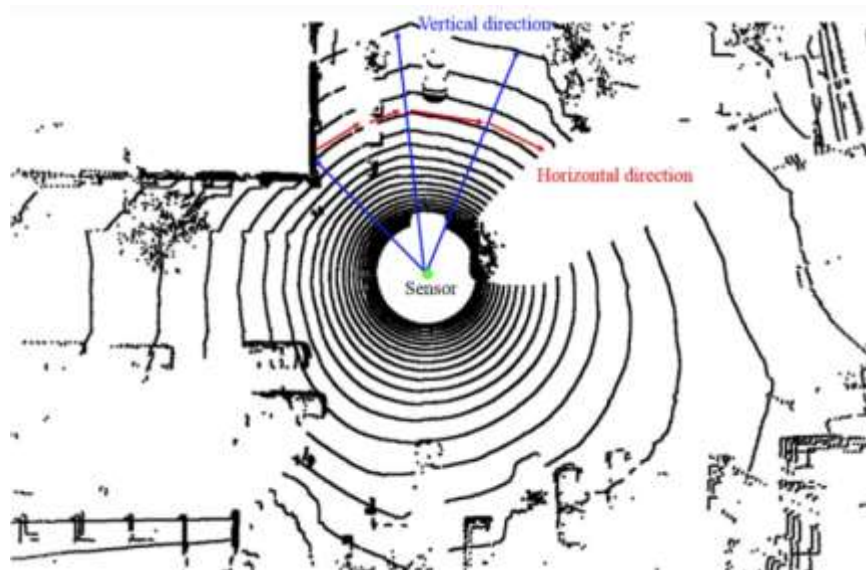
$$\beta = \text{const } \sigma^k; \quad (7)$$

kur k priklauso nuo lidaro bangos ilgio ir įvairių aerozolių savybių, kurie yra sunkiai pastebimi. Vertė k paprastai yra intervale: $0,67 \leq k \leq 1$ [9, 10].

2. Žemės paviršiaus duomenų apdorojimas

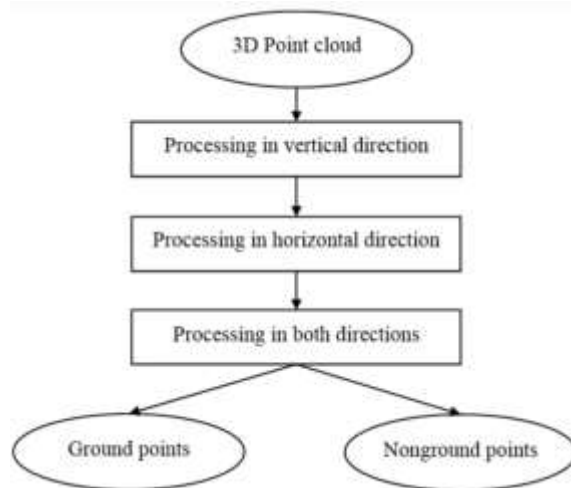
Žemės paviršiaus skirstymas į reljefo objektus ir ant žemės paviršiaus judančius kūnus yra svarbi savybė kiekvienai autonominei ar nuotoliniu būdu valdomai sistemai. Atskyrus žemiškas ir nežemiškas dalis, galima atlikti objektų stebėjimą, trimatės erdvės atkūrimą. Tyrėjų (Phoung Minh Chu, Seoungjae Chu, Jisun Park) atlikti eksperimentiniai bandymai su „Velodyne HDL-32E“ pagal užsibrėžtą tyrimo modelį, realizavo efektyvų ir tikslų žemės paviršiaus duomenų suskaidymą įvairiose aplinkose, kuriose vyrauja lygus, banguotas / nelygus ar kalnuotas reljefai. Jų idėja siūlo erdvės taškus apdoroti ne tik vertikalia, bet ir išilgai horizontalia skenavimo linijų kryptimis tuo pačiu metu. Darbuose [11, 12, 13, 14] pabrėžiama, kad žemės paviršiaus segmentavimas yra nepaprastai svarbus autonominio transporto veikimui, tad svarbu užtikrinti kuo tikslesnį aplinkos duomenų segmentavimą.

Pirmiausia, kiekviename fiksuotame kadre gražinamas aplinkos taškų debesis (žr. 2 pav.), kurio duomenys perkeliama į kompiuterį ir padalijami į dvi grupes: žemės reljefo (angl. *ground points*) ir ant žemės paviršiaus esantys objektai (angl. *nonground points*). Pirmąją grupę sudaro žemės reljefo taškai, kuriais gali judėti bepilotė transporto priemonė, o antrąją grupę sudaro taškai, kurie nepriskirtini kelio grupei, pavyzdžiui: pastatai, medžiai ir pan. Jei reljefas yra pavojingai nuožulnus, tuomet tai traktuojama kaip nežemiška grupė, kuria važiuoti negalima [14]. Šiuo metu žemės paviršiaus duomenų apdorojimas yra itin svarbus procesas, bet tuo pačiu tai sudėtinga užduotis, dėl kompleksinių duomenų ir realaus laiko poreikio įvertinimo [12].



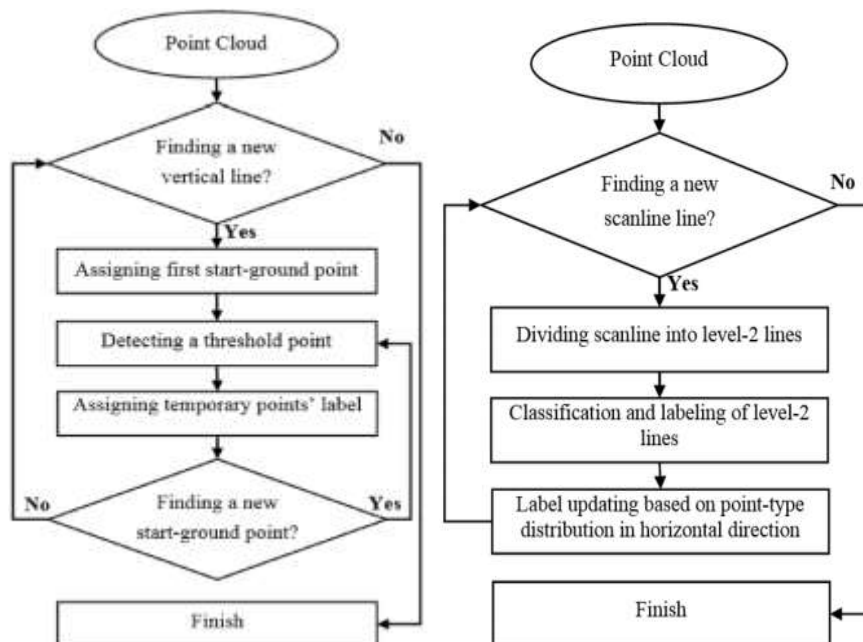
2 pav. Gautas taškų debesis skenuojant aplinką su lidarais [14]

Užfiksuotas aplinkos vaizdas yra segmentuojamas per trijų etapų procesą (žr. 3 pav.). Kiekvieną kartą pateikiamas 3D taškų debesis, kur taškai yra išsidėstę atitinkamomis koordinatėmis, o koordinatinių pradžia laikoma jutiklio vieta. Pirmajame etape duomenys apdorojami vertikalia kryptimi ir kiekvienam taškui priskiriama laikina grupė: žemės taškas (kelias) arba ne žemės. Antrame etape apdorojama kiekviena skenavimo linija horizontalia kryptimi.



3 pav. Aplinkos objektų rūšiavimo algoritmas [14]

Jeigu naudojamas n kanalo lazerinis tolimatis, tada gaunama n skenavimo linijų horizontalia kryptimi. Po antrojo etapo duomenys apdorojami abiem kryptimis, o taškams priskirtos laikinos grupės gali būti pakeistos antrame arba trečiame etapuose.



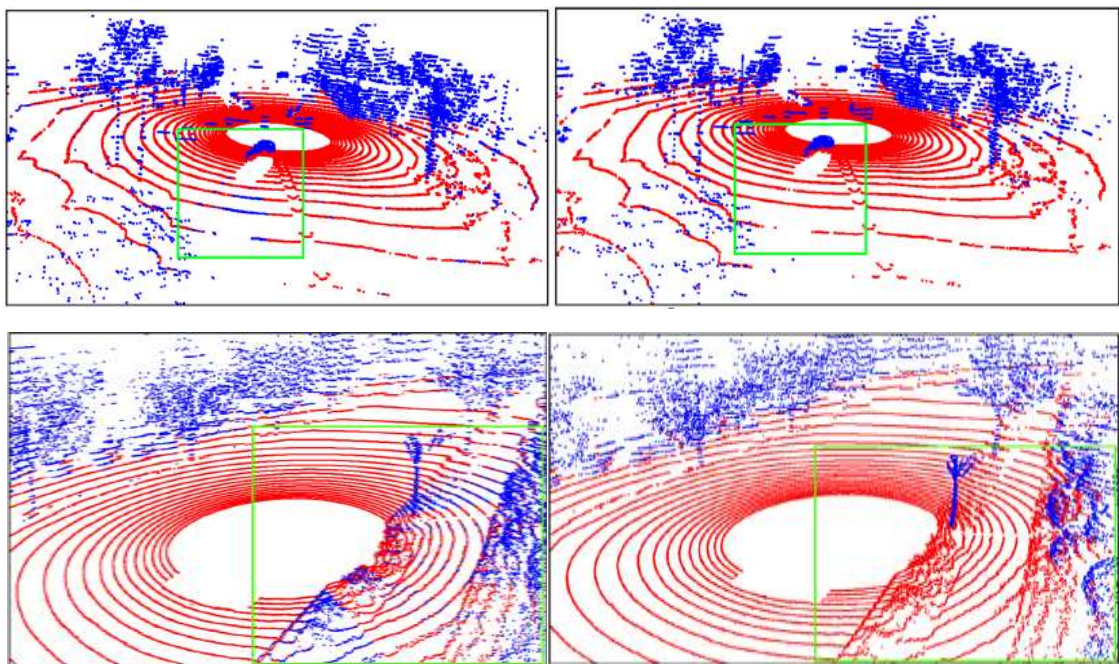
4 pav. Apdorojimo algoritmas vertikalia ir horizontalia kryptimis [14]

Kaip minėta, pirmajame etape duomenys įvertinami vertikalia kryptimi, naudojant greitą žemės segmentavimo techniką (angl. *fast ground segmentation*), kuri padeda gana tiksliai ir greitai suskaidyti įprastą reljefą, bet sudėtingam reljefui šis metodas tampa neveiksmingas. Visi gauti taškai

padalijami į vertikalias linijas, kurios prasideda nuo lidaro jutiklio vietos ir baigiasi tolimiausiose nuskaitytų linijų vietose. Teoriškai, jei naudojamas n spindulių skaitytuvas, gaunama n taškų kiekvienoje vertikalioje linijoje. Kiekvienoje vertikalioje linijoje ieškoma žemės pradžios ir slenkstiniai taškai (angl. *threshold points*). Nuo pradžios taško pirmasis slenkščio taškas nustatomas atsižvelgiant į kiekvieną iš eilės einančių taškų porą. Tada, priskiriama grupė nuo pradžios taško iki kito slenkščio taško. Po šio taško neskiriama grupė, kol nebus nustatytas kitas pradžios taškas [14].

Horizontalia kryptimi kiekviena skenavimo linija apdorojama atskirai trimis etapais. Pirmiausia kiekviena horizontali linija padalijama į mažesnes struktūras, kitaip vadinamomis antro lygio linijomis, kurių kiekvienoje eilutėje yra iš eilės einančių taškų seka. Šis padalijimas priklauso nuo atstumo tarp kiekvieno iš eilės einančių taškų. Antrame etape visos antro lygio eilutės klasifikuojamos į grupes: linijos, kuriose taškai yra ties žemės reljefu ir linijos, kurios taškai formuojasi ties paviršiumi ar aukščiau. Trečiame žingsnyje kiekviena linija vertinama atsižvelgiant į kitas ir atnaujinami dar nei vienai grupei nepriskirti linijų požymiai. Pagrindinio algoritmo trečiame etape užbaigiamos apdoroti likusios antro lygio linijos visomis kryptimis. Nustatomas kampas, nuolydžiai, apibrėžiamas didžiausias kelio nuožulnumas, kurį gali įveikti beпилotė transporto priemonė ir galutinai užbaigiamas bei patvirtinamas aplinkos taškų skirstymas į grupes [14].

Po segmentavimo visi žemės reljefo ir ant žemės paviršiaus esantys objektai, kurie sudaro taškų debesį (žr. 5 pav.) paverčiami į globalinę padėties nustatymo sistemą naudojant IMU-GPS (angl. *inertial measurement unit – global positioning system*) ir duomenys paruošiami tolimesniems apdorojimo etapams.



5 pav. Aplinkos taškų debesies kokybinis palyginimas: kairėje pusėje naudotas tik „fast ground segmentation“ skenavimas, o dešinėje pusėje pavaizduoti rezultatai, kai tyrime pritaikytas 3 pav. segmentavimo algoritmas (mėlyna spalva – vertikalios linijos, raudona spalva – horizontalios linijos) [14]

Eksperimento rezultatai parodė, kad siūlomas metodas pakankamai gerai atskiria žemės reljefą ir ant jo esančius objektus iš 3D taškų debesies. Pavyzdžiui, anksčiau siūlyta objektus rūšiuoti su kamera, bet tam reikia išlaikyti objektą vaizdo centre, dar pasiūlyta debesies duomenis padalyti į blokus ar

vokselius (pikslio analogas), tačiau toks procesas per ilgai užtrunka. Taip pat, geresni rezultatai taikant 3 pav. algoritmą akcentuojami tuo, kad horizontalia kryptimi lidariai pasižymi geresne skiriamąja geba, negu skenuojant vertikalia kryptimi. Vis dėlto, šis aplinkos duomenų vizualizavimo pateikimas dar nėra iki galo išstobulintas.

3. Autonominės transporto priemonės lokalizavimas

Kaip jau buvo minėta, IMU-GPS duomenys naudojami automobilio esamai vietai sekti, kartu sujungiant lidaro duomenis. Tačiau, realioje aplinkoje neįmanoma išlaikyti signalų stabilumo, nes įsimašo pašaliniai parazitiniai signalai. Tad yra taikomas Kalmano filtras (angl. *Kalman filter*) ir jo variacijos, kurios dažniausiai naudojamos apjungti GPS ir lidaro matavimus, slopinant pašalinius triukšmus bei didinant bendrą tikslumą [15].

Galima teigti, kad Kalmano filtras yra pasikartojantis procesas, susidedantis iš dviejų dalių: prognozavimo (eigos numatymas) ir atnaujinimo. Pirmajame etape prognozuojama nauja vertė nuo pradinės ir pagal sistemoje susidarančius pašalinių signalų triukšmus prognozuojamas neapibrėžtumas. Antrame etape turint išmatuotas bei numatytas vertes, randamas Kalmano stiprinimas (angl. *Kalman Gain*), kuris parodo ar išmatuota vertė yra artima tikrajai („Kalman Gain“ gali vyrauti nuo 0 iki 1). Remiantis stiprinimo reikšme, apskaičiuojama nauja vertė ir nauja neapibrėžtis, o tada šis atnaujinimo etapo rezultatas vėl grąžinamas į prognozavimo žingsnį. Procesas tęsiasi tol, kol skirtumas tarp numatytos ir išmatuotos verčių paprastai virsta nuliu. Dažnai Kalmano filtras taikomas naudojant tiesinius modelius su papildomais Gauso triukšmais (angl. *Gaussian noises*), o išplėstinis Kalmano filtras EKF (angl. *extended Kalman filter*) naudojamas netiesiniams uždaviniams, pavyzdžiui matuoti poslinkį ar navigacijai pagal reljefą [16]

Pagal Kalmano filtrą, linijinės dinaminės sistemos būseną x_k apibūdinama nuo laiko $k - 1$ iki laiko k :

$$x_k = Fx_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}. \quad (8)$$

Lygtyje (8) F yra būsenos perėjimo matrica, pritaikyta ankstesniam būsenos vektoriui x_{k-1} , B yra įvesties valdymo matrica, taikoma valdymo vektoriui u_{k-1} , o w_{k-1} yra proceso triukšmo vektorius, kuris laikomas Gauso nuliniu vidurkiu (angl. *zero-mean Gaussian*) su kovariacija Q , t. y. $w_{k-1} \sim N(0, Q)$ [17].

Proceso modelis suporuotas su matavimo modeliu, kuris apibūdina būsenos ir matavimo santykį dabartiniu laiko žingsniu k aprašomas pagal (9) formulę:

$$z_k = Hx_k + v_k; \quad (9)$$

čia z_k yra matavimo vektorius; H – matavimo matrica; v_k – matavimo triukšmo vektorius, kuris atitinka Gauso nulinį vidurkį su kovariacija R , t. y. $v_k \sim N(0, R)$ [17].

Kaip minėta, šio filtro paskirtis pateikti x_k įverčius laike k , atsižvelgiant į pradinę x_0 įvertį, matavimo seriją $z_1, z_2, z_3, \dots, z_k$ ir informaciją apie sistemą, kuri aprašoma matricomis F, B, H, Q ir R . Nors kovariacijos matricos turėtų atspindėti triukšmo statistiką, tikroji triukšmo statistika daugelyje praktinių atvejų gali būti nežinoma. Todėl, Q ir R dažnai naudojami kaip nustatomieji parametrai, kuriuos galima pakoreguoti norimam našumui pasiekti [17].

Išplėstinis Kalmano filtras EKF tinkamas netiesinėms dinaminėms sistemoms, kuriose negalima apibrėžti proceso ar matavimo modelio, padauginant vektorius ir matricas. Tad, EKF galima vertinti kaip netiesinę Kalmano filtro versiją. Būsenos perėjimo ir matavimo modeliai yra x_k bei z_k :

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1}; \quad (10)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k; \quad (11)$$

čia f yra ankstesnės būsenos x_{k-1} ir valdymo įvesties u_{k-1} funkcija, kuri pateikia esamą būseną x_k ; matavimo funkcija h , susiejanti esamą būseną x_k su matavimu z_k ; w_{k-1} ir v_k yra Gauso triukšmas procesui ir matavimo modeliams su kovariacija Q bei R [17].

Apibendrintos taikytinos formulės prognozavimui ir atnaujinimui pateiktos 1-oje lentelėje.

1 lentelė. Kalmano filtro ir EKF parametrai [17]

		Kalmano filtras	EKF (išplėstinis Kalmano filtras)
Prognozė	Numatomos būsenos apytikslis įvertinimas	$\hat{x}_k^- = F\hat{x}_{k-1}^+ + Bu_{k-1}$	$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1})$
	Prognozuojama klaidos kovariacija	$P_k^- = FP_{k-1}^+F^T + Q$	$P_k^- = F_{k-1}P_{k-1}^+F_{k-1}^T + Q$
Atnaujinimas	Liekamoji matavimo vertė	$\tilde{y}_k = z_k - H\hat{x}_k^-$	$\tilde{y}_k = z_k - h(\hat{x}_k^-)$
	Kalmano stiprinimas	$K_k = P_k^-H^T(R + HP_k^-H^T)^{-1}$	$K_k = P_k^-H_k^T(R + H_kP_k^-H_k^T)^{-1}$
	Atnaujintos būsenos apytikslis įvertinimas	$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k\tilde{y}$	$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k\tilde{y}$
	Atnaujinta klaidų kovariacija	$P_k^+ = (I - K_kH)P_k^-$	$P_k^+ = (I - K_kH_k)P_k^-$

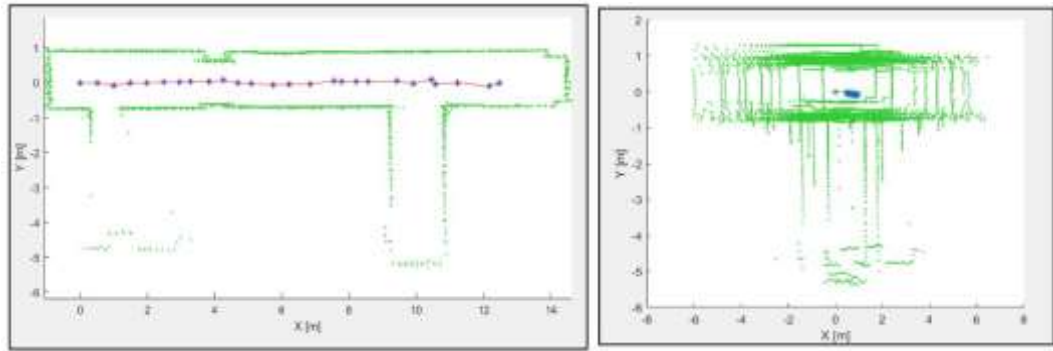
Taikant EKF, svarbu gauti kiekvieno modelio „Jacobian“ matricą, pirmos eilės dalinę vektoriaus funkcijos išvestinę kiekviename laiko žingsnyje:

$$F_{k-1} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}}; \quad (12)$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^+}; \quad (13)$$

čia F_{k-1} – būsenos perėjimo matrica laike $k-1$; H_k – matavimo matrica laike k . Virš simbolių rašomi ženklai – ir + atitinkamai žymi numatytą (ankstesnį) ir atnaujintą (tolesnį) įvertinimus. Kintamojo vertė žymima ženklu \wedge . Būsenos klaidos kovariacija ankstesniame ir tolimesniame įvertinime atitinkamai žymima P_k^- ir P_k^+ (žr. 1-ą lentelę). Pagrindinis skirtumas tarp EKF ir paprasto Kalmano filtro yra tas, kad EKF gauna numatytą būsenos įvertinimą ir nuspėjamą matavimą pagal netiesines funkcijas $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ ir $h(x_k)$.

Žemiau pateikiamas pavyzdys, kai įprastomis aplinkos sąlygomis buvo nustatomos vidinių patalpų ribos. Robotas, veikiantis pagal SLAM (angl. *simultaneous localization and mapping*) sistemą sudarė dvimatį žemėlapi su galimybe stebėti jo pačio buvimo vietą nežinomoje aplinkoje [18].



6 pav. Sugeneruotas nežinomos aplinkos žemėlapis, kai naudojamas Kalmano filtras (kairėje) ir jo netaikant (dešinėje) [18]

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, kad robotas judėjo teigiama X ašies kryptimi ir nepaisant gana didelių atstumų tarp registruotų buvimo vietų, Kalmano filtro taikymas padėjo pakankamai tiksliai atkurti patalpos žemėlapi, jos atstumus bei teisingai parodyti judėjimo trajektoriją. Kitu atveju, netaikant aptarto filtro, pateikiami rezultatai yra su didele neapibrėžtimi.

4. Lidaro klaidas įtakojantys veiksniai

Be objekto aptikimo ir vietos nustatymo, svarbu žinoti priimamų signalų neapdoravimo priežastis ir nepageidaujamų signalo triukšmų kilmes [19, 20]. Žemiau pateiktoje lentelėje aptariami 6 faktoriai, kurie dažnai daro įtaką grįžtančiajam signalui ir neigiamai paveikia gaunamus rezultatus. Atspindėti signalai gali būti nenuskaitomi, jei iškyla tam tikrų keblumų su jų apdoravimu ar užklumpa nenumatytos gamtinės aplinkybės, kurios gali sukelti nepageidaujamus efektus.

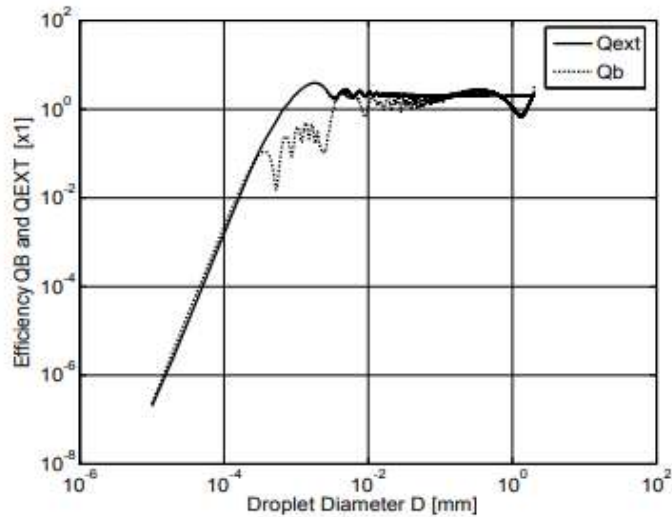
2 lentelė. Klaidų susidarymo priežastys [21]

1.	Klaidingas įvairių objektų (automobiliai, pėstieji ar kita infrastruktūra) aptikimas	Šiuo atveju išsklaidymo plokštuma (angl. <i>scattering plane</i>) beveik neturi gylio ar diapazono pasiskirstymo.
2.	Triukšmai optiniame mazge arba detektoriaus stiprintuve	Klaidingi objektų aptikimai gali atsirasti dėl pašalinių, nepageidaujamų signalų triukšmų. Jie gali būti pašalinami taikant nuolatinio klaidingo pavojaus dažnio (angl. <i>constant false alarm rate (CFAR)</i>) technikas taikinio detektoriuje. Kiti klaidingi aptikimai laikomi statistinio pobūdžio, kuriuos gali pašalinti pati objektų stebėjimo priemonė.
3.	Elektromagnetiniai trukdžiai	Elektromagnetiniai trukdžiai pasireiškia iš jutiklio vidaus arba išorės, pvz. maitinimo šaltinio šuoliai, lazerio diodų modulatoriaus perjungimas ir pan. Duomenų perdavimo linijos turi turėti tinkamą ekranavimą.
4.	Per aukštas signalo lygis imtuvo grandinėje	„Neapdorotas aptikimas“ gali atsirasti, dėl per aukšto signalo lygio imtuvo grandinėje. Tai nutinka, kai objektas geba atspindėti šviesą, o imtuvo stiprintuvo grandinės išėjime sugeneruojamas per aukšto lygio signalas. Norint sumažinti klaidingų aptikimų skaičių, stiprintuvo išėjime turi būti naudojama signalo diapazono valdymas arba išsiunčiamo signalo galios kontrolė.
5.	Žemės reljefo atspindžiai	Žemės atspindžiai fiksuojami, kai vyksta automobilio polinkiai dėl įvairių kelio nelygumų. Daugiaspinduliniai lidarų jutikliai geba lyginti skirtingus aptinkamus sluoksnius ir aptikti žemės paviršiaus atspindžius gana tiksliai. Nepatariama naudoti vieno spindulio jutiklio.
6.	Klaidingi aptikimai esant pakitusioms oro sąlygoms	Klaidingi objektų aptikimai gali atsirasti, dėl nepageidaujamų atspindžių esant lietai, rūkui, kelio dulkei ar snygiui.

Sistema turi gebėti atskirti skirtingų kūnų tipus, grupavimo algoritmas privalo atpažinti ir pateikti transporto priemonės vairuotojui vertingą informaciją, o nereikšmingos ir pasikartojančios klaidingos informacijos turi būti blokuojamos. Tačiau, sistemų trūkumai nėra išvengiami, ypač su sunkumais susiduriama atliekant erdvės skenavimą, kai aplinkos oro sąlygas įtakoja lietus, sniegas ar rūkas [22, 23].

4.1. Lietaus, rūko ir sniego parametrai, darantys įtaką lidaro veikimui

Tiek lietu, tiek rūką sudaro nedideli vandens lašeliai, tačiau tankus jų pasiskirstymas sudaro prasto matomumo sąlygas aplinkoje judančių kūnų nuskaitymui [24]. Atgalinė sklaida viename vandens lašelyje gali būti modeliuojama, kaip elektromagnetinės bangos išsklaidymas dielektrinėje sferoje, kurios skersmuo D ir lūžio rodiklis n_w , priklausantis nuo bangos ilgio. Tipiška šviesos lūžio rodiklio vertė vandens lašelyje yra $n_w = 1,323520 + j5,150 \cdot 10^{-7}$, kai $\lambda = 905$ nm. Vandens lašelio užmirimo efektyvumas (angl. *extinction efficiency*) $Q_{EXT}(D)$ ir atgalinės sklaidos efektyvumas (angl. *backscattering efficiency*) $Q_B(D)$ apskaičiuojami remiantis Lorencio Mi sklaidos teorija (angl. *Mie scattering*), kuri apibūdinta Craig F. Bohren ir Donald R. Huffman (1983 m.). Užmirimo ir atgalinės sklaidos funkcijų grafikai pateikti 7-ame paveikslėlyje.



7 pav. Užmirimo Q_{EXT} ir atgalinės sklaidos Q_B efektyvumų funkcinės priklausomybės nuo vandens lašelio skersmens D , kai $\lambda = 905$ nm [21]

Lietaus ir rūko modeliavimui gali būti naudojamas statistinis vandens lašelių, turinčių skirtingą diametrą D , pasiskirstymas. Tariaama, kad tikimybė lidaro lazeriniam siūstuvui pataikyti į D skersmens lašelį yra $N(D)$. Darant prielaidą, kad yra tik vienas, neelastingas išsklaidymas, t. y. vandens lašelių išsklaidyta šviesa nėra išsklaidoma kitu lašeliu ir jokia energija nėra paverčiama kitu bangos ilgiu. Signalo silpninimas atmosferoje arba užmirimo koeficientas α ir atgalinės sklaidos koeficientas β gali būti išreiškiami:

$$\alpha = \frac{\pi}{8} \cdot \int_{D=0}^{\infty} D^2 Q_{EXT}(D) \cdot N(D) dD ; \quad (14)$$

$$\beta = \frac{\pi}{8} \cdot \int_{D=0}^{\infty} D^2 Q_B(D) \cdot N(D) dD ; \quad (15)$$

čia D – lašelio diametras [mm]; $N(D)$ – tikimybė pataikyti į vandens lašą, kurio skersmuo D .

Pagal D. Deirmendjian (1969 m.) modelį lietaus lašelių pasiskirstymas $N(D)$ apibūdinamas keturiais parametrais: α , γ , ρ ir r_c [25]:

$$N(D) = \frac{\gamma \rho b^{\frac{\alpha+1}{\gamma}}}{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right)} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^{\alpha} \cdot e^{-b \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^{\gamma}}; \quad (16)$$

$$r_c = \left(\frac{\alpha}{\gamma b}\right)^{\frac{1}{\gamma}}; \quad (17)$$

kur b yra lygus:

$$b = \frac{\alpha}{\gamma \cdot \left(\frac{D_c}{2}\right)^{\gamma}}; \quad (18)$$

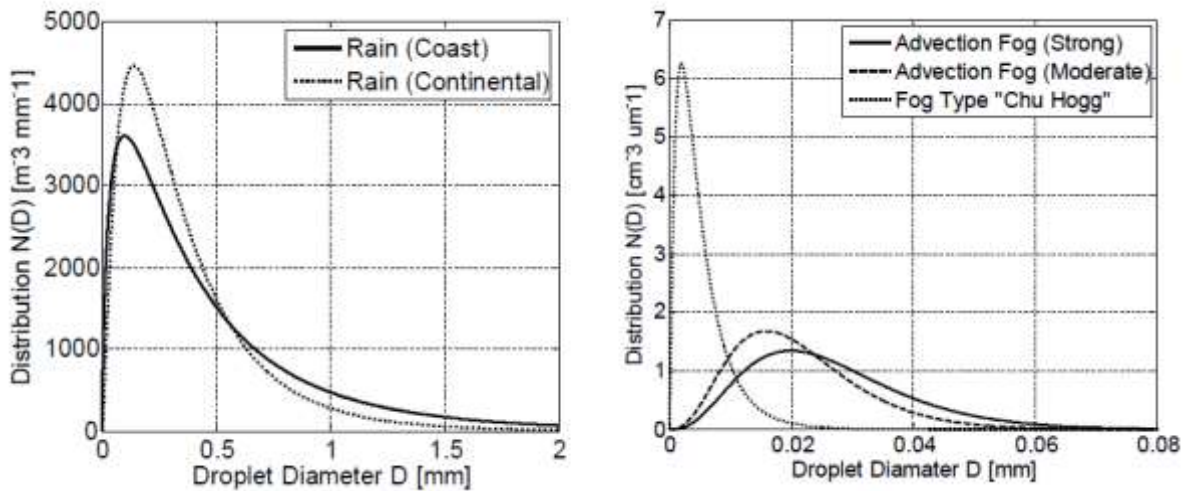
čia Γ – „Gama“ funkcija; D_c – lašelio skersmuo, turintis didžiausią tikimybę, r_c – pasiskirstymo režimo spindulys, [mm].

Pasiskirstymo funkcija (17) modifikuota, remiantis „Gama“ pasiskirstymu. Tad, lygtis supaprastėja iki įprastinio „Gama“ pasiskirstymo, kai $\gamma = 1$. Modifikuotą „Gama“ pasiskirstymo formą lemia b ir α , kurios vadinamos atitinkamai nuolydžio ir formos parametrais. Tad, žinant vandens lašelių dydžių pasiskirstymą aplinkoje, esant lietui ar rūkui bei turint charakteringuosius parametrus (pateikta 3-ioje lentelėje), galima įvertinti signalo užmirimo ir atgalinės sklaidos koeficientus.

3 lentelė. Lietaus ir rūko parametrai [21]

Oro sąlygos	ρ [m ⁻³]	α	γ	r_c [mm]
Lietus (pakrantėse)	1000	1	0,5	0,05
Lietus (žemyninėje dalyje)	1000	2	0,5	0,07
Migla (pakrantėse)	100	1	0,5	0,05
Migla (žemyninėje dalyje)	100	2	0,5	0,07
Labai tirštas rūkas	20	3	1	10
Vidutiniškai tirštas rūkas	20	3	1	8
Stipri dulksna	100	6	1	4
Vidutiniška dulksna	100	6	1	2

Grafiškai apipavidalintas teorinis vandens lašelių pasiskirstymas atmosferoje esant tam tikroms oro sąlygoms pateiktas 8-ame paveikslėlyje.



8 pav. Lietaus lašelių pasiskirstymas $N(D)$, pagal D. Deirmendjian modifikuotą „Gama“ funkciją [21]

Žinoma, kad sniegės sudarytos iš ledo kristalų, o tankis svyruoja ties intervalu $0,005 \div 0,5 \text{ g/cm}^3$, priklausomai nuo temperatūros ir kitų sąlygų. Sniegės dydžio pasiskirstymas gali būti išreiškiamas:

$$N(D) = N_0 \cdot e^{-AD} . \quad (19)$$

Lygties (19) parametrai priklauso nuo iškrentančio kritulių kiekio per valandą (R_p [mm/h]). Šio pasiskirstymo parametrai pateikti 4-oje lentelėje, kuriuos nustatė skirtingi autoriai.

4 lentelė. Snaigių parametrai [21]

Autorius (šaltinis)	N_0	A
„Gunn et al. (Gunn and Marshall (1975 m.))“	$7,6 \cdot 10^3 \cdot R^{-0,87}$	$2,55 \cdot R^{-0,48}$
„Sekhon et al. (Sekhon and Srivastava (1970 m.))“	$5 \cdot 10^3 \cdot R^{-0,94}$	$2,29 \cdot R^{-0,45}$

Užmirimo koeficientas snygio sąlygomis įvertinamas apytiksliai, pagal snaigių būsenas – sausos ar šlapios, kurios priklauso nuo temperatūros.

$$\alpha_{\text{Sniegas sausas}} \approx 15 \text{ h mm}^{-1} \text{ dB km}^{-1} R_p + 1 \text{ dB km}^{-1}; \quad (20)$$

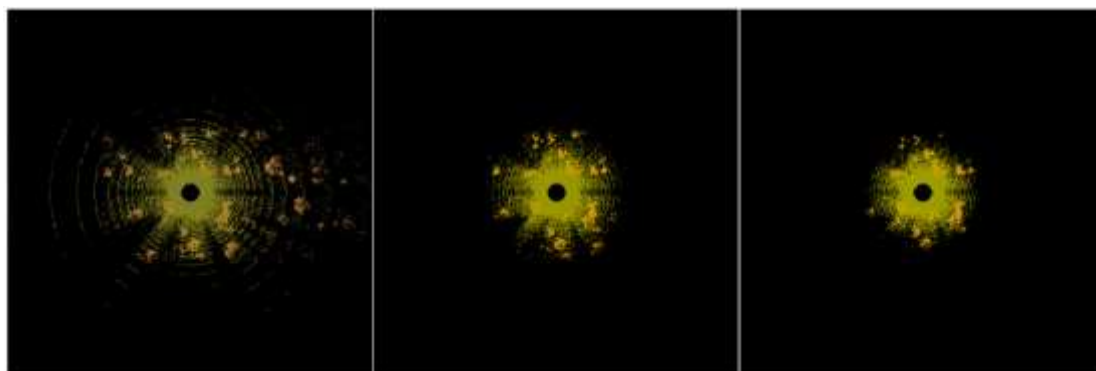
$$\alpha_{\text{Sniegas šlapias}} \approx 2 \text{ h mm}^{-1} \text{ dB km}^{-1} R_p + 0,1 \text{ dB km}^{-1}. \quad (21)$$

4.2. Lietaus daroma įtaka antžeminei LiDAR sistemai pavyzdys

Viena kebliausių problemų yra ta, kad daugelio autonominių automobilių aplinkos suvokimo sistemų darbo našumas bei tikslumas sumažėja esant nepalankioms oro sąlygoms, pavyzdžiui lietui. Pagrindiniai techniniai iššūkiai iškyla su lidaro veikimu [26, 27, 28]. Kaip jau buvo minėta, atmosferoje vyraujant tankiai pasiskirsčiusiems vandens lašeliams, šio įrenginio siunčiami signalai yra slopinami ir negali skliti dideliais atstumais. Eksperimentinę kompiuterinę simuliaciją atliko mokslininkai, naudojant Misisipės valstijos universiteto autonominių transporto priemonių simulatorių MAVS (angl. *Mississippi Autonomous Vehicle Simulator*). Naudojantis modeliavimo sistema buvo sukurta aplinka su įvairiomis kliūtimis, imituotas „Velodyne VLP-16“ bei parenkamas lietaus intensyvumas. Simuliuojant pastebėta, kad kūnų paviršių atspindžių savybės irgi turi įtakos

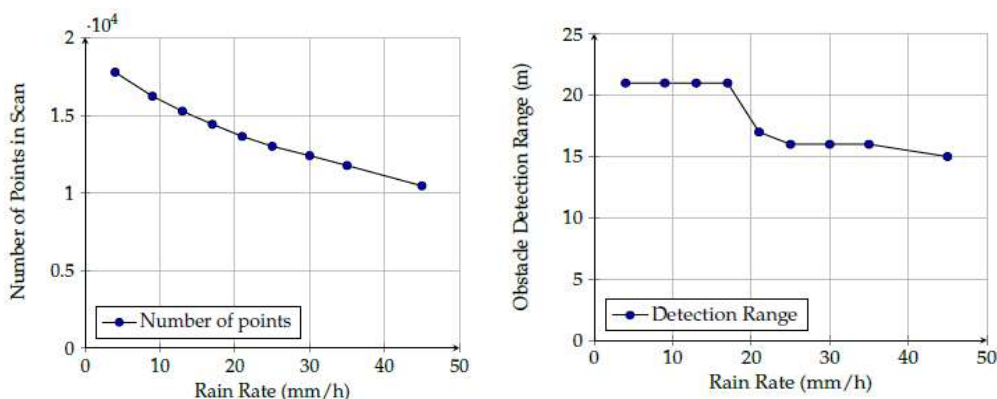
gaunamiems rezultatams. Programoje buvo naudojama ODOA (angl. *obstacle detection and avoidance*) algoritmai, kurie taikomi dabartinių automobilių sistemos ADAS (angl. *advanced driver-assistance systems*) saugumo funkcijose. Ši saugaus vairavimo sistema automatizuoja transporto priemonę, užtikrina saugumą ir sumažina avaringų situacijų tikimybę.

Didėjant lietaus kiekiui per valandą, nuskaitytų taškų skaičius mažėja atlikus vieno skenavimo ciklą. Galima matyti 9-ame paveikslėlyje, kur aprėpiamas diapazonas nuosekliai mažėja lietai intensyvėjant ir sudaromas taškų debesies žemėlapis yra stipriai paveikiamas.



9 pav. Diapazono mažėjimas didėjant kritulių intensyvumui: kairėje 0 mm/h, viduryje 9 mm/h, dešinėje 17 mm/h [29]

Tyrėjai pastebėjo, kad lidarui „Velodyne VLP-16“ stipraus poveikio kliūtis aptikimo diapazonui nebuvo esant iki 17 mm/h lietaus intensyvumui. Už šios ribos, maksimalus aptinkamas atstumas sumažėja 5 – 6 metrais.



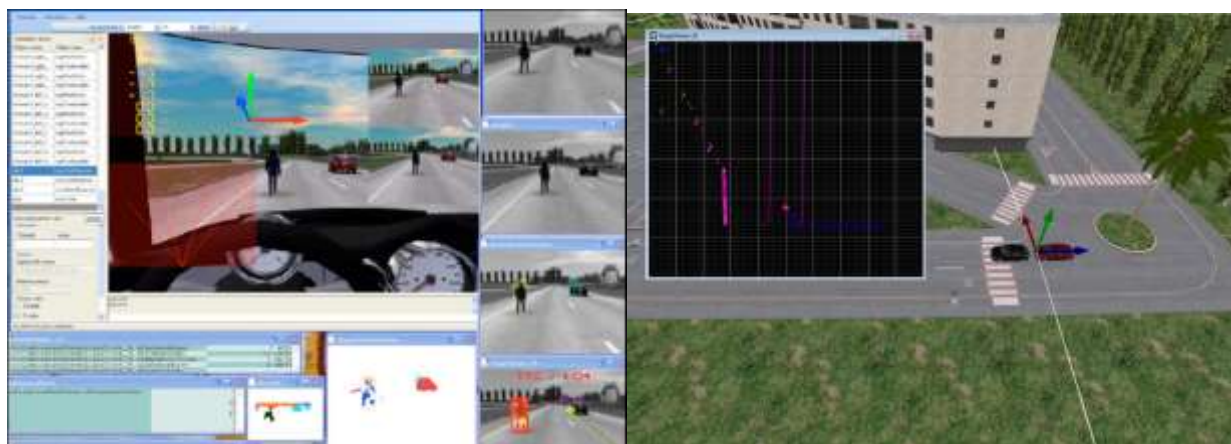
10 pav. Nuskaitytų taškų skaičius (kairėje) ir pasirinkto objekto nuotolio aptikimas (dešinėje) per vieną skenavimo ciklą esant skirtingiems lietaus intensyvumams [29]

Akivaizdu, kad dėl didėjančio lietaus intensyvumo nuskaitytų taškų skaičius mažėja, o tai neigiamai paveikia sudaromą aplinkos taškų debesį. Tačiau, intensyvėjant lietai nuo 20 iki 45 mm/h „Velodyne VLP-16“ aptinkamo diapazono kritimas nebuvo itin drastiškai mažėjantis.

5. Lazerio spindulio atsispindėjimo nuo įvairių objektų įvertinimas

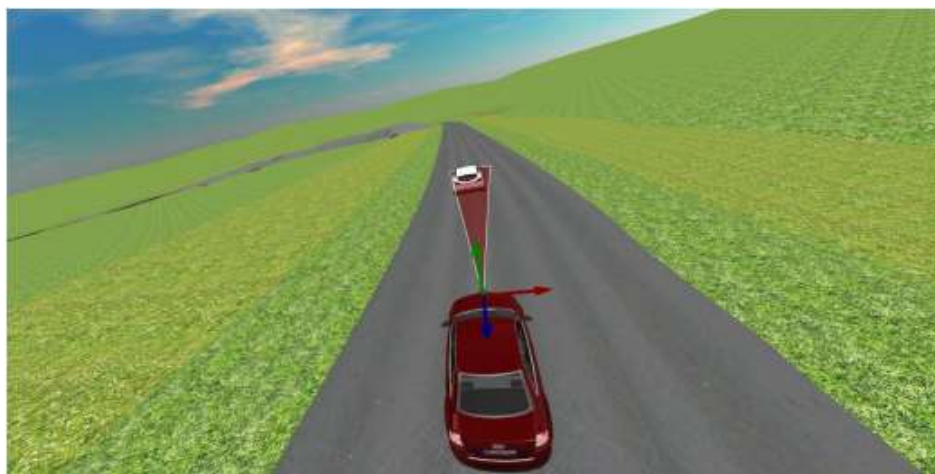
Galima teigti, kad mus supančią aplinką sudaro įvairios geometrijos objektai, kurie sudaryti iš skirtingų paviršių bei specifinių medžiagų. Pavyzdžiui automobilį sudaro metalinis kėbulas,

plastmasiniai buferiai, stikliniai langai ir kt. Žinoma, kad skirtingos medžiagos atspindės lazerio spindulį su skirtingu intensyvumu [30]. Naudojant „Pro-SiVIC“ programą, skirtą simuliuoti įvairių autonominių automobilių suvokimo sistemų ir jutiklių eksploatacines savybes virtualioje aplinkoje, galima įvertinti bei ištestuoti lazerinio spindulio tikėtinus atspindžių intensyvumus realybėje. Be to, virtualus automobilis su sumontuotais jutikliais ir imituotomis ADAS funkcijomis išbandomas kartu su virtualaus vairuotojo modeliavimo modeliu „COSMODRIVE“, siekiant įvertinti galimus vairuotojo suvokimus ir veiksmų vykdymą vairuojant automobilį (žr. 11 pav.).



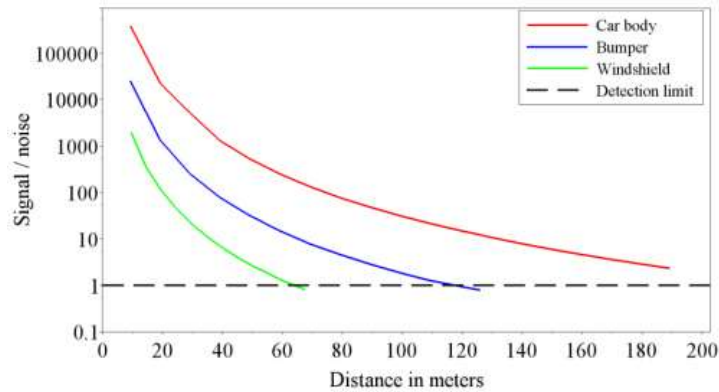
11 pav. Virtualių jutiklių modeliavimas su „Pro-SiVIC“ pavyzdžiai [31, 32]

Tyrėjai Hadj-Bachir bei Philippe de Souza atliko eksperimentą su programa „Pro-SiVIC“ (žr. 12 pav.), imituojant įprastas oro sąlygas ir naudojant lazerio spindulį su tokiais parametrais: bangos ilgis $\lambda = 905 \text{ nm}$, impulso energija $1,6 \mu\text{J}$, impulso trukmė 16 ns , divergencija $0,07^\circ$.



12 pav. Lidaro lazerio spindulio atspindėjimo simuliacija programa „Pro-SiVIC“ [33]

Gauti rezultatai rodo, kaip santykis signalas / triukšmas (angl. *SNR – signal-to-noise ratio*) kinta priklausomai nuo atstumo tarp jutiklio ir automobilio. Žemiau pateiktos atitinkamos spalvos kreivės rodo signalo kokybės kitimą atsispindėjus nuo įvairių paviršių: raudona nuo automobilio kėbulo, mėlyna nuo automobilio galinio buferio ir žalia nuo galinio lango stiklo. Punktyrinė kreivė žymi aptikimo ribą.

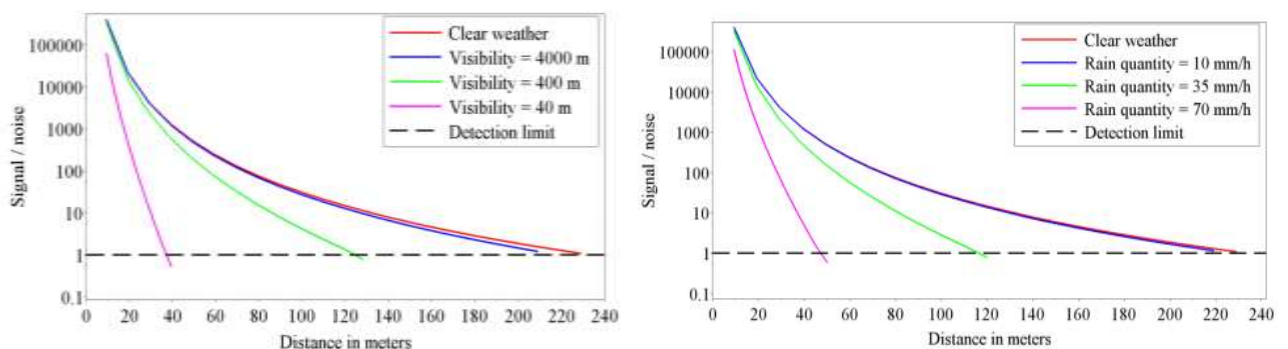


13 pav. Santykio signalas / triukšmas kitimas priklausomai nuo atstumo tarp lidaro ir konkrečios automobilio išorinės vietos [33]

Pastebėtina, kad santykio SNR vertės yra didesnės, kai signalas atsispindi nuo automobilio kėbulo. Tai paaiškinama dėl metalinių paviršių savybės, nes tokios vietos gali atspindėti didesniu intensyvumu, nei plastikas ar pusiau skaidrūs kūnai. Signalo intensyvumas kintant atstumui mažėja pagal Lamberto šviesos sugerties dėsnį. Taip pat, dėl objektų su geromis atspindžio savybėmis (pvz. metaliniai paviršiai), lidaro imtuvas gali fiksuoti grįžtantį signalą dideliu atstumu (< 190 m). Aptikimo diapazonas gali būti praplečiamas, kai lazerio galia padidinama arba sumažinama spindulio divergencija.

Apibendrinant kompiuterinės simuliacijos rezultatus, galima teigti, kad įprastinėmis oro sąlygomis didesniu, kaip 100 metrų atstumu aptinkami objektai su plokščiais metaliniais paviršiais: sunkvežimiai, lengvieji automobiliai ir kelio ženklai. Motociklams ir pėstiesiems maksimalus aptikimo diapazonas yra mažesnis, nes metalinių paviršių yra mažiau arba jų visai nėra.

Žemiau pateikiama virtualaus lazerinio tolimačio signalo kokybė (vertinamas SNR), kai spindulys fokusuojamas į automobilio kėbulą, parinkus tam tikrą matomumo lygį ir kritulių kiekį. Pastebėtina, kad esant didesniam matomumui, dalelės atmosferoje išsidėsčiusios rečiau ir signalas eksponentiškai slopsta tik dėl didėjančio atstumo tarp lidaro ir automobilio. Tai rodo 14 pav. mėlyna ir raudona kreivės. Esant tankiam vandens dalelių pasiskirstymui atmosferoje, signalo amplitudė greitai krenta, o aptinkamo atstumo intervalas sumažėja kelis kartus, tai simbolizuoja rožinės spalvos kreivė. Taigi, vyraujant prastam matomumui, gali kilti sunkumų, siekiant išlaikyti saugų atstumą tarp automobilių, sunku būtų suvaldyti situaciją, jei priešpriešais važiuojanti transporto priemonė staiga stabdytų [33].



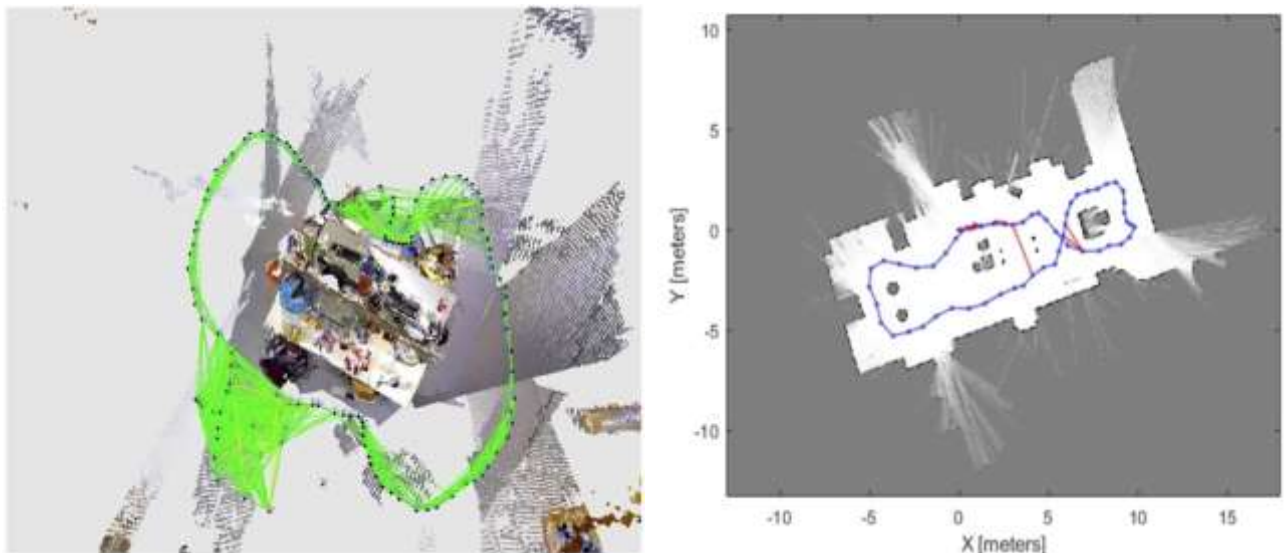
14 pav. Objektų aptikimo ir matymo kokybė skirtingais atstumais keičiantis matomumui rūko sąlygomis (kairėje) ir kritulių kiekiui (dešinėje) [33]

Pasak tyrėjų, nėra lengva tiksliai valdyti lidaro veikimą rūko ir lietaus sąlygomis, nes tokių oro sąlygų intensyvumas yra nekontroliuojamas ir vietomis nenuspėjamas. Vyraujant rūkui ir lietui, lazerio spindulio intensyvumas mažėja, nes jis absorbuojamas ir pasireiškia difuzijos reiškinys, esant vandens lašeliams aplinkoje. Taip pat, šios oro sąlygos veikia kaip šalutinis ekranas lidaro jutikliams, nes apribojamos veikimo galimybės ir kliūčių aptikimo diapazonas. Tokios oro sąlygos kelia didžiulius iššūkius, nes atsižvelgiant į aplinkos jutiklių parodymus autonominė sistema privalo tinkamai parinkti saugų transporto priemonės greitį, optimaliai valdyti stabdymo kelią ir užtikrinti kontrolę stabilumui.

6. SLAM ir ROS operacinės sistemos taikymas

SLAM (angl. *simultaneous localization and mapping*) – tai yra sinchroninis pozicijos ir aplinkos žemėlapis. Kitaip tariant, tai galima pavadinti kaip vienu metu vykstanti lokalizavimo ir kartografavimo funkcija, kuri padeda iširti bei suvokti aplinką, atvaizduojant žemėlapi su supančiais objektais, kartu įtraukiant judančios bepilotės transporto priemonės poziciją. Šiuo metu SLAM algoritmas plačiai naudojamas autonominėse transporto priemonėse ar robotuose, kur svarbus nežinomos aplinkos atvaizdavimas. Taip pat, SLAM žemėlapius galima naudoti tokioms užduotims, kaip kelio planavimui, kliūčių išvengimui [34].

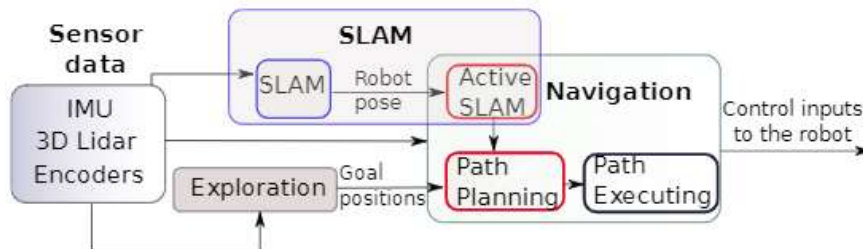
Įprastai SLAM sistemos naudoja prietaisus, skirtus kaupti matomus duomenis (fotoaparatai) arba skirtus registruoti „nematomiems“ duomenims (radarai, lidarai, sonarai) su kūno vietos fiksavimu. Visi šie duomenys surenkami naudojant inercijos jutiklių bloką IMU (angl. *Inertial Measurement Unit*). Jutikliai renka duomenis, kuriais remiantis yra sukuriamas supančios aplinkos vaizdas ir realiu laiku įvertinama padėtis. Tad, pagal naudojamus prietaisus, lokalizavimo ir kartografavimo funkcijos skirstomos į šias grupes: vizualinę (angl. *Visual SLAM*) ir lidarinę (angl. *LiDAR SLAM*) [35].



15 pav. „Visual SLAM“ bei „LiDAR SLAM“ aplinkos žemėlapiai naudojant RGB-D kamerą (kairėje) ir dvimatį lidarą (dešinėje) [35]

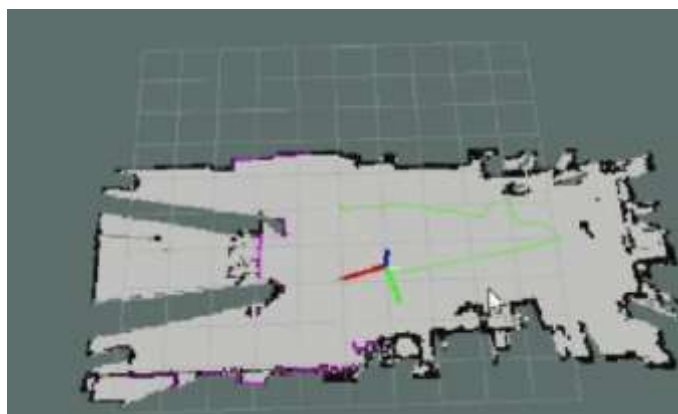
Vizualinis SLAM diegimas yra nebrangus, nes taikomos kameros nebūtinai turi pasižymėti pažangiaisiais parametrais. Dažnai taikomos 360° kampo panoraminės ar RGB-D kameros. Tačiau, ši įranga tikslumu nusileidžia „LiDAR SLAM“ taikomoms lazerinėms sistemoms. Būtent dėl didelio tikslumo, lidarai naudojami dideliu greičiu važiuojančiose savaeigėse transporto priemonėse ar

dronuose. Pastarasis metodas sudaro užimto tinklelio žemėlapi (angl. *occupancy grid map*), kuris yra parengiamas kelio planavimui ir navigavimo valdymui, o sukuriamas dvimatis žemėlapis atvaizduoja kliūtis plokštumoje. Tipinė kelio planavimo ir judėjimo sistemos blokinės schemos pavyzdys pateiktas žemiau.



16 pav. Autonominio roboto navigavimo blokinė schema paremta SLAM funkcija [36]

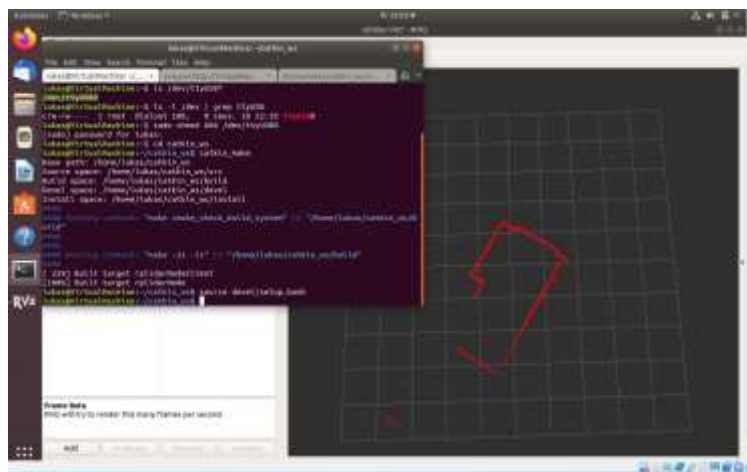
Remiantis jutiklio duomenimis (žr. 16 pav.), SLAM modulis sukuria žemėlapi ir lokalizuoja transporto priemonę žemėlapyje, o tyrimo modulis (16 pav. pažymėta „Exploration“) apskaičiuoja kitą tikslo vietą (skirstomos žinomos ir nežinomos aplinkos vietos). Pats SLAM modulis sudarytas iš dviejų posistemių, kuri viena suteikia pozą žemėlapyje, o antra (pažymėta „Active SLAM“) suteikia atskirą taškų rinkinį į kuriuos eksperimentinis robotas turi nuvykti, siekiant sumažinti lokalizacijos neapibrėžtumą. Navigacijos modulis sukuria trajektorijas atsižvelgiant į SLAM reikalaujamus lokalizacijos taškus, o procesas vyksta nuolatos, kol sistema pasiekia savo tikslą – randa bei nuvažiuoja iki tam tikro aplinkos taško ir tai kartoja su kitu aplinkos tašku. „Active SLAM“ irgi laikomas navigacijos modulio dalimi, nes gali nukreipti robotą keliu į pageidaujamą zoną. Navigacijos modulio išvesties signalas apskaičiuojamas kelio vykdymo modulio (pažymėta „Path Executing“) pagalba, kuris išduoda judėjimo komandas (linijinis, kampinis greitis) nurodytam keliui [36]. Lidaro skenavimo SLAM metodu sukurto dvimačio žemėlapio pavyzdys, naudojant ROS operacinę sistemą, parodytas 17 pav.



17 pav. Sugeneruotas aplinkos žemėlapis atvaizduotas ROS aplinkoje, naudojant atviro kodo „Hector SLAM“ programinį paketą [37]

Iš pateikto 17 pav. galima matyti judėjimo trajektoriją, kuri pažymėta žalios spalvos kreive, o judantis kūnas aplinkoje pažymėtas X , Y ir Z ašių kryptimis (raudona, žalia ir mėlyna spalva). Šviesiai pilka spalva žymima aiški teritorija, juoda spalva rodo įvairias aptiktas kliūtis ar sienas. Tamsiai pilkai pažymėtas laukas traktuojamas kaip neaptiktos vietos.

Siekiant gauti iš lidaro sistemos generuojamus duomenis ir juos apdoroti, galima naudoti ROS (angl. *Robot Operating System*) robotikos operacines programines sistemas. ROS yra skirtas atlikti darbus su įvairia robotikos įranga, naudojant atvirojo kodo programinius rinkinius, bibliotekas [38]. Šiuo metu ROS programinė įranga pilnai veikia su „Mac OS X“, „Fedora“, „Gentoo“, „Linux“ bei „Ubuntu“ operacinėmis platformomis. Pastaroji operacinė sistema priklauso „Linux“ šeimai. Būtent naudojant ROS galima atlikti įvairius eksperimentinius tyrimus su LiDAR sistemomis. Pavyzdžiui susimuliuoti dvimatį aplinkos vaizdą, realiu laiku fiksuoti aplink esančius objektus, kurti aplinkos žemėlapius SLAM metodu (žr. 17 pav.), nuskaityti ir sukurti trimatį aplinkos vaizdą. Visą tai galima sukurti naudojant specialias programines bibliotekas [39]. Žinoma, atlikti eksperimentinius darbus galima ir su kitais autonominio automobilio įrenginiais – radarais, kameromis, ultragarsiniais jutikliais ir kt.



18 pav. ROS operacinėje platformoje „Ubuntu“ sugeneruotas aplinkos 2D taškų debesis naudojant lidarą

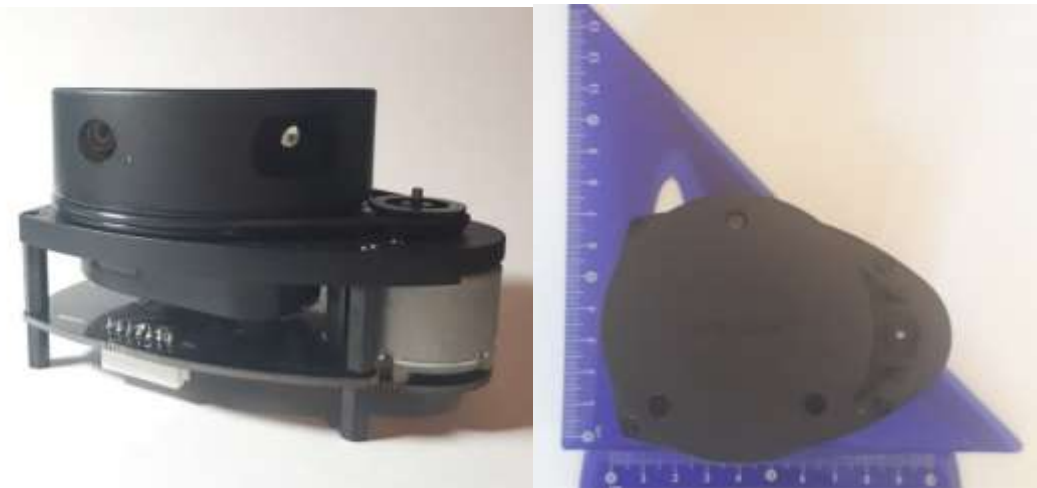
Naudojant operacinę platformą „Ubuntu 18.04.5“ ir lidarą (ar kažkokį kitą įrenginį), pirmiausia reikia įrašyti visas reikalingas tvarkykles, kad naudojamo prietaiso duomenų perdavimo adapteris sklandžiai komunikotų su ROS programomis. Tai atlikus, galima pradėti reikiamas simuliacijas, naudojant tam tikras komandas programos „Terminal“ lange. Pateiktame pavyzdyje, 18-ame paveikslėlyje matyti sugeneruotas aplinkos dvimatis žemėlapis – 2D taškų debesis. Paveikslėlyje parodyta, kaip yra atvaizduojama lidarą supanti aplinka. Nuskenuota aplinka pateikiama vaizdu iš viršaus, o lazerio spindulio užfiksuotų objektų ribos programoje piešiami raudona spalva.

7. Tyrimo metodika

Tyrimų dalyje bus naudojamas suprojektuotas „Slamtec RoboPeak A1M8“ lidaro valdymo ir duomenų apdorojimo stendas. Stende naudojamas mikroprocesorinis valdymas ir sąsają su kompiuteriu duomenų siuntimui. Gaunami duomenys apdorojami kompiuterinėmis programomis, o dominantys rezultatai pateikiami grafiškai. Taigi, žinant lazerio parametrus bus atliekamas aplinkos skenavimas. Eksperimentai atliekami kelis kartus prie fiksuotų atstumų. Tokio tyrimo metodika bus siekiama atkurti autonominės transporto priemonės jutiklio – lidaro valdymo sistemos darbą bei įvertinti įrenginio funkcionavimą.

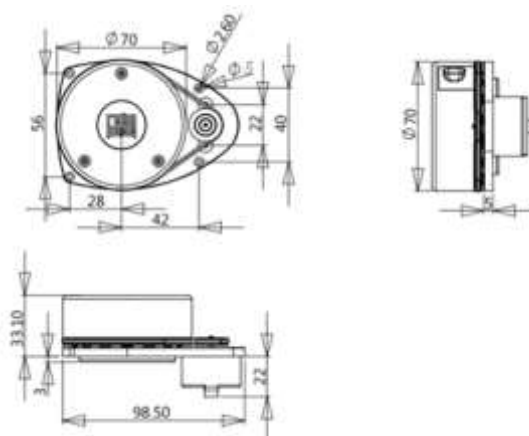
7.1. Eksperimentams pasirinktas naudoti lidaras

Šiame darbe eksperimentiniams tyrimams pasirinktas „Slamtec“ gamintojo siūlomas mažos galios lazerinis tolimatis „RoboPeak A1M8“. Šio įrenginio sistema gali atlikti aplinkos nuskaitymą 360° kampu 12-os metrų diapazone, o standartiškai skenavimo dažnis siekia 5,5 Hz. Šis įrenginys pagrįstas lazerio trianguliacijos diapazono veikimo principu – kai lazerio spindulys atsimušęs į objektą atsispindi atgal į imtuvo jutiklį (paaiškinta skyrelyje: *LiDAR matematinis modelis*). Šviesos šaltiniu naudojamas mažos galios (< 5 mW) infraraudonųjų spindulių lazeris, kuris valdomas moduluotais impulsais. Taip pat, šis modelis turi integruotą didelės greitaveikos aplinkos vaizdo įgijimo ir apdorojimo aparatūrą. Sistema kas sekundę gali matuoti 2000 kartų, o apdorojus matavimo duomenis sukuria dvimatį taškų žemėlapi. Lazerinio skaitytuvo dažnis automatiškai sureguliuojamas pagal variklio greitį. „RoboPeak A1M8“ skiriamoji geba gali siekti apie 1 %. Aplinkos skenavimo blokas sujungtas dirželiu su mažos galios elektrinio variklio skriemuliu [40]. Toliau pateiktos turimo įrenginio fotografijos.



19 pav. Lidaras „Slamtec RoboPeak A1M8“

Įrenginys turi platformą, kuri skiria skenavimo bloką ir duomenų priėmimo bei apdorojimo sistemą. Komunikacijai su kompiuteriu naudojamas USB nuoseklus keitiklis. Žemiau pateikiami „RoboPeak A1“ komplektacijos matmenys.



20 pav. „RoboPeak A1“ komplektacijos brėžinys [40]

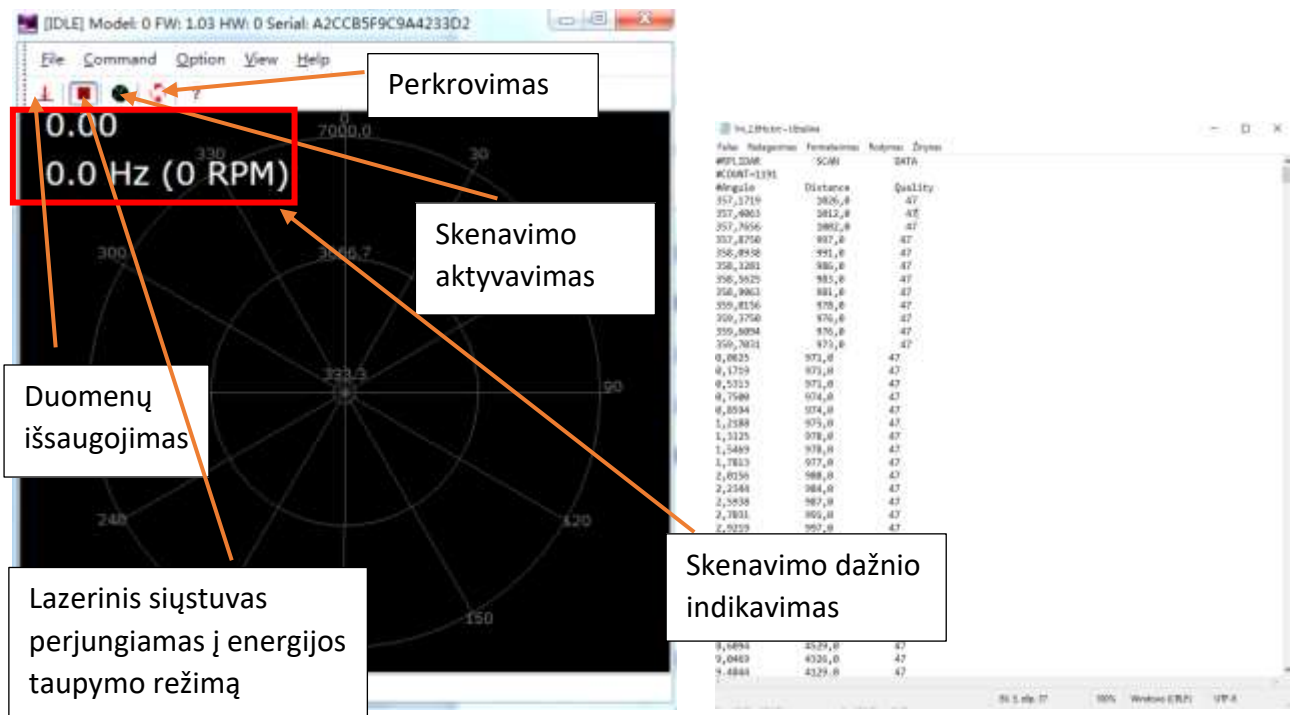
Įrenginys turi šias optines savybes (žr. 5-ą lentelę): bangos ilgis $\lambda = 795 \text{ nm}$, lazerio galia $P = 5 \text{ mW}$, impulso trukmė $300 \text{ }\mu\text{s}$. Dirbant lauko sąlygomis, gamintojas rekomenduoja vengti vietų, kurias gali pasiekti intensyvi saulės spinduliuotė.

5 lentelė. „Slamtec RoboPeak A1M8“ pagrindiniai techniniai parametrai [41]

Maitinimo įtampa	5 VDC
Maksimalus srovės suvartojimas	600 mA
Lazerio bangos ilgis	795 nm
Maksimali lazerio galia	5 mW
Aptinkamas atstumas	0,2 ~ 12 m
Atstumo rezoliucija	1% nuo atstumo
Kampinis diapazonas	360°
Kampo rezoliucija	<1°
Skenavimo dažnis	1÷10 Hz

Tad, naudojant aptartą lazerinį tolimatį, jis bus taikomas į projektuojamą lidaro įrenginio duomenų apdorojimo bloką / stendą, kuriuo naudojantis bus siekiama atlikti tyrimą prie tam tikrų imituojamų oro sąlygų, kintant objekto atstumui.

Skenuojamos aplinkos žemėlapiu gavimui yra naudojama programa „RP-LiDAR Frame Grabber“. Jos langas ir pagrindinės funkcijos parodytos toliau (žr. 21 pav.).



21 pav. „RP-LiDAR Frame Grabber“ programinis langas ir duomenų failo pavyzdys [42]

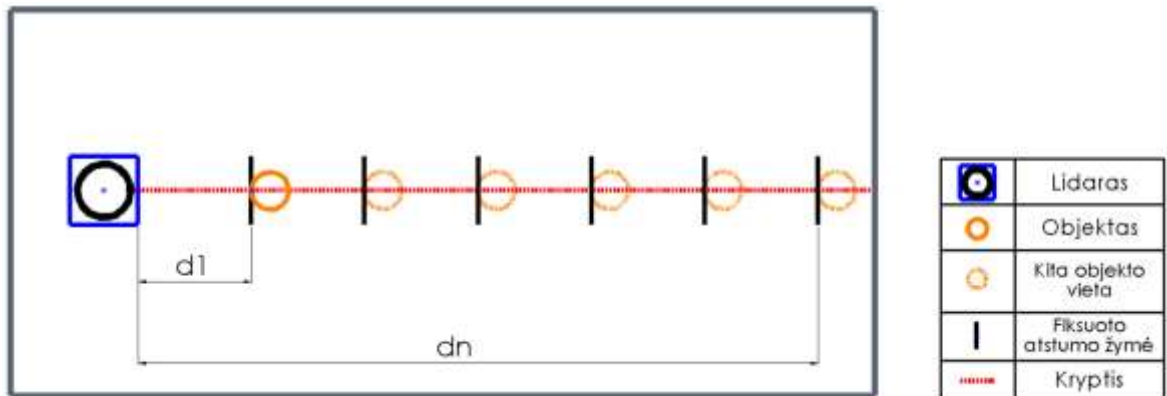
Programoje lokalinio žemėlapiu rezultatai pateikiami polinėje koordinatinių sistemoje. Išsaugant duomenis sukuriama failas, kuriame yra patalpinamos kampo, atstumo ir kokybės vertės. Failas gali būti atidaromas „Microsoft Excel“ programa.

7.2. Eksperimentų scenarijai

Eksperimentai (Nr. 1 ir Nr. 2) atliekami skenuojant objektą skirtingais dažniais ir išsaugant aplinkos žemėlapiu duomenis kompiuteryje naudojantis „RP-LiDAR Frame Grabber“ programa. Baigus skenavimą prie vieno atstumo d_1 , objektas perkliamas tolyn ir matavimai yra kartojami. Tokiu būdu atliekami matavimai kas 1 metrą iki ribinio atstumo d_n , kur lidaras silpniausiai fiksuos matuojamą objektą.

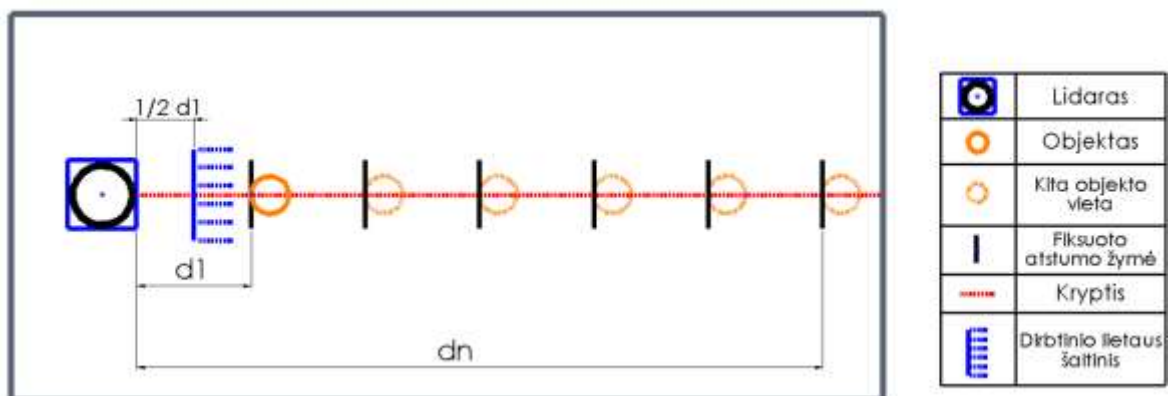
Eksperimento (Nr. 1 ir Nr. 2) scenarijai:

- Lidaro sukimosi dažnis: 2; 2,6; 3,5; 4,3; 5,5; 7 Hz.
- Atstumai: 1 ÷ 6 m, kas 1 m.
- Matuojamas objektas – nejudantis kamuolys
- Matavimo aplinka – giedras oras ir lietus.



22 pav. Tyrimo Nr. 1 scenarijus prie įprastų oro sąlygų

Pirmasis eksperimentas vykdomas prie įprastų oro sąlygų (žr. 22 pav.), o antrasis atliekamas sukeliant dirbtinį lietų tarp lidaro siūstuvo ir objekto (žr. 23 pav.).



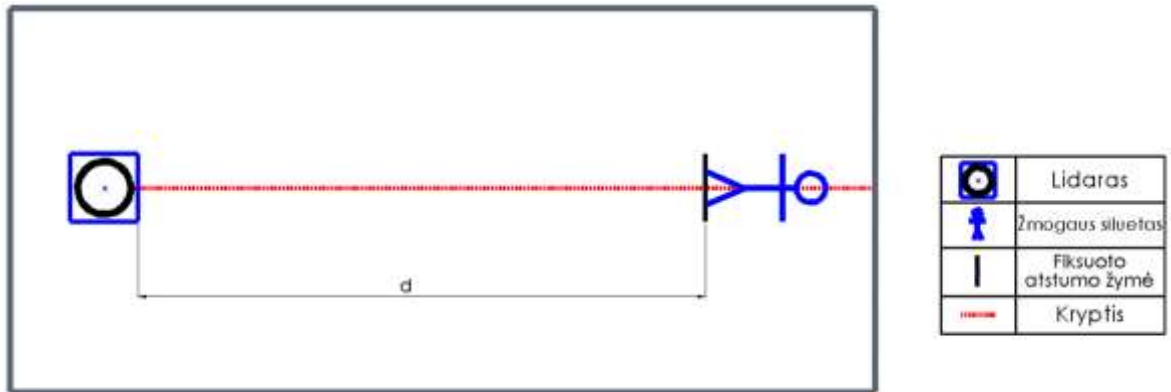
23 pav. Tyrimo Nr. 2 scenarijus inicijuojant dirbtinį lietų

Trečiasis eksperimentas vykdomas kuriant 3D aplinkos vaizdus. Pirmajame šio eksperimento etape atliekamas skenavimas prie gerų oro sąlygų, o antrajame vykdomas skenavimas imitavus lietų. Šiuo

bandymu siekiama gauti žmogaus silueto vaizdo kokybės pokyčius. Abiejuose etapuose žmogus stovi vienoduose nuotoliuose.

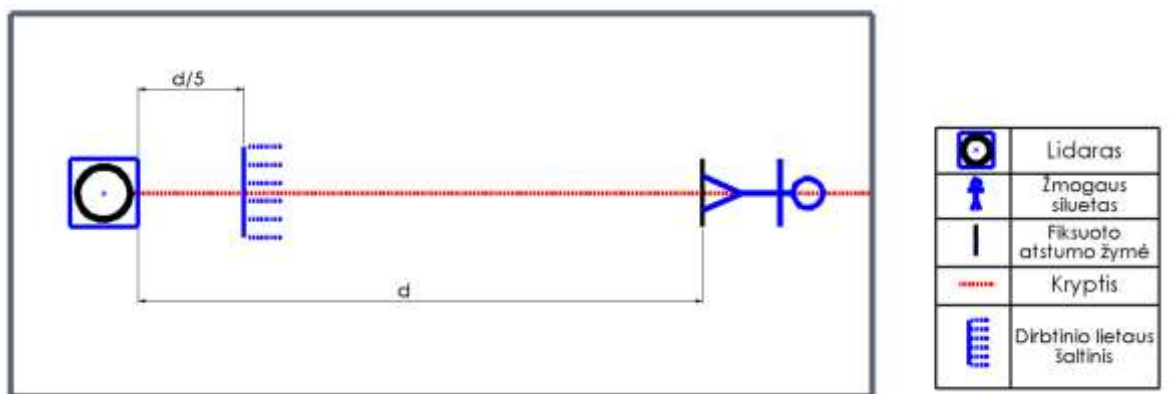
Eksperimento Nr. 3 scenarijai:

- Lidaro sukimosi dažnis: 7 Hz.
- Atstumai: 2,5 ir 5 m.
- Matuojamas objektas – žmogaus siluetas
- Matavimo aplinka – giedras oras ir lietus



24 pav. Tyrimo Nr. 3 pirmo etapo scenarijus prie įprastų oro sąlygų

Pirmiausia eksperimentas atliekamas prie giedro oro. Gavus reikiamus duomenis, pereinama prie antros eksperimento dalies, kurios vykdymas pateiktas 25 pav.



25 pav. Tyrimo Nr. 3 antro etapo scenarijus inicijuojant dirbtinį lietų

Atlikus eksperimentą, gauti rezultatai lyginami: kaip pasikeitė žmogaus silueto vaizdo kokybė nuotoliui padidėjus ir kaip sukurtas lietus darė įtaką vaizdo atkūrimui.

7.3. Rezultatų apdorojimas ir statistiniai parametrai išmatuotų duomenų įvertinimui

Kadangi, lokalinis žemėlapis programoje „RP-LiDAR Frame Grabber“ yra kuriamas polinėje koordinatinių sistemoje, atliekant gautų duomenų analizę dėl patogumo žemėlapis konvertuojamas į Dekarto koordinatinių sistemą. Tai padaroma naudojant šias pateiktas lygtis:

$$x = d \cdot \sin(\theta_{rad}) = d \cdot \sin\left(\theta_{deg} \cdot \frac{180}{\pi}\right); \quad (22)$$

$$y = d \cdot \cos(\theta_{rad}) = d \cdot \cos\left(\theta_{deg} \cdot \frac{180}{\pi}\right); \quad (23)$$

čia x ir y – taško koordinatės (mm); d – atstumas iki kliūties (mm); θ_{rad} – taško vietos kampas radianais (rad); θ_{deg} – kampas laipsniais ($^{\circ}$).

Atliekamų eksperimentų metu gauti duomenys turi būti įvertinami statistiniais parametrais, kurie aptariami toliau.

Vidutinė kvadratinė paklaida RMS:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}}; \quad (24)$$

čia \hat{x}_i – numatoma vertė; x_i – gauta vertė; n – matavimų skaičius.

Koreliacijos koeficientas ρ nusako ryšio glaudumą tarp dviejų dydžių. Šis koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}; \quad (25)$$

čia ρ_{xy} – Pirsono koreliacijos koeficientas; $Cov(x, y)$ – dydžių x ir y kovariacija; σ_x bei σ_y yra standartiniai nuokrypiai.

Koreliacijos koeficiento reikšmė kinta tarp: $-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$. Stipri tiesinė koreliacija pasireiškia, kai koeficientas yra artimas vienetui ($0,7 \div 1$). Vidutinio ir silpno stiprumo tiesinė priklausomybė bus tarp $0,4 \div 0,7$ ir $0,2 \div 0,4$. Tiesinė priklausomybė tarp dydžių x ir y praktiškai neegzistuoja, jei koeficientas gaunamas intervale: $0 \div 0,2$.

Matavimų dispersija (standartinis nuokrypis), skaičiuojama pagal (26) formulę:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}}; \quad (26)$$

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n}; \quad (27)$$

čia $(x_i - \mu)$ yra atskiro rezultato nuokrypis nuo aritmetinio vidurkio; μ – aritmetinis vidurkis.

Normalusis skirstinys, kurio tikimybinis tankis PDF (angl. *Probability density function*) išreiškiamas:

$$f_{PDF}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (28)$$

Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas CDF (angl. *Cumulative distribution function*) aprašomas:

$$f_{CDF}(x) = \Phi\left(\frac{x}{\sigma}\right); \quad (29)$$

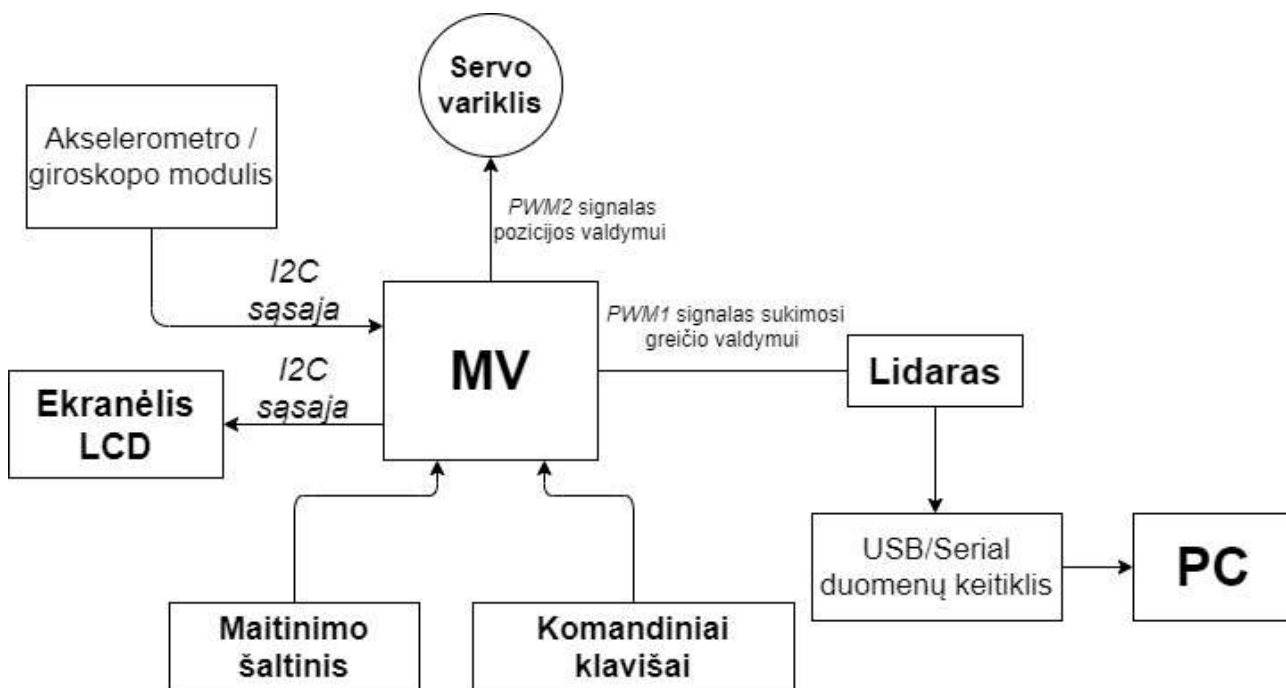
kur Φ yra normaliojo skirstinio kaupiamojo pasiskirstymo funkcija. Šiame darbe rezultatų grafiniam atvaizdavimui naudojamas CDF.

8. Projektinė dalis

Šiame darbe pasirinkta naudoti gamintojo „Slamtec“ lazerinį tolimatį „RoboPeak A1M8“. Panaudojant šį lidaro modelį, atliekami eksperimentai: skenuojama aplinka, sukuriama dvimatis aplinkos žemėlapis, užfiksuojamas konkretus objektas ir analizuojamas sistemos atkuriamas kūno vaizdas keičiant atstumus bei imituojant įvairias oro sąlygas. Pagal tokią eksperimentų metodiką galima patikrinti turimo įrenginio maksimalius pajėgumus. Tačiau „RoboPeak A1M8“ nėra sukurtas trimačiams aplinkos skenavimams, todėl yra reikalinga sukurti tinkamą eksperimentinį stendą ir jo valdymą, kuris padėtų patobulinti naudojamo lidaro galimybes. Siekiant sukurti tokį stendą, projektinėje dalyje pateikiamos projektavimo ypatybės, valdymo blokinė schema ir sudedamųjų elementų apžvelgimas.

8.1. Blokinė schema

Viena iš esminių stendo kūrimo stadijų yra apibrėžti reikiamų komponentų kieki ir jų atliekamas funkcijas. Tuomet reikalingus komponentus sujungti į bendrą sąsają, kuri atliktų priskirtas funkcijas bendro mechanizmo veikimui realizuoti. Projekto preliminari blokinė schema pateikta 26 pav.



26 pav. Lidaro „Slamtec RoboPeak A1M8“ stendo valdymo blokinė schema 2D ir 3D aplinkos skenavimams
Pagrindiniai komponentai, sudarantys blokinę schemą (žr. 26 pav.) yra šie:

- **Mikroprocesorinis valdiklis „MV“.** Programiniu būdu valdomas mikroprocesorius, kuris yra atsakingas už išorinių įrenginių valdymą.

- **Maitinimo šaltinis.** Naudojamas maitinimo šaltinis galėtų būti 5 V (DC), nes stendo realizavimui užtektų mažos galios įrenginių. Remiantis lidaro technine dokumentacija, jam visiškai užtenka tiekti 5 V įtampą, o naudojama maksimali srovė neviršija 600 mA.
- **Komandiniai klavišai.** Operatorius naudodamas komandinius klavišus gali valdyti LCD ekranėlio apšvietimą, pakreipti lidaro platformą į horizontalią padėtį, parinkti skenavimo dažnį, stabdyti stendo darbą ir pan.
- **Skystųjų kristalų ekranėlis „LCD“.** Stende integruotas ekranėlis atliks platformos pakrypimo kampo ir aplinkos temperatūros indikavimo funkcijas.
- **Giroskopo ir akselerometro modulis.** Šiame darbe gali būti naudojamas trijų ašių giroskopo ir akselerometro modulis (pvz. MPU-6050), kurio paskirtis yra matuoti lidaro pakreipimo kampą (iki 180°). Pasiekus ribinį kampą, mikrovaldiklis duoda komandą varikliui sukėti į kitą pusę ir platforma gražinama į pradinę padėtį.
- **Servo variklis.** Servo variklio paskirtis yra nuosekliai sukėti platformą, ant kurios yra pritvirtintas lidaras, iki reikiamos pozicijos. Pasiekus ribinį pasisukimo kampą, variklis gauna komandą iš valdiklio nedelsiant sukėti į kitą pusę, t. y. platforma gražinama į pradinę poziciją.
- **Lidasas.** Bene pagrindinis šio projekto įrenginys yra „RoboPeak A1M8“ lazerinis tolimatis, kuris atlieka aplinkos skenavimą.
- **USB nuoseklus keitiklis „USB/Serial“ ir kompiuteris „PC“.** Duomenys iš „RoboPeak A1M8“ tiesiogiai siunčiami į kompiuterį naudojant „USB/Serial“ keitiklį, kuris informaciją perduoda Tx ir Rx ryšio linijomis.

Automatizuotam stendo veikimui reikalingų elektronikos įrenginių aprašymai pateikti toliau.

8.2. Pasirinktas mikrovaldiklis

Stendo realizavimui pasirinkta naudoti STM32F1 serijos plokštę (žr. 27 pav.) su integruotu STM32F103C8T6 mikrovaldikliu, kuris priklauso Arm Cortex-M3 šeimos mikrovaldikliams. Naudojamas mikroprocesoriaus modulis turi daug aukšto lygio funkcijų skaitmeninių signalų apdorojimams, pasižymi mažomis energijos sąnaudomis, didele greitaveika ir našumu, o maksimalus taktinis dažnis yra 72 MHz. STM32F103xx mikrovaldikliai turi didelės spartos įterptines atmintis: „Flash“ iki 128 kilobaitų, statinę laisvo kreipimosi atmintį „SRAM“ (angl. *Static random-access memory*) iki 20 kilobaitų. Taip pat STM32F103C8T6 mikrovaldiklį sudaro įvairūs išoriniai įrenginiai: du 12-kos bitų analoginiai-skaitmeniniai keitikliai ADC (angl. *analog to digital converter*), išplėstinio valdymo laikmatis, trys bendrosios paskirties 16-kos bitų ir PWM (angl. *Pulse Width Modulation*) laikmačiai. Be to, yra galimybė prijungti ir komunikuoti su kitais periferiniais įrenginiais per tokias sąsajas: I2C (angl. *Inter-Integrated Circuit*), SPI (angl. *Serial Peripheral Interface*), USART (angl. *Universal synchronous and asynchronous receiver-transmitter*), USB (angl. *Universal Serial Bus*) ir CAN (angl. *Control Area Network*). Būtent pastarosios dvi naudojamos kaip ryšio sistemų sąsajos [43].



27 pav. Plokštė su integruotu lustu – STM32F103C8T6 mikrovaldikliu ir naudojamas programavimo adapteris STLinkV2

Mikroprocesoriaus modulis išvadus sudaro PA, PB ir PC prievadai, o kiti VSS, VDD ir VBAT gali būti naudojami prijungti išoriniam maitinimo šaltiniui. Plokštės lusto darbinė įtampa yra 3,3 V, bet į USB kontakto jungtį galima tiekti 5 V, kadangi plokštė turi vidinį įtampos reguliatorių. Programavimui naudojamas adapteris STLinkV2 (žr. 27 pav. dešinėje), kuris skirtas komunikuoti su kompiuteriu ir įkrauti programos turinį į mikrovaldiklį.

8.3. Akselerometro / giroskopo modulis panaudojimas

Lidaro pakreipimo kampo matavimams nuspręsta naudoti MPU-6050 modulį (žr. 28 pav.) – mikroelektromechaninę sistemą (angl. *Micro-electro-mechanical systems* (MEMS)). Ši modulis sudaro trijų ašių akselerometras ir trijų ašių giroskopas bei integruotas skaitmeninis judesio procesorius DMP, kuris gali apdoroti sudėtingus skaičiavimus. Tai naudojant galima išmatuoti greitį, pagreitį, poslinkį bei svarbiausia orientaciją, būtent tai, ko ir reikia kuriamam stendui. Integruoti 9 ašių „MotionFusion“ algoritmai surenka informaciją iš išorinio magnetometro ar kitų jutiklių per pagrindinę I2C duomenų magistralę, o tai leidžia prietaisui surinkti visą duomenų rinkinį. Norėdamas sekti tiksliai lėtus ar greitus judesius, vartotojas programuodamas gali pasirinkti giroskopo (± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/s) bei akselerometro (± 2 g, ± 4 g, ± 8 g ir ± 16 g) diapazonus [44].



28 pav. Giroskopas – akselerometras MPU-6050

Modulio darbinė įtampa yra nuo 3 V iki 5 V, naudojama sąsaja su mikrovaldikliu yra I2C, tad duomenys tiekiami per SCL (angl. *serial clock*) ir SDA (angl. *serial data*) linijas. Taip pat, šis modulis

turi integruotą temperatūros jutiklį, kuris matuoja darbinės aplinkos temperatūrą. Šiuo moduliu bus lengviau išlaikyti tikslią lazerinio tolimačio vertikalią / horizontalią padėtį ar jį pakreipti reikalingu kampu.

8.4. Naudojamas variklis platformos sukimui atlikti

Servo variklis MG996R pasižymi sklandžiu sukimo momentu esant apkrovai iki 11 kg/cm. Servo mechanizmas sukasi nuo 0 iki 180 laipsnių kampo, o valdymas paremtas atitinkamos PWM signalo skverbties (angl. *duty cycle*) tiekimu (0° esant 1 ms, 90° esant 1,5 ms ir 180° esant 2 ms), kai signalo dažnis yra 50 Hz. Šio modelio vidinis mechanizmas sudarytas iš metalinių krumpliaračių sistemos (žr. 29 pav.), kuri atlaiko didesnes apkrovas negu plastmasiniai krumpliaračiai bei yra atsparesnė pašaliniais smūgiams. Taip pat, šis modelis pasižymi pakankama greitaveika – iki 0,17 s/60° esant 4,8 V įtampai.



29 pav. Servo variklis MG996R

Tad, šio servo mechanizmo veikimo galimybės yra tinkamos eksperimentiniam stendui realizuoti. Pats variklio korpusas nėra didelių matmenų, todėl neužims daug vietos. Korpuso matmenys yra 40,7 x 19,7 x 42,9 mm, o bendras svoris yra apie 55 g [45].

8.5. Pokrypio kampo, lidaro skenavimo greičio ir aplinkos temperatūros indikavimas

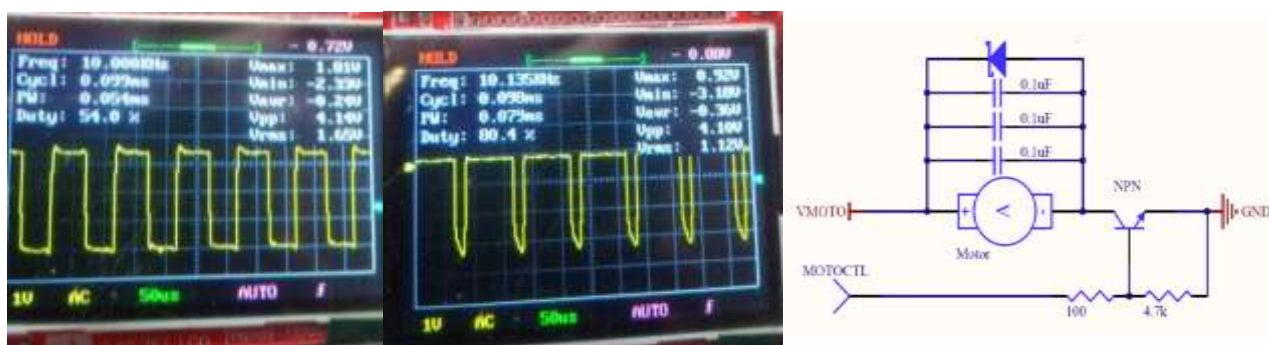
Eksperimentinio stendo projekte numatyta naudoti taškinės matricos skystųjų kristalų ekraną LCD (angl. *Liquid-Crystal display*) ir šviesos diodų lempučių modulį. Pasirinktas LCD HD44780 gali atvaizduoti dvi eilutes ir šešiolika stulpelių (16x2), o naudojama sąsaja su mikrovaldikliu yra I2C. Šiuo atveju verta paminėti, jog I2C sąsajai realizuoti naudojamas prievadų plėstuvus PCF8574T (žr. 30 pav. kairėje žemiau). Tiekama įtampa prievadų plėstuvui yra 5 V, kuri pagal dokumentaciją yra visiškai tinkama. [46]

Naudojami informaciniai elementai ir komandiniai mygtukai pateikti toliau esančioje fotografijoje.



30 pav. Informacinių elementų ir valdymo klavišų išdėstymas

Stendo LCD indikatoriaus paskirtis yra rodyti stendo pokrypio kampus pagal X ir Y ašis bei indikuoti aplinkos temperatūrą. Šiuos duomenis nuskaito mikroprocesorius iš jau minėto MPU-6050 modulio. Toliau, įsižiebiaut kiekvienai iš aštuonių šviesos diodų lempučių, rodomas stendo operatoriaus parinktas skenavimo greitis. Šis parametras keičiamas atitinkamo klavišo nuspaudimais. Pats įrenginio variklis, kuris suka skenuojančią optiką, valdomas 10 kHz dažnio stačiakampio formos (PWM) signalu keičiant jo skverbtį (31 pav.), o pats signalas yra perduodamas į valdiklį (schema pateikta gamintojo 31 pav. dešinėje [42]).

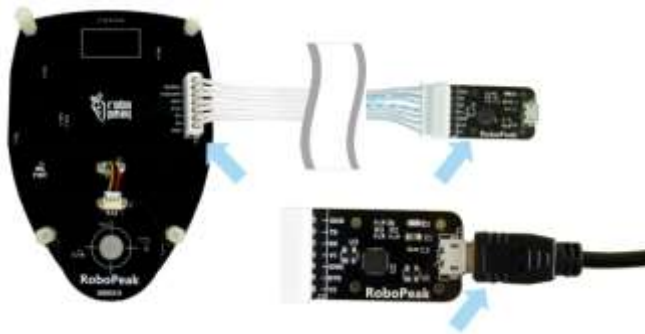


31 pav. Lidaro skenavimo dažnis valdomas elektrine grandine [42] į kurią tiekama kintamos skverbties stačiakampio formos (PWM) signalas

Numatyta, jog šis prototipinis eksperimentinis stendas turi būti valdomas ne mažiau kaip keturiais klavišais, kur kiekvienas iš jų gali aktyvuoti tam tikras funkcijas (žr. 30 pav. dešinėje).

8.6. Lidaro sąsaja su kompiuteriu

Turimas „RoboPeak A1M8“ modelis duomenų perdavimui į kompiuterį prijungiamas prie USB RS232 adapterio (žr. 32 pav.), kuris vidinę UART nuosekliają sąsają konvertuoja į USB. Pats adapteris turi integruotą CP2102 lustą, kurio vidinių komponentų kiekis ir itin minimalus papildomų komponentų poreikis užtikrina ryšio sąsajos užmezgimą.



32 pav. „RoboPeak A1“ (kairėje) serijos modelio prijungimas prie USB RS232 adapterio (dešinėje), kuris naudojamas duomenims perduoti į kompiuterį [42]

Dviejų įrenginių komunikacijai užtikrinti per UART sąsają, prijungiami šie kontaktai:

- abiejų įrenginių neigiami maitinimo poliai sujungiami tarpusavyje;
- vieno prietaiso duomenų siuntimo įvadas Tx prijungiamas prie kito prietaiso priėmimo įvado Rx;
- lygiai taip pat, Rx jungiamas prie Tx.

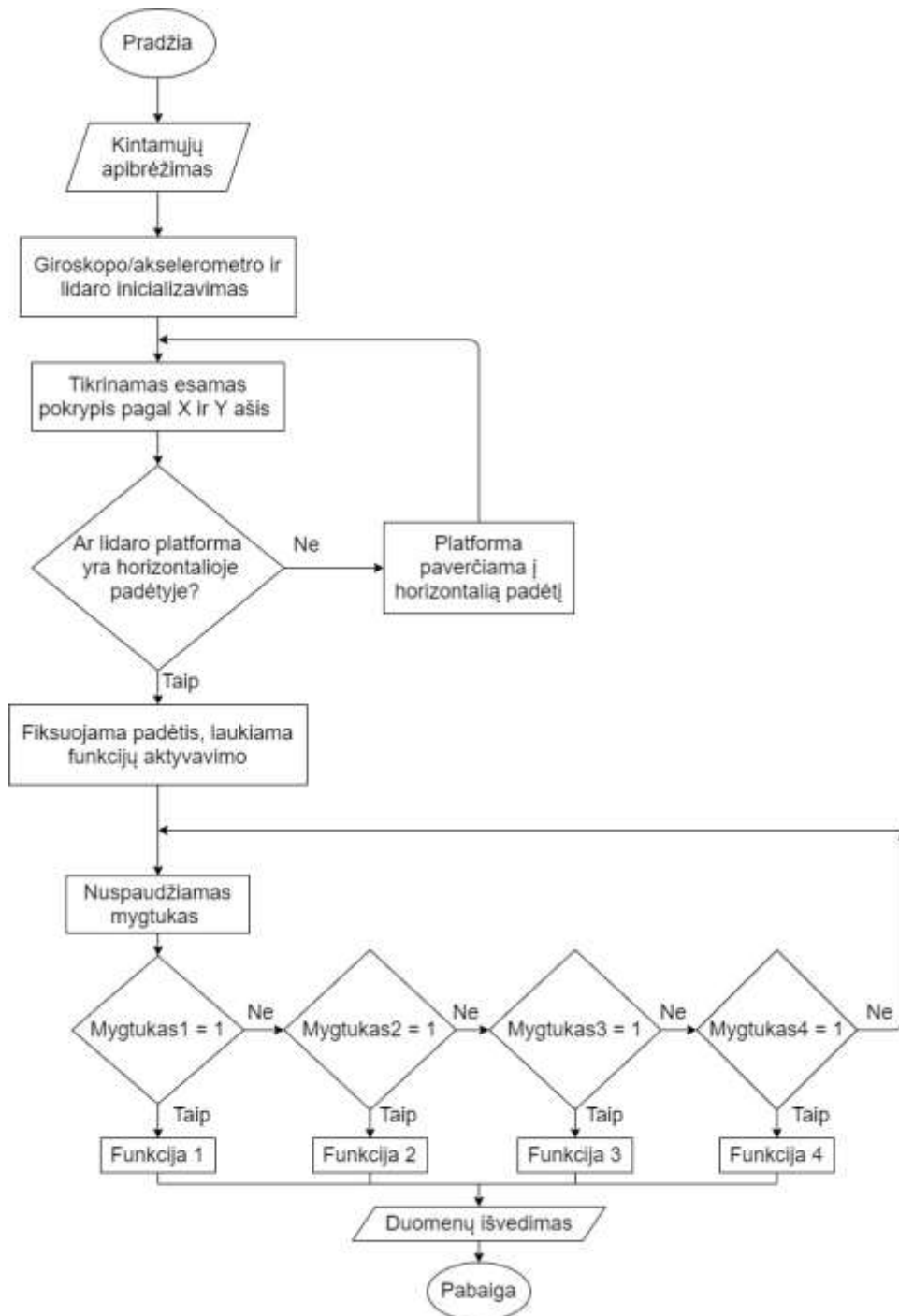
Taigi, naudojant UART, duomenys perduodami nuoseklia sąsaja dviem ryšio linijomis Tx ir Rx. Įrašius reikiamą įrenginio tvarkyklę į kompiuterį, o po to prijungus „RoboPeak A1M8“ USB nuoseklų keitiklį, COM prievado tvarkyklėje vartotojas gali atlikti konfigūracijas: keisti duomenų formatą ir parinkti perdavimo spartą (angl. *baud rate*).

8.7. Stendo valdymo algoritmas

Lidaro stendo programinis valdymas susideda iš paprastų keturių funkcijų, kurias gali aktyvuoti operatorius, nuspausdamas tam tikrus klavišus:

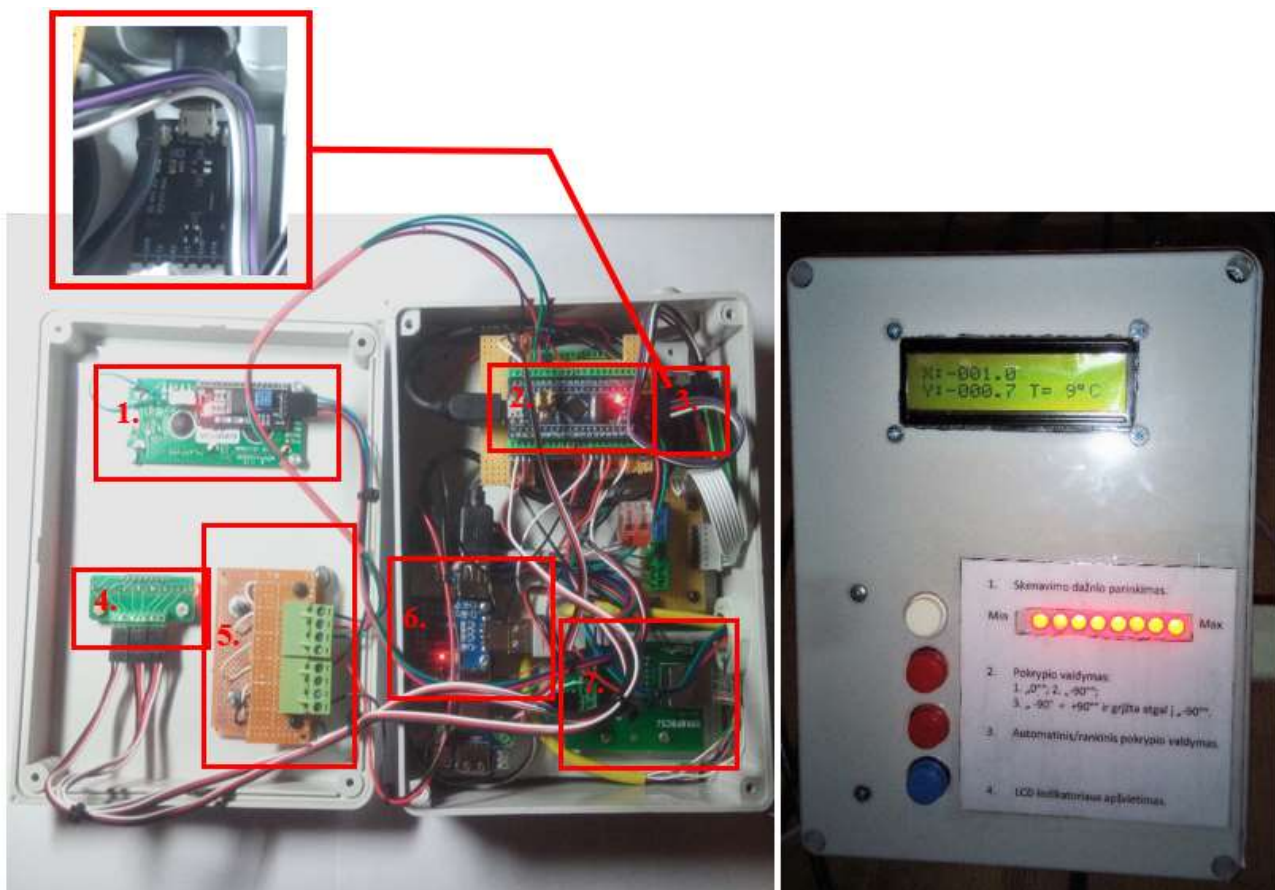
- Funkcija 1 – lidaro skenavimo dažnio parinkimas;
- Funkcija 2 – lidaro pokrypio valdymas (nuo -90° iki $+90^\circ$);
- Funkcija 3 – automatinis / rankinis pokrypio valdymo režimų aktyvavimas;
- Funkcija 4 – LCD indikatoriaus apšvietimo įjungimas

Toliau pateikiamas prietaiso „RoboPeak A1M8“ stendo valdymo algoritmas (žr. 33 pav.).



33 pav. „RoboPeak AIM8“ stendo valdymo algoritmas

Tad, realizuotas valdymo pultas iš jau paminėtų elementų parodytas žemiau (žr. 34 pav.). Šį pultą naudojantis operatorius gali kontroliuoti stendo darbą, kurio veikimas paremtas 33 pav. valdymo algoritmu.



34 pav. Valdymo pulto elementai

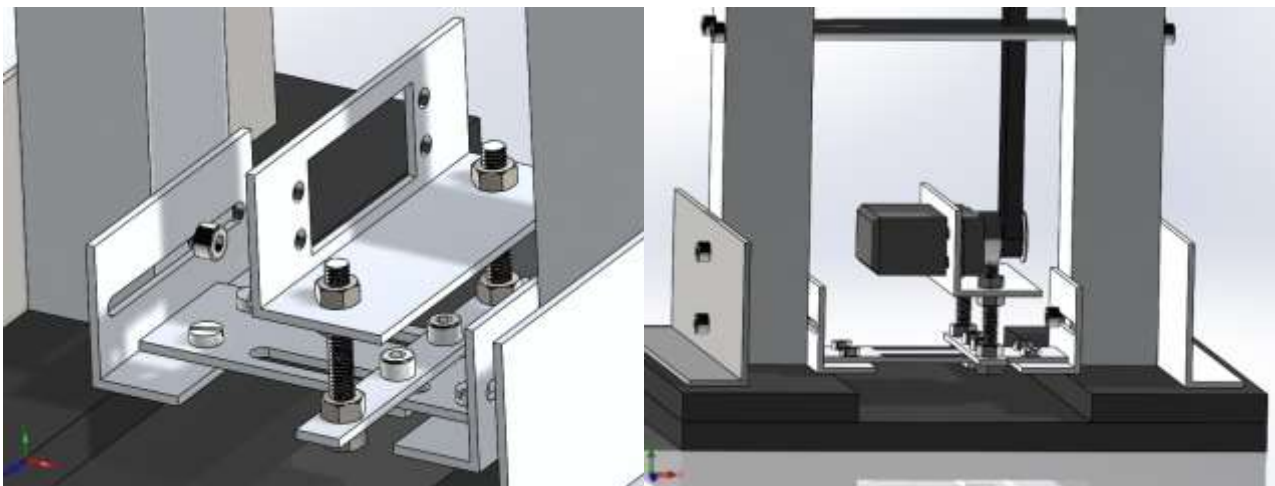
Valdymo pulto pagrindiniai elementai pažymėti 34 pav. kairėje pusėje:

1. Skystųjų kristalų ekranėlis.
2. STM32F1 serijos plokštė su integruotu STM32F103C8T6 mikrovaldikliu.
3. USB nuoseklus keitiklis.
4. Šviesos diodų modulis.
5. Valdymo klavišų plokštė.
6. USB portų plėstuvas.
7. Lidaro duomenų linijos prijungimo plokštė.

Visi komponentai patalpinti į plastikinę dėžutę, kurios saugumo klasė – IP65. Ši IP apsaugos klasė pasižymi geru atsparumu drėgmei ir apsaugo nuo dulkių patekimo ant viduje esančių prietaisų.

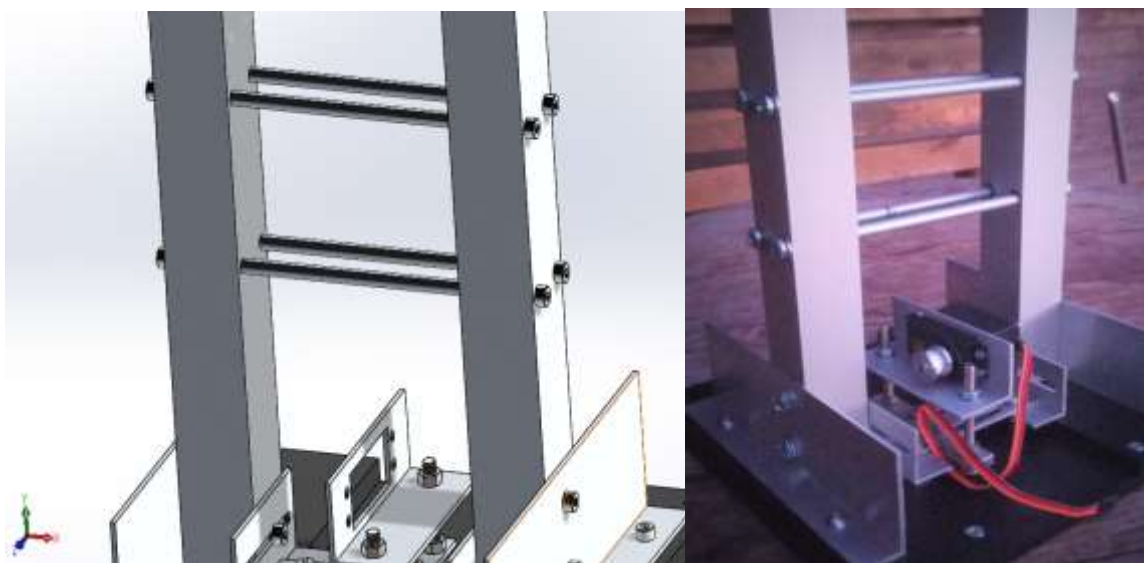
8.8. Stendo konstrukcijos kūrimas

Stendo konstrukcija sukuriama naudojant programą „SolidWorks“. Projektavimo metu yra parenkami konstrukciniai sprendimai, vizualiai pateikiama, kaip atrodo galimas stendo prototipas. Visą sandarą sudaro aliuminio kampiniai, apvalūs ir kvadratiniai profiliai bei papildomos dalys iš plastiko PE-300. Pasirinktos medžiagos lengvai apdirbamos mechanškai, pasižymi tvirtumu, standumu ir lengvumu. Žemiau aptariamos konstrukcijos pagrindinės vietos.



35 pav. Servo variklio laikiklis su dirželio įtempimo mechanizmu (slankiojanti struktūra)

Esminį judesį inicializuoja servo variklis diržine pavara, kurios santykis 1:1. Įstatytas variklis į laikiklį (žr. 35 pav.) reguliuojamas vertikalia ir horizontalia kryptimis, tokiu būdu parenkama dirželio įtempimo jėga. Įtempimas nustatomas M5 veržlėmis jas sukant į srieginius strypus. Be to, struktūros stabilumo pagerinimui pridėtos 6 mm skersmens sijos (žr. 36 pav.).



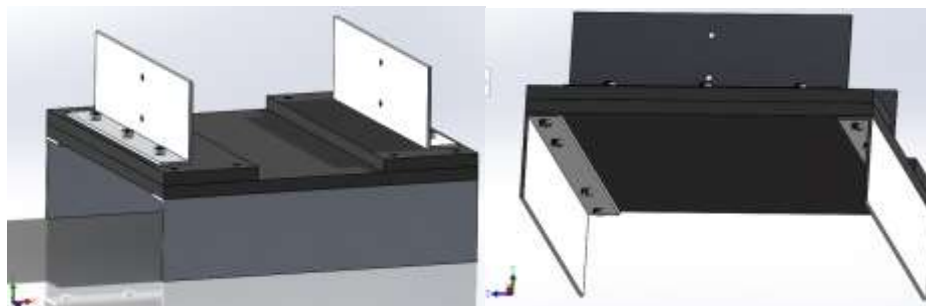
36 pav. Laikančiųjų konstrukcijų stabilumo ir tvirtumo užtikrinimui naudojamos skersinės sijos

Viršutinėje dalyje montuojami du guoliai ir jų laikikliai, o į guolius įstatoma 5 mm skersmens ašis ant kurios komponuojamas dirželio krumpliaratis GT2 ir lidaro platforma. Siekiant išlaikyti ašį horizontalioje padėtyje, naudojamas lygio reguliatorius (žr. 37 pav.), kuris valdomas dvejais M4 varžtais.



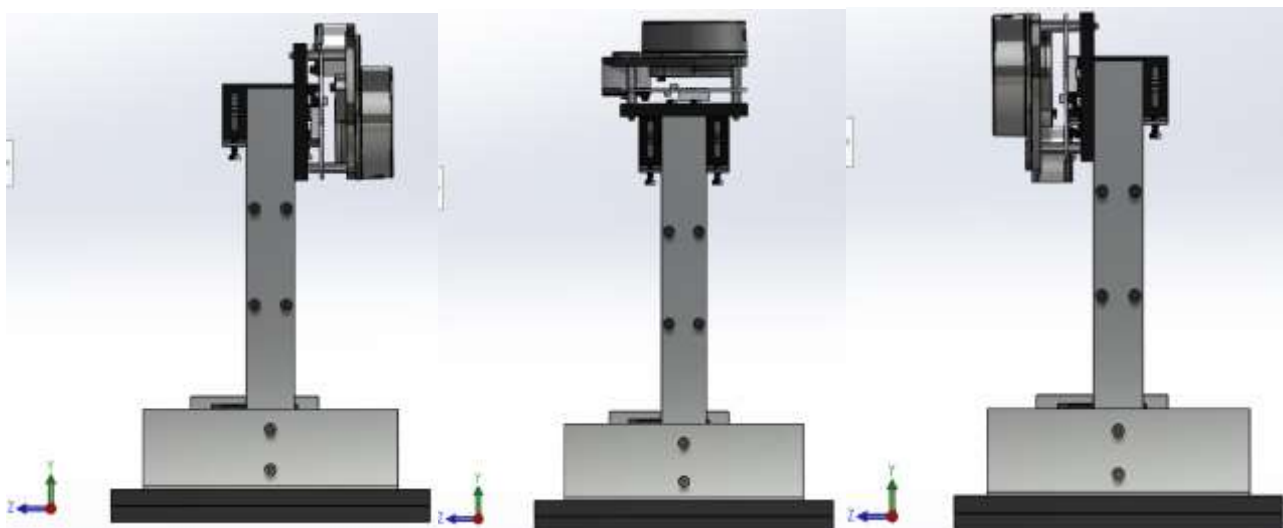
37 pav. Ašies lygio reguliatorius ir tvirtinamieji elementai ant ašies

Laikančiosios konstrukcijos tvirtinamos ant 8 mm storio pagrindo iš plastiko, kuris papildomai sutvirtintas kampiniais profiliais (žr. 38 pav.). Šie profiliai pastiprina pagrindą, išlaiko bei apsaugo, kad nepasireikštų plastiko išsigaubimas ir neatsirastų papildomų deformacijų.



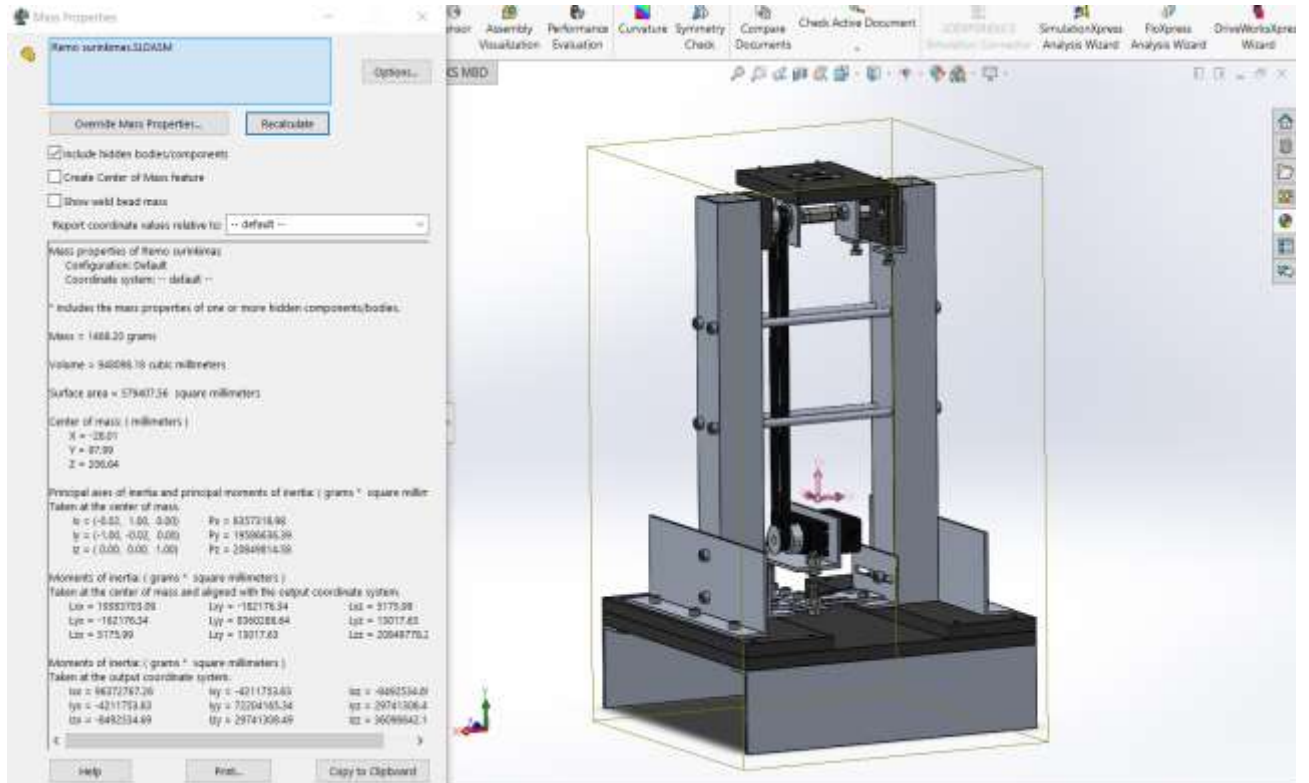
38 pav. Pagrindas sustiprintas kampiniais profiliais

Pilnai surinktas modelis programoje „SolidWorks“ parodytas žemiau su lidaro pakreipimo pavyzdžiais. Maksimaliai platforma gali sukis iki 180° kampo, dėl naudojamo servo variklio MG996R modelio mechanizmo.



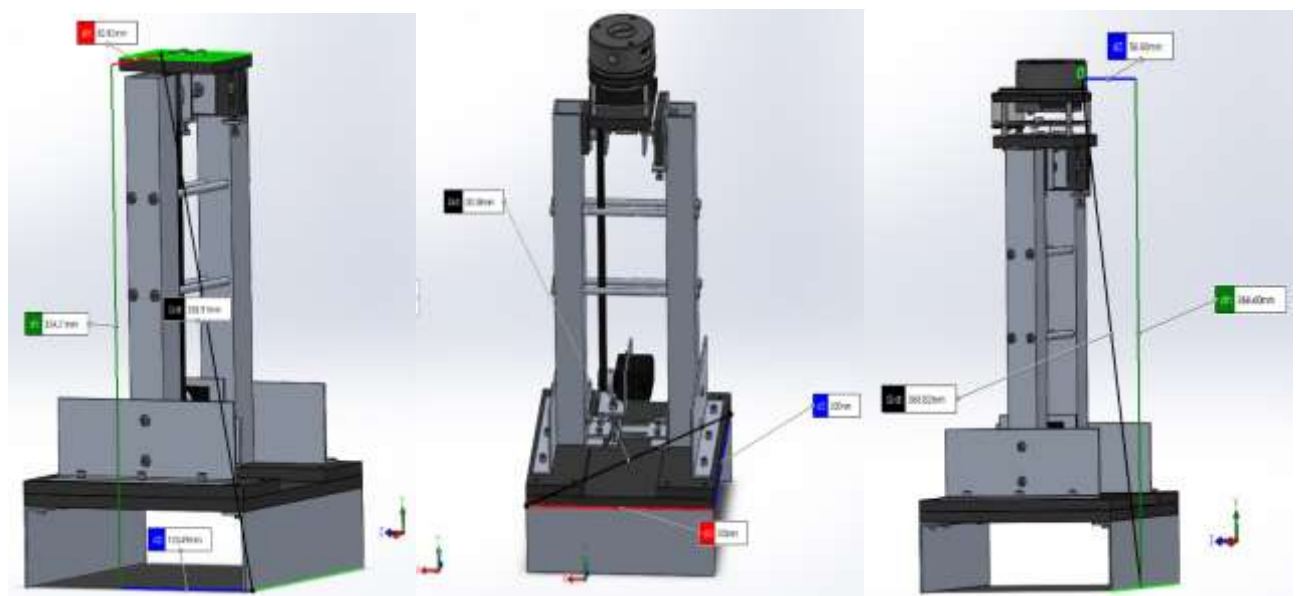
39 pav. Lidaro stendo veikimo funkcijos: pozicija ties $+90^\circ$ (kairėje), ties 0° (viduryje) ir -90° (dešinėje)

Užbaigus darbą su „Assembly“, programoje pasirenkama funkcija „Mass Properties“, kurios pagalba įvertinamas modelio svoris (žr. 40 pav.). Atlikus skaičiavimus gauta, kad konstrukcijos bendras svoris (be lidaro) yra apie 1,5 kg.



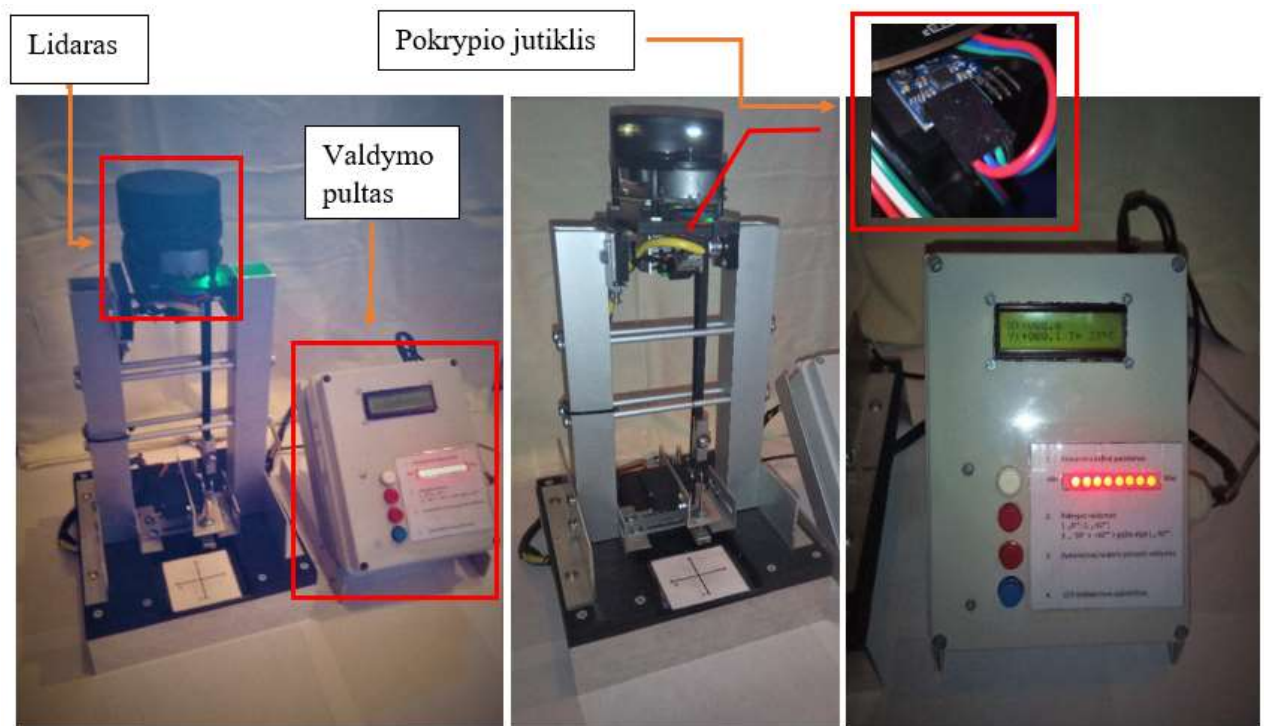
40 pav. Eksperimentinio stendo svorio įvertinimas

Beje, preliminarūs konstrukcijos matmenys parodyti 41 pav. Gauta, kad pagrindo ilgis ir plotis yra po 200 mm, o aukštis nuo stendo pagrindo kampinio profilio apačios iki platformos viršutinės dalies lygus 324,21 mm. Pridėjus lidarą, aukštis nuo apačios iki skenuojančios optikos lygus 364,40 mm.



41 pav. Surinktos konstrukcijos matmenys

Remiantis suprojektuotomis detalėmis buvo sukonstruota reali eksperimentinio stendo konstrukcija, kuri parodyta 42 pav.



42 pav. Realizuotas stendas su valdymo pultu

Projektuoto stendo sistemą sudarantys mechaniniai, valdymo, informaciniai ir vykdymo elementai surašyti 6-oje lentelėje.

6 lentelė. Mechanizmo sisteminiai elementai

Mechaniniai elementai	Valdymo elementai	Informaciniai elementai	Vykdymo elementai
Guoliai, atramos, dirželis, krumpliaračiai, skersinės sijos, ašies lygio reguliatorius, dirželio įtempėjas.	Mikroprocesorius STM32F103C8T6, akcelerometras / girokopas MPU6050, USB nuoseklus adapteris, komandiniai mygtukai.	LCD ekranėlis, LED indikatorius.	Servo variklis, DC variklis.

9. Eksperimentai

Siekiant ištirti turimo lazerinio tolimačio „Slamtec RoboPeak A1M8“ parodymų tikslumą, atliekamas tyrimas skenuojant objektą skirtingais dažniais prie tam tikrų oro sąlygų. Pasirinktas objektas yra nejudantis 135,28 mm skersmens kamuolys.

9.1. Eksperimentas Nr. 1

Atliekant eksperimentą Nr.1, t.y. prie gerų oro sąlygų, kai nėra jokių kritulių, naudojama įranga ir kompiuterinės programos yra įvardintos toliau. Eksperimentas atliekamas pagal scenarijų, kuris pateiktas 22 pav.

- **Įranga:** lidaro eksperimentinis stendas, USB nuoseklus keitiklis duomenų perdavimui į kompiuterį, atstumo matavimo juosta.
- **Kompiuterinės programos:** „RP-LiDAR Frame Grabber“ ir „Microsoft Excel“.

Tyrimas atliekamas pagal tokią tvarką:

1. Tiriamasis objektas pastatomas atstumu d_1 nuo lidaro.
2. Aktyvuojamas lidaro eksperimentinis stendas.
3. Parenkamas skenavimo dažnis.
4. Laukiama apie porą minučių, kad programos „RP-LiDAR Frame Grabber“ kuriamas aplinkos žemėlapis kompiuterio ekrane nusistovėtų.
5. Duomenys išsaugomi.
6. Kartojamas 3-ias, 4-as bei 5-as punktai iki mažiausio skenavimo dažnio.

Naudojantis tokia tvarka, eksperimentas kartojamas prie kito nuotolio d_2 ir t. t. Eksperimento prie gerų oro sąlygų vykdymas parodytas 43 pav.



43 pav. Eksperimento Nr. 1 vykdymas (kairėje) ir lokalinio žemėlapio atvaizdavimo pavyzdžiai (dešinėje) prie skirtingų skenavimo dažnių

Atlikus matavimus, duomenys apdorojami su „Microsoft Excel“ programa (žr. 4 priedas). Eksperimento Nr. 1 metu gauti rezultatai pateikti 1-ame priede.

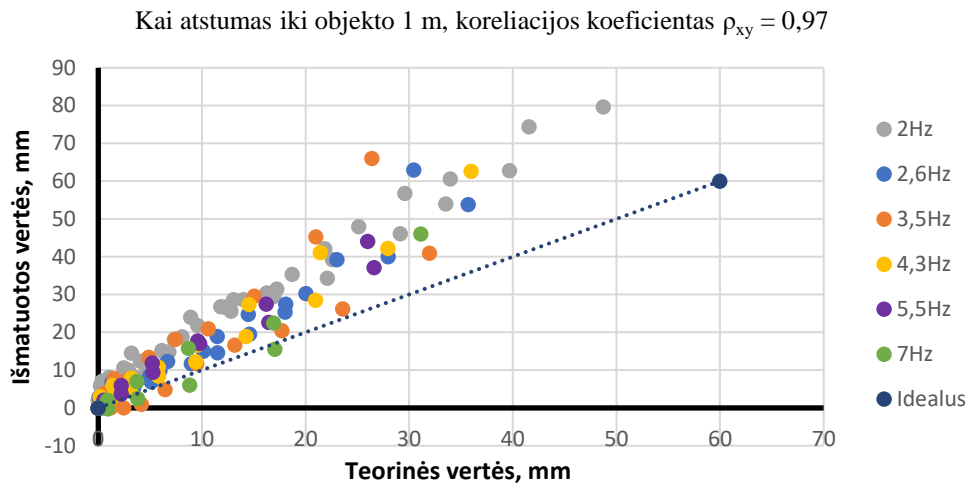
Toliau pateikiami rezultatai prie 1 m ir 6 m nuotolių (žr. 7-ą lentelę). Lentelėje naudojami ženkliniai: d – atstumas iki tiriamojo objekto, f – skenavimo dažnis, i – taškų skaičius, $d_{i=1 \text{ mat}}$ – užfiksuoto artimiausio taško iki kliūtis nuotolis, RMS_{vid} – matavimų vidutinė kvadratinė paklaida, σ_{vid} – matavimų dispersija.

7 lentelė. Eksperimento rezultatai 1 m ir 6 m nuotolyje prie gerų oro sąlygų

d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1\text{ mat.}}$, mm	RMS_{vid} , \pm mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
1000	2	49	943,93	44,467	7,837	
	2,6	29	970,96	23,097	5,946	
	3,5	21	974,90	20,081	6,671	
	4,3	17	986,98	8,564	3,796	
	5,5	13	997,95	4,809	4,393	
	7	10	995,77	4,589	2,886	
6000	2	10	5884,78	82,033	36,745	
	2,6	4	5900,97	82,820	14,879	
	3,5	3	5922,99	80,886	3,402	
	4,3	2	5923,89	80,662	6,442	
	5,5	1	5981,90	20,227	-	
	7	1	5945,83	54,173	-	

Atlikus matavimus, kai tiriamasis objektas buvo pastatomas nuo vieno iki šešių metrų nuotoliuose, pastebėta gaunamo atstumo kitimo tendencija keičiant skenavimo dažnį. Fiksuojami atstumai tiksliausiai gaunami prie didesnių dažnių – 5,5 ir 7 Hz. Taikant šiuos dažnius prie 1 metro nuotolio kūnas užfiksuotas atitinkamai 0,998 m ir 0,996 m atstumuose. Nors prie mažesnių dažnių (2 bei 2,6 Hz) surenkama daugiausia taškų, tačiau yra prarandamas atstumo tikslumas, pvz. 7 lentelėje, kai $d =$

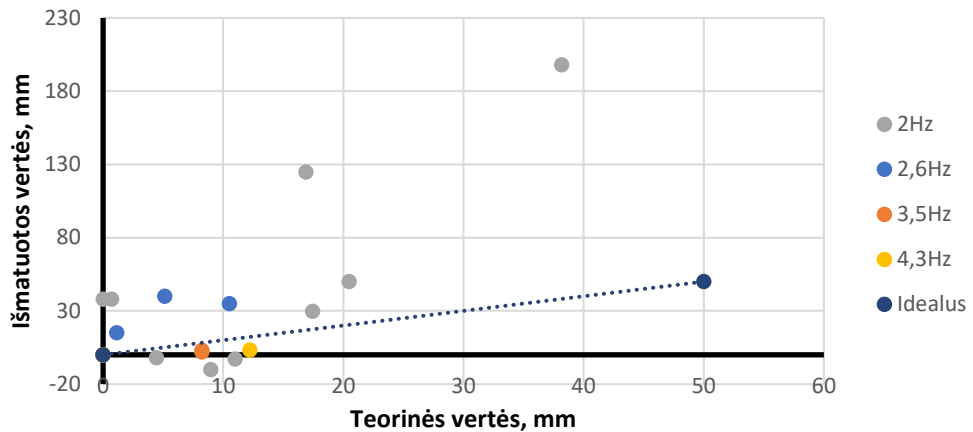
1000 mm, fiksuojamas 0,944 m ir 0,971 m nuotoliai. Padidinus atstumą iki 5 ar 6 metrų ir parinkus 5,5 arba 7 Hz skenavimo dažnį fiksuojamas tik vienas taškas (žr. 7 lentelėje, kai $d = 6000$ mm atitinkamai gaunama 5,982 m ir 5,946 m). Daugiau kaip vienas taškas nefiksuojamas, nes pasiekiamas ribinis atstumas, kai naudojamas „Slamtec RoboPeak A1M8“ lidaras nebegali matyti 135 mm skersmens bei mažesnių kūnų. Kai taikomas 4,3 Hz ar mažesnis dažnis šešių metrų nuotolyje, detektorius geba gauti daugiau nei vieną atsispindinčius signalus nuo kūno, bet prie didesnių skenavimo dažnių naudotas tiriamasis kūnas toliausiame nuotolyje praktiškai tampa nebematomas. Apskaičiavus vidutinę kvadratinę paklaidą RMS (žr. formulę (24)) visais atvejais (žr. 1-ą priedą), didžiausia paklaida pasireiškia naudojant 2 Hz skenavimo dažnį (pavyzdžiui $RMS_{1m(2Hz)} = \pm 44,47$ mm ir $RMS_{4m(2Hz)} = \pm 64,44$ mm), o mažiausios paklaidos gaunamos naudojant 5,5 arba 7 Hz, pavyzdžiui: $RMS_{1m(5,5Hz)} = \pm 4,81$ mm ir $RMS_{1m(7Hz)} = \pm 4,59$ mm, $RMS_{4m(5,5Hz)} = \pm 10,58$ mm ir $RMS_{4m(7Hz)} = \pm 10,19$ mm. Tad, prie artimiausio nuotolio naudojamas skenavimo dažnis 5,5 arba 7 Hz sudaro apie 9 kartus mažesnes paklaidas, o prie tolimiausio nuotolio paklaidos padidėja, bet vis vien yra atitinkamai 6-iais kartais mažesnės, negu prie 2 Hz.



44 pav. Sklaidos diagrama prie įprastų oro sąlygų 1-o metro nuotolyje

Išmatuotų ir teorinių verčių tarpusavio glaudumą atspindi koreliacinė analizė. Gautos išmatuotos atstumo vertės vieno metro nuotolyje bendrai sudaro stiprią tiesinę priklausomybę (žr. 44 pav.), nes apskaičiuotas Pirsono koreliacijos koeficientas lygus 0,97. Koeficientas darbe vertinamas suskaičiavus vidurkį remiantis atliktais matavimais prie šešių skenavimo dažnių.

Kai atstumas iki objekto 6 m, koreliacijos koeficientas $\rho_{xy} = 0,84$



45 pav. Sklaidos diagrama prie įprastų oro sąlygų 6-ių metrų nuotolyje

Šešių metrų nuotolyje gautas koreliacijos koeficientas 0,84 yra mažesnis lyginant su vieno metro nuotoliu, bet galima teigti, kad ryšys yra stiprus. Tačiau, šiuo atveju į rezultatų vertinimą neįeina matavimai prie 5,5 ir 7 Hz, nes šiais dažniais 6-ių metrų nuotolyje fiksuojama tik po vieną tašką.

9.2. Eksperimentas Nr. 2

Atliekant eksperimentą Nr. 2, t. y. esant dirbtiniam lietai tarp lidaro siųstuvo ir objekto, naudojama įranga bei kompiuterinės programos yra įvardintos toliau. Eksperimentas atliekamas pagal scenarijų, kuris pateiktas 23 pav.

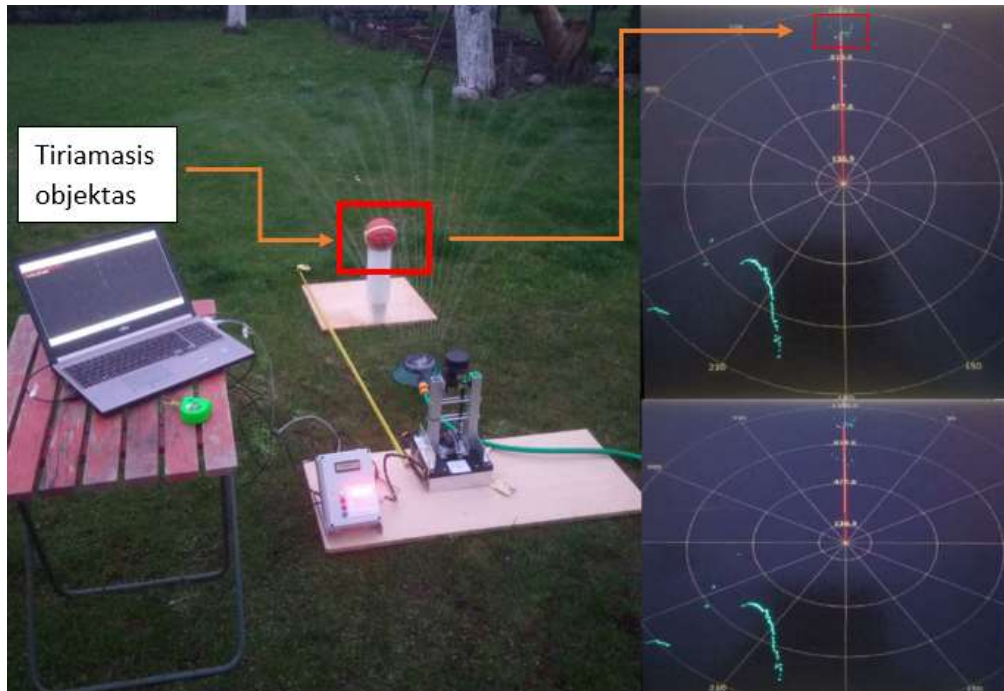
- **Įranga:** lidaro eksperimentinis stendas, USB nuoseklus keitiklis duomenų perdavimui į kompiuterį, reguliuojamas vandens purkštuvas, atstumo matavimo juosta.
- **Kompiuterinės programos:** „RP-LiDAR Frame Grabber“ ir „Microsoft Excel“.

Sukėlus dirbtinį lietaų kritulių intensyvumas siekia 9,84 mm/h.

Tyrimas atliekamas pagal tokią tvarką:

1. Tiriamasis objektas pastatomas atstumu d_1 nuo lidaro.
2. Įjungiamas dirbtinio lietaus šaltinis.
3. Aktyvuojamas lidaro eksperimentinis stendas.
4. Parenkamas skenavimo dažnis.
5. Laukiama apie porą minučių, kad programos „RP-LiDAR Frame Grabber“ kuriamas aplinkos žemėlapis kompiuterio ekrane nusistovėtų.
6. Duomenys išsaugomi.
7. Kartojamas 4-as, 5-as ir 6-as punktai iki mažiausio skenavimo dažnio.

Naudojantis tokia tvarka, šis eksperimentas kaip ir pirmojo metu yra kartojamas prie kito nuotolio d_2 ir t. t. Eksperimento vykdymas sukėlus dirbtinį lietaų parodytas 46 pav.



46 pav. Eksperimento Nr. 2 vykdymas (kairėje) ir lokalinio žemėlapių atvaizdavimo pavyzdžiai (dešinėje) prie skirtingų skenavimo dažnių

Eksperimento Nr. 2 metu gauti rezultatai pateikti 2-ame priede. Toliau pateikiami rezultatai prie 1 m ir 6 m nuotolių (žr. 8-ą lentelę).

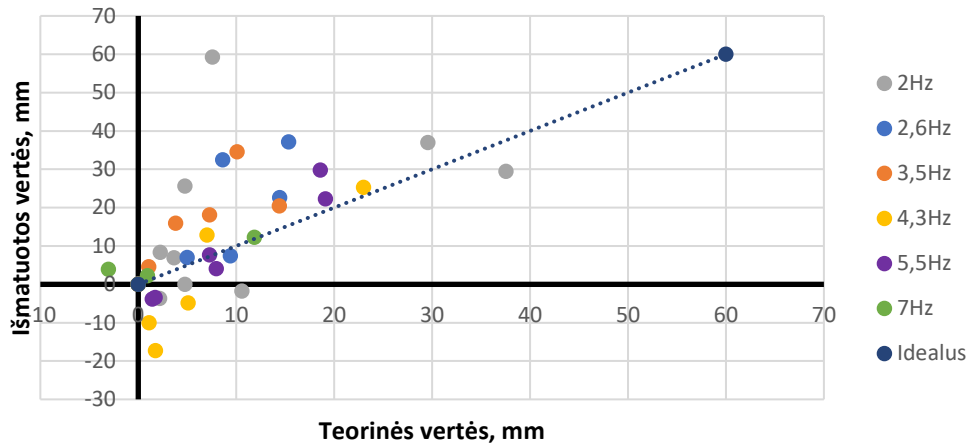
8 lentelė. Eksperimento rezultatai 1 m ir 6 m nuotolyje imitavus lietu

d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1 mat.}$, mm	RMS_{vid} , ± mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
1000	2	10	983,10	16,739	10,104	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 1$ m</p>
	2,6	6	978,00	13,658	10,359	
	3,5	6	973,80	16,735	8,589	
	4,3	6	990,68	8,050	4,656	
	5,5	7	997,95	4,418	3,925	
	7	4	1009,05	8,178	3,256	

d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1\text{ mat.}}$, mm	RMS_{vid} , \pm mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
6000	2	5	5836,29	129,825	26,977	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 6$ m</p>
	2,6	3	5823,00	110,360	70,211	
	3,5	1	5989,07	35,633	-	
	4,3	1	6054,31	34,449	-	
	5,5	1	6052,10	23,182	-	
	7	1	5989,49	11,225	-	

Atlikus matavimus, kai tiriamasis objektas buvo pastatomas nuo vieno iki šešių metrų nuotoliuose imitavus lietu, pastebėta lietaus daroma įtaka objekto vaizdo atkūrimui. Fiksuojami atstumai tiksliausiai gaunami prie didesnių dažnių (5,5 ir 7 Hz), kaip ir eksperimento metu prie gerų oro sąlygų. Prie 1 metro nuotolio objektas užfiksuotas atitinkamai 0,998 m ir 1,009 m atstumuose. Tačiau keičiant atstumus, taškų išsibarstymas vis labiau didėja. Šešių metrų nuotolyje, tiriamasis objektas tampa nebeatomas naudojant 3,5 Hz ir didesnius skenavimo dažnius. Prie mažesnių dažnių nei 2,6 Hz žemėlapyje atkuriamo objekto forma prarandama, o gaunamas atstumas prie 1 ir 6 metrų nuotolių yra 0,983 m bei 0,978 m ir 5,836 m bei 5,823 m. Apskaičiavus vidutinę kvadratinę paklaidą RMS matuotais atvejais (žr. 2-ą priedą), didžiausia paklaida, kaip ir eksperimento Nr. 1 metu, pasireiškia naudojant 2 Hz skenavimo dažnį (pavyzdžiui $RMS_{1m(2Hz)} = \pm 16,74$ mm ir $RMS_{4m(2Hz)} = \pm 123,43$ mm). Mažiausios paklaidos gaunamos naudojant 5,5 arba 7 Hz, pavyzdžiui: $RMS_{1m(5,5Hz)} = \pm 4,42$ mm ir $RMS_{1m(7Hz)} = \pm 8,18$ mm, $RMS_{4m(5,5Hz)} = \pm 27,35$ mm ir $RMS_{4m(7Hz)} = \pm 23,93$ mm. Tad esant lietu, prie 4 metrų nuotolio naudojamas skenavimo dažnis 5,5 arba 7 Hz sudaro apie 5 kartus mažesnes paklaidas.

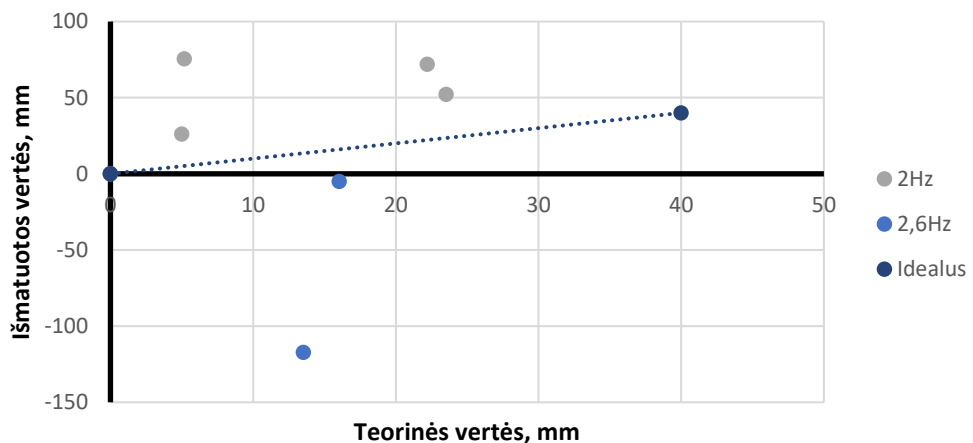
Kai atstumas iki objekto 1 m, koreliacijos koeficientas $\rho_{xy} = 0,81$



47 pav. Sklaidos diagrama imitavus lietu 1-o metro nuotolyje

Gautos išmatuotos atstumo vertės imitavus lietu vieno metro nuotolyje bendrai sudaro stiprią tiesinę priklausomybę (žr. 47 pav.), nes apskaičiuotas Pirsono koreliacijos koeficientas lygus 0,81.

Kai atstumas iki objekto 6 m, koreliacijos koeficientas $\rho_{xy} = 0,49$

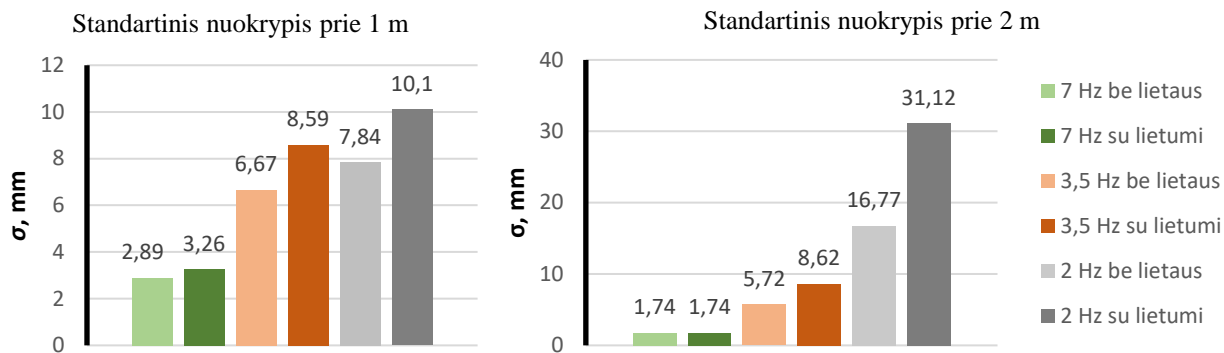


48 pav. Sklaidos diagrama imitavus lietu 6-ių metrų nuotolyje

Šešių metrų nuotolyje ir esant lietu, gautas koreliacijos koeficientas yra 0,49. Šiuo atveju į rezultatų vertinimą įeina matavimai tik prie 2 ir 2,6 Hz. Pagal gautą koeficiento reikšmę, daroma prielaida, jog egzistuojantis ryšys tarp matavimų yra vidutinio stiprumo.

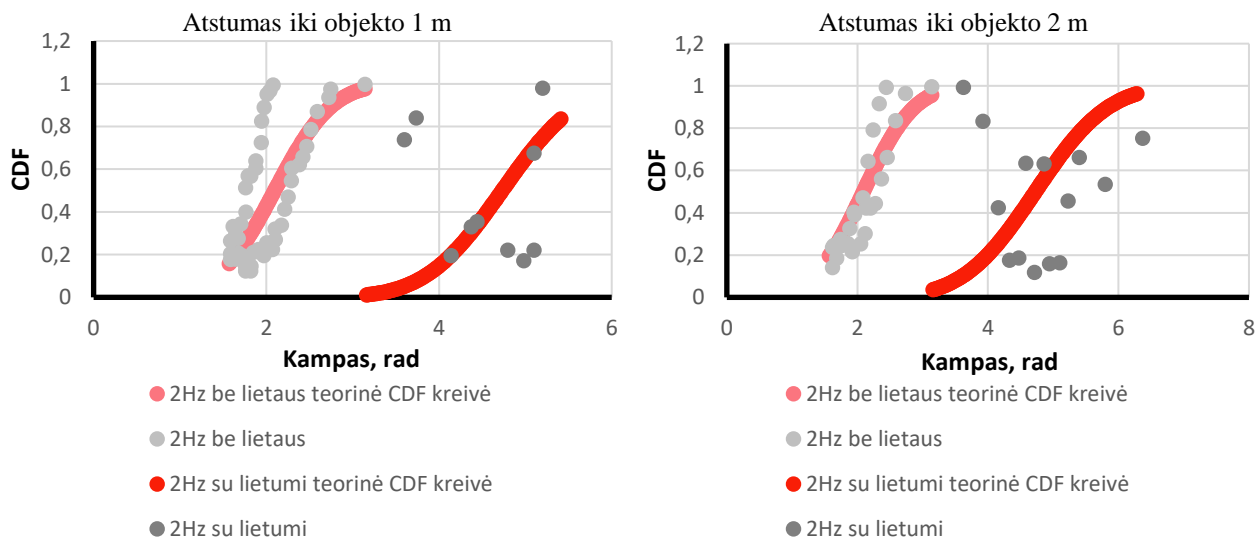
9.3. Eksperimentų Nr. 1 ir Nr. 2 rezultatų lyginimas

Rezultatų išsibarstymą nusako dispersija ir CDF funkcija. Remiantis šiais statistiniais parametrais lyginami rezultatai prie trijų dažnių (2 Hz, 3,5 Hz ir 7 Hz) esant vieno ir dviejų metrų nuotoliui.



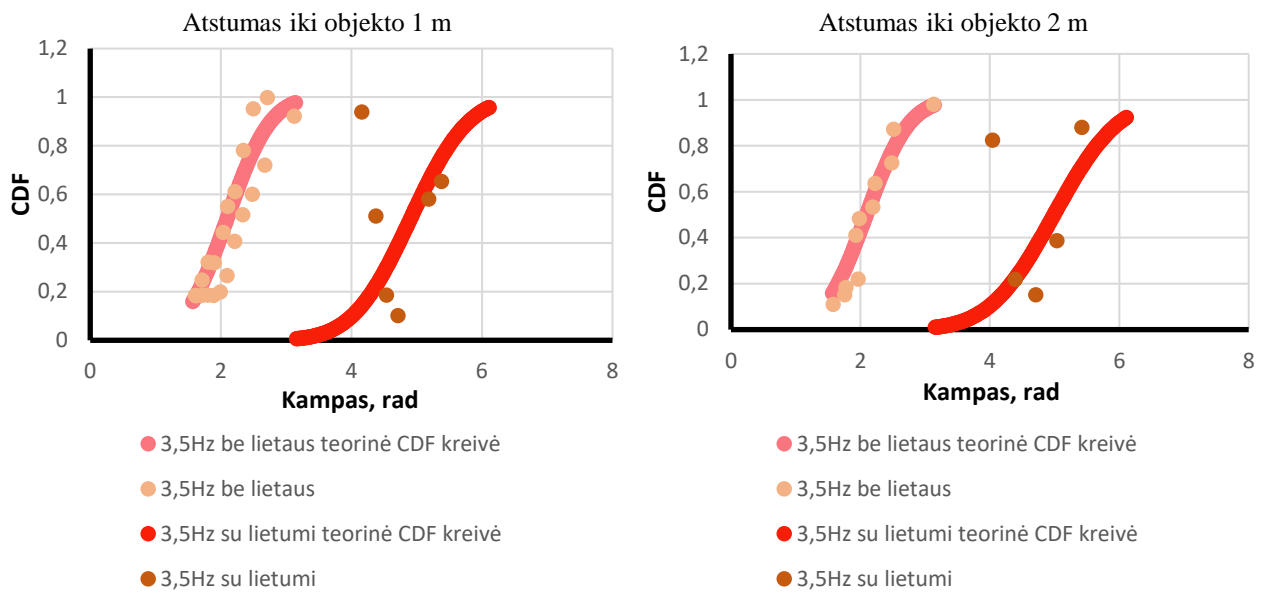
49 pav. Standartiniai nuokrypiai be lietaus ir esant lietai vieno bei dviejų metrų nuotoliuose

Iš 49 pav. pateiktų standartinio nuokrypio diagramų galima teigti, kad naudojant 2 Hz skenavimo dažnį pasireiškia didžiausia dispersija. Mažiausia dispersija gaunama ties 7 Hz, kuri prie 1 m nuotolio yra beveik tris kartus mažesnė už gaunamą nuokrypį prie 2 Hz. Panaši situacija yra prie 2 m nuotolio, tik čia dar labiau pasireiškia lietaus įtaka. Tokiame nuotolyje naudojant 7 Hz skenavimo dažnį nesant lietai dispersija yra beveik 10 kartų mažesnė, o imitavus lietaus ir taikant mažesnę nei 2 Hz skenavimo dažnį, standartinis nuokrypis gali padidėti iki 18 kartų. Iš to daroma prielaida, kad didinant tiriamojo objekto nuotolį prie lietingų oro sąlygų bei taikant mažesnę nei 7 Hz skenavimo dažnį, matavimų nukrypimai tik didės.



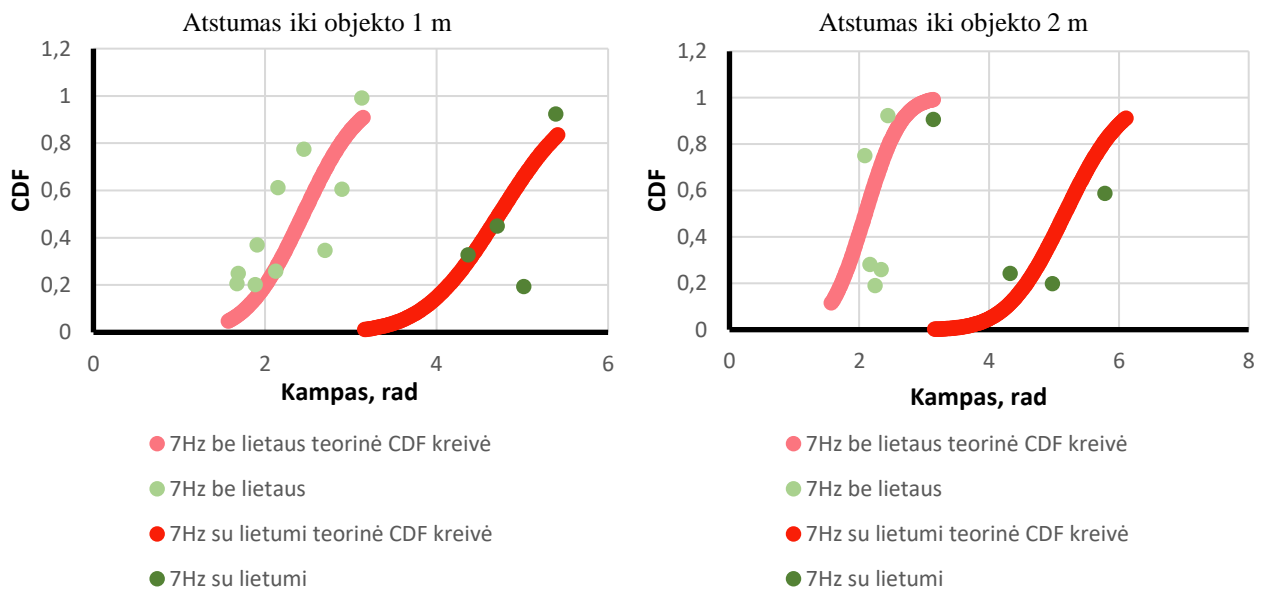
50 pav. Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas vieno ir dviejų metrų nuotoliuose, kai skenavimo dažnis yra 2 Hz

Normaliojo skirstinio kaupiamąjį pasiskirstymą (CDF) grafikai aiškiai parodo matavimų tikslumą prie atitinkamų eksperimento vykdymo sąlygų. Remiantis teorinėmis CDF kreivėmis (žr. 50, 51 ir 52 pav.) didžiausias duomenų neatitikimas pasireiškia naudojant 2 Hz skenavimo dažnį.



51 pav. Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas vieno ir dviejų metrų nuotoliuose, kai skenavimo dažnis yra 3,5 Hz

Taip pat, ryškus duomenų išsibarstymas atsiranda taikant 3,5 Hz skenavimo dažnį (žr. 51 pav.). Tačiau, matavimai nesant lietai yra tikslesni, negu naudojant mažiausią dažnį.



52 pav. Normaliojo skirstinio kaupiamasis pasiskirstymas vieno ir dviejų metrų nuotoliuose, kai skenavimo dažnis yra 7 Hz

Taipogi, lyginant 7 Hz skenavimą, rezultatai labiau artėja prie statesnės CDF teorinės kreivės formos (žr. 52 pav.). Tai reiškia, kad taikant šią dažnio vertę matavimų dispersija tampa minimali, o matavimų rezultatai yra labiau patikimi.

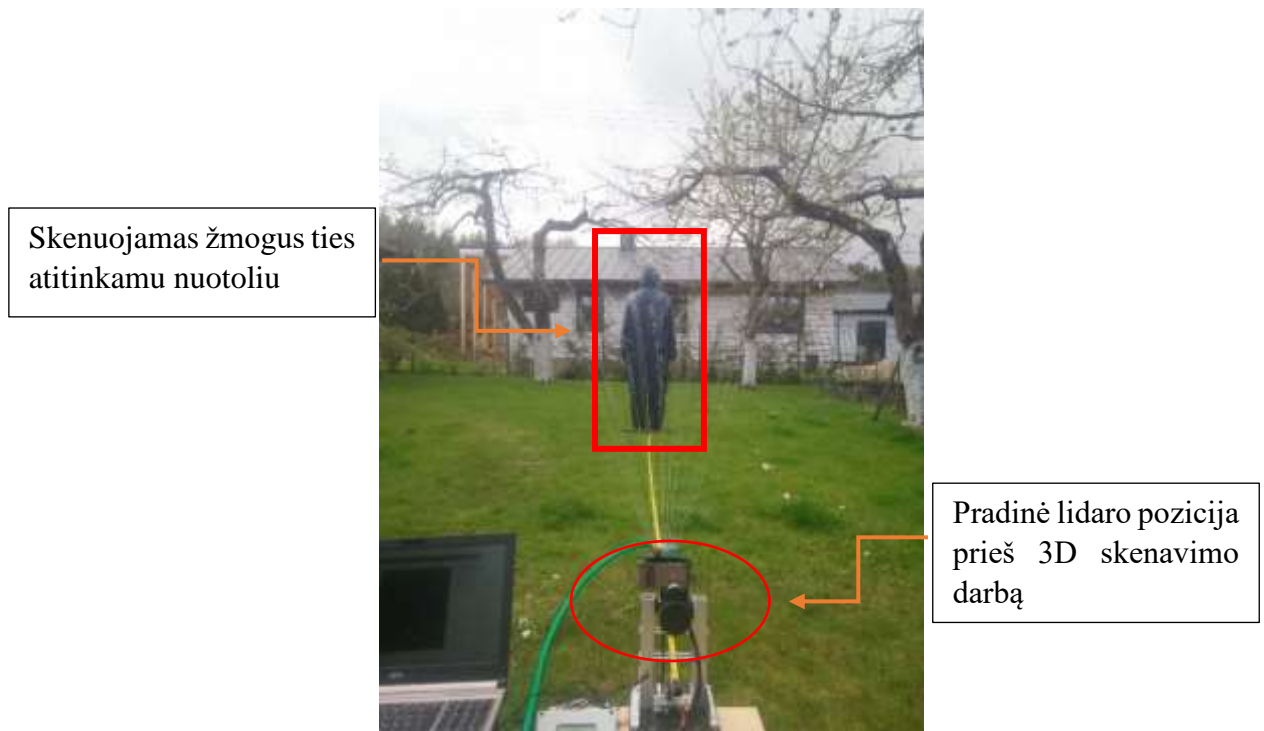
Atlikus eksperimentus gauta, kad skenuojant 135 mm skersmens ir mažesnius kūnus didesniais nei 5-ių metrų atstumais užfiksuojama tik po vieną tašką. Taip nutiko dėl pasiekto ribinio matymo atstumo bei lietaus įtakos, nes lietaus lašeliai pakeičia įprastas aplinkos sąlygas ir pasireiškia paklaidos, kurios nulemia duomenų išsibarstymą (parodyta 51, 52 ir 53 pav.). Lidaro skleidžiamas spindulys pataikęs į lašelį lūžta ir pakeičia sklaidimo kryptį. Tyrimo metu pastebėta, kad šis reiškinys vis labiau progresuoja didinant atstumą tarp lidaro ir tiriamojo objekto, nes kuo didesnis atstumas, tuo didesnis lietaus tankis skiria lidarą ir objektą.

9.4. Eksperimentas Nr. 3

Paskutinis eksperimentas atliekamas siekiant iširti sukurto lidaro eksperimentinio stendo galimybes kurti 3D vaizdus. Tyrimas atliekamas dviem etapais:

- Pirmas etapas – gauti trimatį vaizdą prie gerų oro sąlygų fiksuojant žmogaus siluetą 2,5 ir 5 metrų nuotolyje (žr. 24 pav.).
- Antras etapas – gauti trimatį vaizdą imitavus lietų, kurio intensyvumas siekia 9,84 mm/h. Fiksuojamas tas pats žmogaus siluetas. Eksperimentas atliekamas, kai žmogus stovi toje pačioje vietoje, tokiais pat atstumais nuo skenuojančios optikos (žr. 25 pav.).

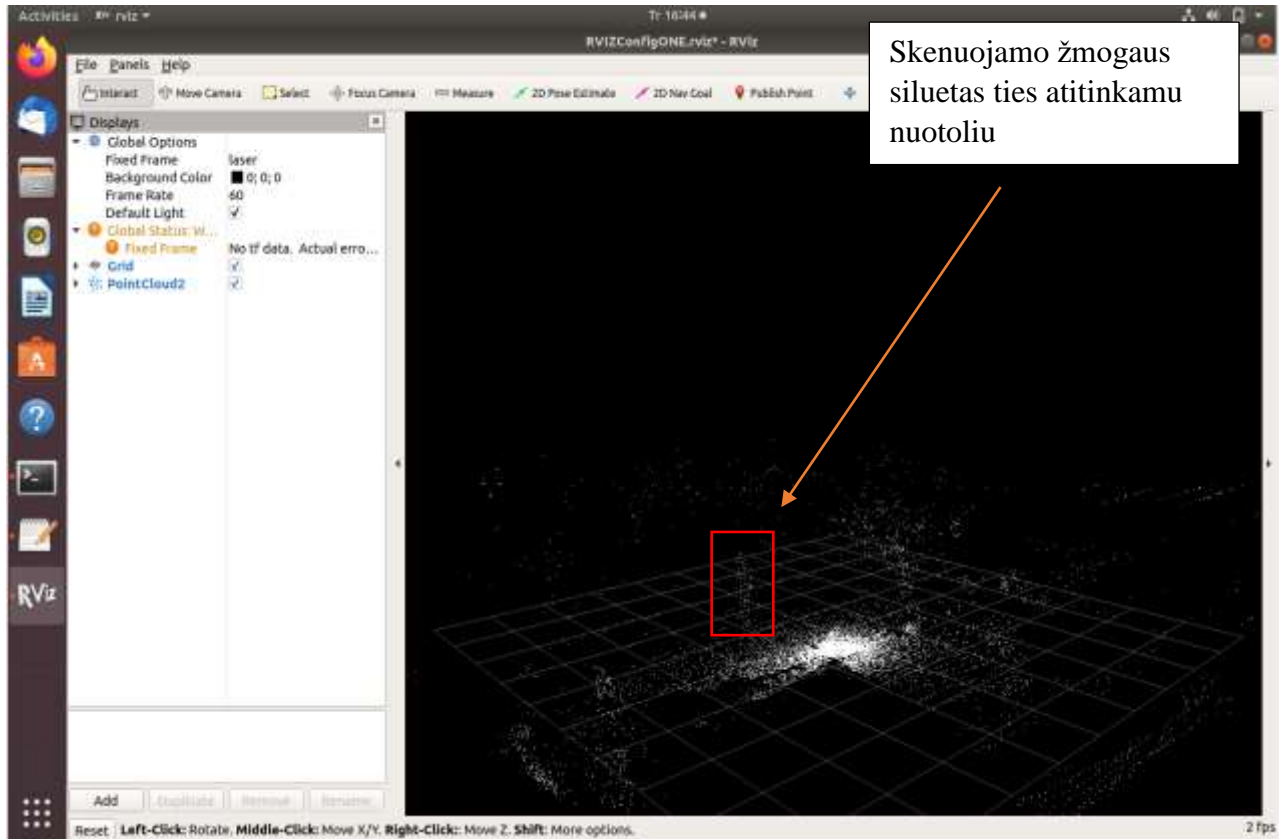
Eksperimentui vykdyti reikalinga įranga yra tokia pati, kaip eksperimento Nr. 2 metu. Trimačio vaizdo kūrimui naudojama ROS „Ubuntu 18.04.5“ operacinėje sistemoje palaikoma programa „RViz“. Eksperimento vykdymas parodytas 53 pav.



53 pav. Eksperimento Nr. 3 eiga

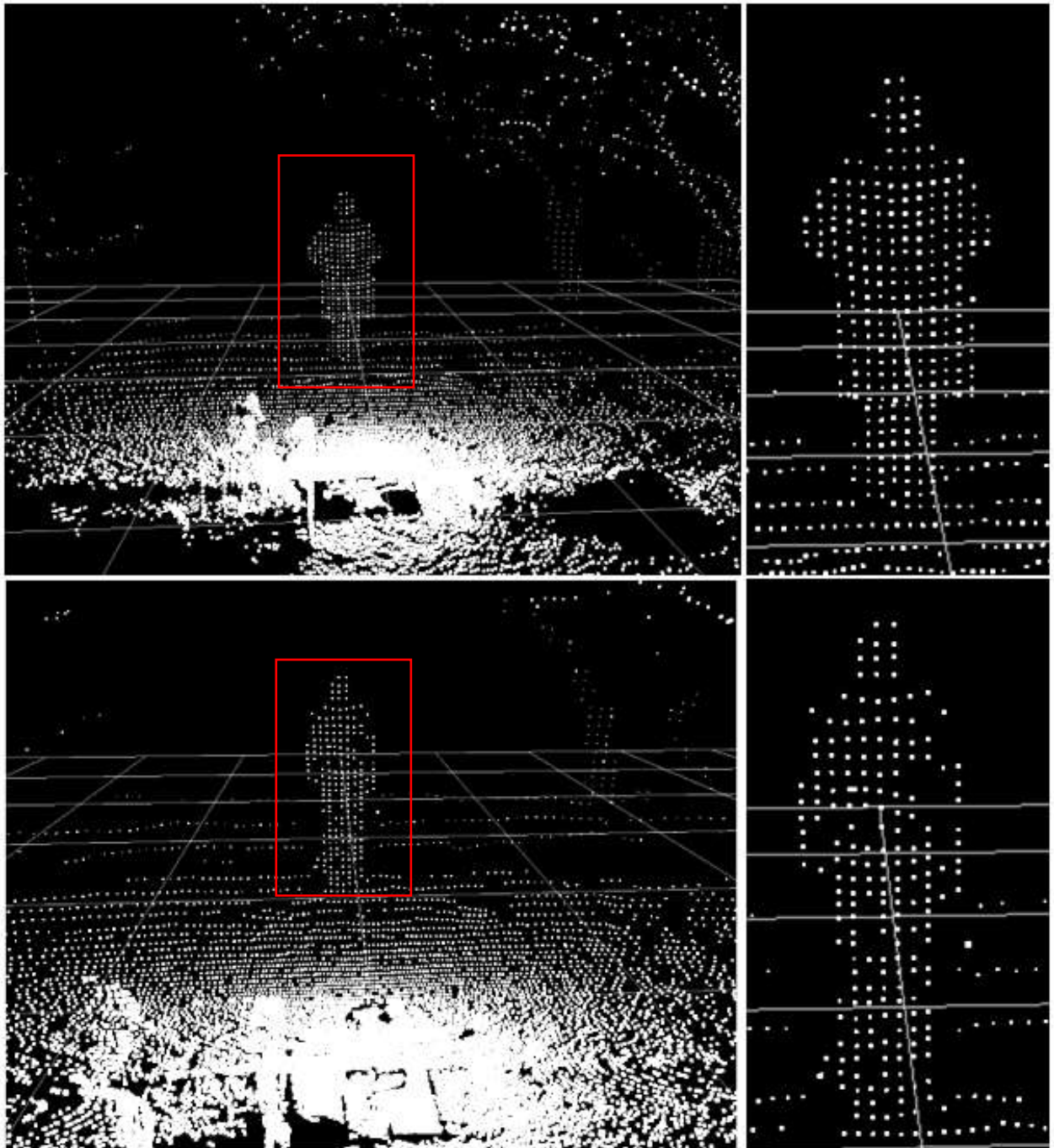
Šio eksperimento pradžioje įjungiamas dirbtinio lietaus šaltinis ir aktyvuojamas lidaro eksperimentinis stendas. Po to, nustatoma skenavimo dažnio reikšmė ties maksimalia 7 Hz riba. Vėliau, įranga prijungiama prie kompiuterio ir paleidžiama programa „RViz“. Pilnai paruošus įrangą,

valdymo pultu aktyvuojama pradinė lidaro 3D skenavimo pozicija (žr. 54 pav.) ir įjungiamas sinchroninis lidaro platformos vertimas 180° kampu. Baigus skenavimo ciklą, gautas aplinkos 3D taškų debesis pateikiamas programos „RViz“ lange (žr. 54 pav.).



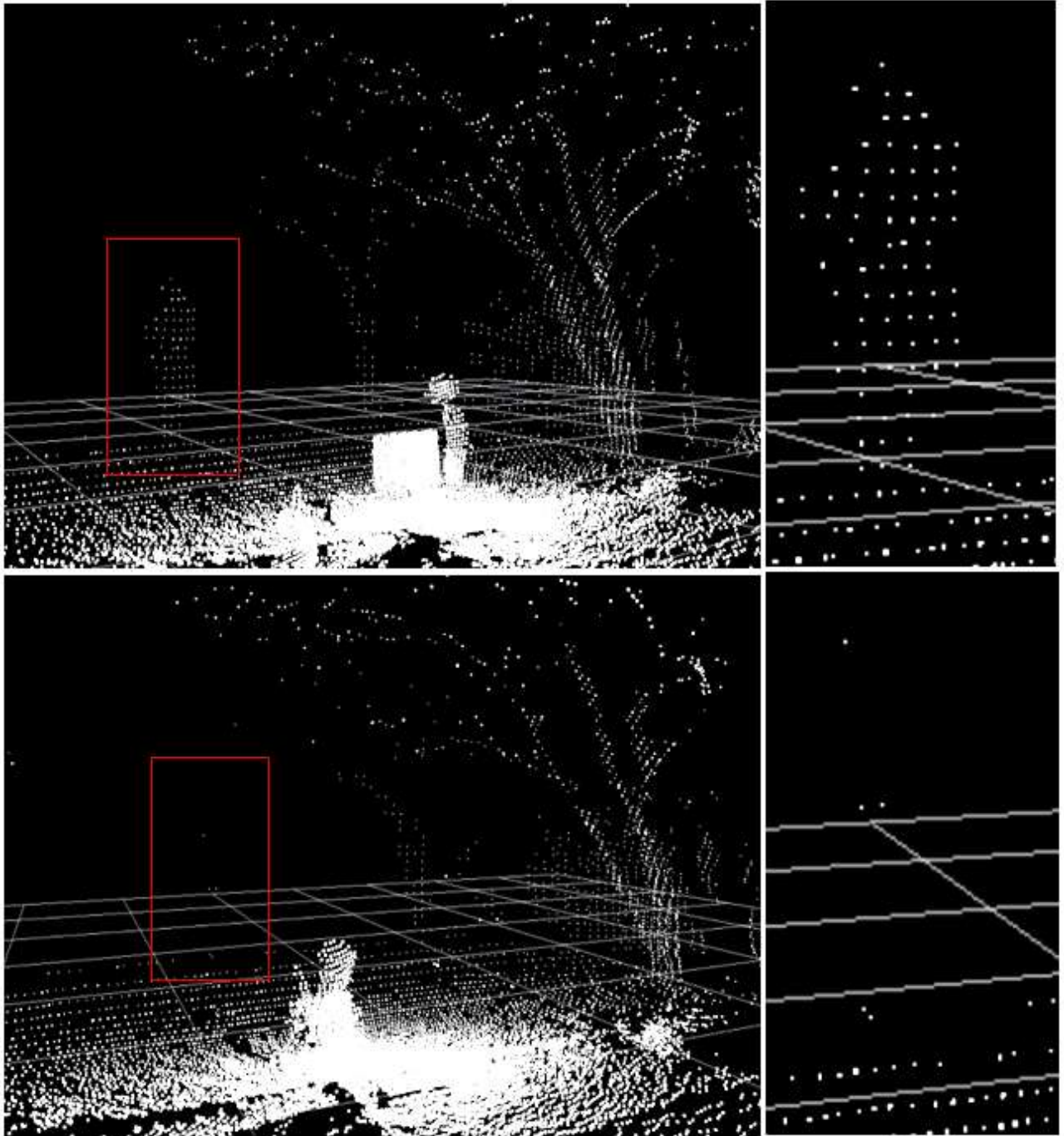
54 pav. Nuskenuotos aplinkos 3D taškų debesis

Remiantis tokiu scenarijumi atliekamas žmogaus silueto užfiksavimas ties atitinkamais nuotoliais (žr. 55 ir 56 pav.).



55 pav. Nuskenutas žmogaus siluetas 2,5 m atstumu prie gerų oro sąlygų (aukščiau) ir imitavus lietu (žemiau)

Skenuojant 2,5 metrų atstumu užfiksuotas žmogaus siluetas prie gerų oro sąlygų ir imitavus lietu. Abiem atvejais gautas skirtingas taškų kiekis vertinant tik žmogaus gautą vaizdą. Taip pat, eksperimentą pakartojus, kai žmogus yra 5 metrų nuotolyje, atkuriamo vaizdo kokybė prie skirtingų aplinkos sąlygų pablogėjo (žr. 56 pav.).



56 pav. Nuskenutas žmogaus siluetas 5 m atstumu prie gerų oro sąlygų (aukščiau) ir imitavus lietų (žemiau) 9-oje lentelėje pateikiama, koks taškų kiekis sudarė fiksuojamo žmogaus silueto taškų debesį tirtais atvejais.

9 lentelė. Atkuriamo žmogaus silueto taškų kiekis

d, m	Prie gerų oro sąlygų i , vnt.	Esant lietai i , vnt.
2,5	270	197
5	77	5

Suskaičiavus gauto žmogaus silueto taškus galima teigti, kad lietus kardinaliai pakeičia atkuriamo vaizdo kokybę. Taškų skirtumas prie 2,5 metrų nuotolio yra 73, o prie 5 metrų skirtumas lygus 72. Blogiausia situacija gaunama 5 metrų nuotolyje esant lietu, nes praktiškai žmogus tampa nebematomas (gauti tik 5 taškai). Šiame nuotolyje atkuriamo žmogaus silueto kokybė esant lietu pablogėja apie 15 kartų.

Išvados

1. Atlikus mokslinių darbų analizę nustatyta, kad lidaro įrenginys jautriai reaguoja į aplinkos sąlygų pasikeitimus. Tačiau, mokslinių tyrimų šioje srityje yra nedaug.
2. Suprojektuotas ir pagamintas „Slamtec RoboPeak A1M8“ valdymo ir duomenų apdorojimo stendas, leidžiantis keisti skenavimo dažnį nuo 2 iki 7 Hz. Šiuo stendu atlikti tyrimai, vertinantys lidaro veikimo galimybes prie įprastų ir lietingų oro sąlygų keičiant tiriamojo objekto nuotolį bei kokybiškai nustatant objekto vaizdą trimatėje erdvėje.
3. Nustatyta, kad lidaras esant normalioms oro sąlygoms tiksliausiai matuoja atstumą prie didesnių skenavimo dažnių. Mažinant skenavimo dažnį matavimo tikslumas mažėja. Tad, esant 5,5 ir 7 Hz dažniams, lidaras 1 m nuotolyje išmatavo, jog objekto atstumas atitinkamai yra 0,998 m ir 0,996 m. Sumažinus skenavimo dažnius iki 2 bei 2,6 Hz atitinkamai gauta 0,944 m ir 0,971 m nuotoliai.
4. Nustatyta, kad esant normalioms oro sąlygoms ir 1 m nuotoliui iki objekto bei vykdant skenavimą dažniais 5,5 arba 7 Hz, gaunamo nuotolio iki objekto paklaidos yra 9 kartus mažesnės. Prie tolimiausio nuotolio, kai yra fiksuojama ne mažiau negu du taškai nuo objekto, paklaidos padidėja, bet vis viena yra maždaug 6-iais kartais mažesnės, negu prie mažiausio skenavimo dažnio (2 Hz).
5. Nustatyta, kad prie lietingų oro sąlygų (9,84 mm/h) esant nedideliams atstumams ($d = 1$ m) tiksliausi matavimo rezultatai gauti, kai skenavimo dažnis yra nemažesnis nei 5,5 Hz, o matavimo paklaidos yra panašios, kaip ir eksperimento metu prie gerų oro sąlygų. Užfiksavus tiriamąjį objektą 1 m nuotolyje, lidaras išmatavo atitinkamai 0,998 m ir 1,009 m atstumus. Tačiau, didinat atstumą tarp lidaro ir objekto, taškų išsibarstymas stipriai padidėja, nes lietaus lašeliai pakeičia įprastas aplinkos sąlygas ir pasireiškia paklaidos, kurios nulemia duomenų išsibarstymą. Nustatyta, kad 6 m nuotolyje tiriamasis objektas tampa nebematomas naudojant 3,5 Hz ir didesnius skenavimo dažnius. Prie mažesnių nei 2,6 Hz dažnių aplinkos žemėlapyje atkuriamo objekto forma prarandama, o išmatuoti atstumai, kai objektas pastatytas tiksliai 1 ir 6 m nuotoliuose nuo lidaro, yra 0,983 m bei 0,978 m ir 5,836 m bei 5,823 m atitinkamai.
6. Nustatyta, kad skenuojant objektą dažniais 5,5 arba 7 Hz esant lietingoms oro sąlygoms, prie tolimiausio nuotolio, kai yra fiksuojama ne mažiau negu du taškai nuo objekto, gaunamos apie 5 kartus mažesnės paklaidos. Remiantis eksperimento rezultatais galima daryti prielaidą, kad didinant tiriamojo objekto nuotolį prie lietingų oro sąlygų bei taikant mažesnę nei 5,5 Hz skenavimo dažnį, matavimų paklaidos stipriai didės.
7. Pastebėta, kad atliekant 3D aplinkos taškų debesies kūrimą, lietingos oro sąlygos kardinaliai pakeičia atkuriamo vaizdo kokybę. Atsižvelgiant į užfiksuotus žmogaus siluetus esant įprastoms ir lietingoms oro sąlygoms (9,84 mm/h), gautas taškų kiekio skirtumas prie 2,5 m nuotolio yra 73, o prie 5 m – 72. Nustatyta, jog prasčiausia situacija susidaro 5 m nuotolyje nuo lidaro esant lietingoms oro sąlygoms, nes atkuriamo žmogaus silueto kokybė pablogėja 15 kartų. Praktiškai žmogaus figūra tampa nebematoma, nes ją atvaizduoja tik 5 taškai.
8. Išnagrinėti moksliniai straipsniai ir šiame darbe atlikti eksperimentai leidžia manyti, kad lidaro matymo kokybės mažėjimo problemai išspręsti lietingomis oro sąlygomis (esant krituliams) tikslinga panaudoti Kalmano filtrą.

Literatūros sąrašas

1. „Technology driving tomorrow’s cars“. Houlin Zhao. 2018 m. vasaris [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
https://www.itu.int/en/itu/news/Documents/2018/2018-02/2018_ITUNews02-en.pdf
2. „Autonomous Vehicle Technology. A Guide for Policymakers“ James M. Anderson, Nidhi Kalra, Karlyn D. Stanley, Paul Sorensen, Constantine Samaras, Oluwatobi A. Oluwatola. 2016 m. [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR400/RR443-2/RAND_RR443-2.pdf
3. „Automotive LIDAR Technology“. Mial E Warren. 2019 m. liepa [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8777993/authors#authors>
4. „Automotive LIDAR“. Heinrich Gotzig, Georg Geduld. 2016 m. gruodis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/302551674_Automotive_LIDAR
5. „2D Mapping and boundary detection using 2D LIDAR sensor for prototyping Autonomous PETIS (Programable Vehicle with Integrated Sensor)“. Hanugra Aulia Sidharta, Wina Permana Sari. 2019 m. kovas [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/331512333_2D_Mapping_and_boundary_detection_using_2D_LIDAR_sensor_for_prototyping_Autonomous_PETIS_Programable_Vehicle_with_Integrated_Sensor
6. „Current Research in Lidar Technology Used for the Remote Sensing of Atmospheric Aerosols“. Adolfo Cameron, Constantino Munoz-Porcar, Francesc Rocabenbosch. 2017 m. birželis [žiūrėta 2020-03-20]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/317714590_Current_Research_in_Lidar_Technology_Used_for_the_Remote_Sensing_of_Atmospheric_Aerosols
7. „LiDAR in Self-Driving Cars“. Babak Shahian Jahromi. 2018 m. vasaris [žiūrėta 2020-03-20]. Prieiga per internetą:
<https://medium.com/@BabakShah/lidar-in-self-driving-cars-cee29db94af7>
8. „The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement“. Xin Wang, HuaZhi Pan, Kai Guo, Xinli Yang, Sheng Lou. 2020 m. [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/502/1/012008/pdf>
9. „Two – wavelength backscattering lidar for stand off detection of aerosols“. Zygmunt Mierczyk, Marek Zygmunt, Andrzej Gawlikowski, Andrzej Gietka. 2008 m. [žiūrėta 2020-03-23]. Prieiga per internetą:
https://www.academia.edu/8038111/Two-wavelength_backscattering_lidar_for_stand_off_detection_of_aerosols
10. „Stable analytical solution for processing lidar returns“. James d. Klett. 2015 m. sausis [žiūrėta 2020-03-23]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/42390067_Stable_analytical_solution_for_processing_lidar_returns
<https://link.springer.com/article/10.1186/s13673-019-0178-5>

11. „Tracking as repeated figure/ground segmentation“. Xiaofeng Ren, Jitendra Malik. 2007 m. birželis [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4270202>
12. „Video segmentation by tracking many figure-ground segments“. Fuxin Li, Taeyoung Kim, Ahmad Humayun, David Tsai, James M. Rehg. 2014 m. kovas [žiūrėta 2020-06-16]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6751383>
13. „Figure-ground segmentation by transferring window masks“. Daniel Kuettel, Vittorio Ferrari. 2012 m. birželis [žiūrėta 2020-06-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/261336413_Figure-ground_segmentation_by_transferring_window_masks
14. „Enhanced ground segmentation method for Lidar point clouds in human-centric autonomous robot systems“. Phoung Minh Chu, Seoungjae Cho, Jisun Park. 2019 m. gegužė [žiūrėta 2020-06-16]. Prieiga per internetą:
15. „Lightweight 3-D Localization and Mapping for Solid-State Lidar“. Han Wang, Chen Wang, Lihua Xie. 2021 m. sausis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2102.03800.pdf>
16. „A Simplified Kalman Filter for Integrated Navigation System with Low-Dynamic Movement“. Xixiang Liu, Jian Sima, Yongjiang Huang, Xianjun Liu, Pan Zhang. 2016 m. rugsėjis [žiūrėta 2020-06-20]. Prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2016/3528146/>
17. „Introduction to Kalman Filter and Its Applications“. Youngjoo Kim, Hyochoong Bang. 2018 m. balandis [žiūrėta 2020-06-20]. Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/books/introduction-and-implementations-of-the-kalman-filter/introduction-to-kalman-filter-and-its-applications>
18. „LiDAR-based SLAM implementation using Kalman filter“. Pawel Slowak, Piotr Kaniewski. 2020 m. vasaris [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11442/114420N/LIDAR-based-SLAM-implementation-using-Kalman-filter/10.1117/12.2564818.full>
19. „Study on analysis from sources of error for Airborne LIDAR“. H. C. Ren, Q. Yan, Zhengjun Liu. 2016 m. lapkritis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/310657690_Study_on_analysis_from_sources_of_error_for_Airborne_LIDAR
20. „The importance of understanding error in lidar digital elevation models“. S. L. Smith, David Holland. 2004 m. sausis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/228986048_The_importance_of_understanding_error_in_lidar_digital_elevation_models
21. „Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems“. R. H. Rasshofer, M. Spies, H. Spies. 2011 m. [žiūrėta 2020-04-03]. Prieiga per internetą: <https://www.adv-radio-sci.net/9/49/2011/ars-9-49-2011.pdf>

22. „Benefits and drawbacks of laser remote sensing in atmospheric research“ Doina Nicolae, Camelia Talianu, Anca Nemuc, Emil Carstea. 2008 m. sausis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/265316786_Benefits_and_drawbacks_of_laser_remote_sensing_in_atmospheric_research
23. „An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles“. Santiago Royo, Maria Ballesta-Garcia. 2019 m. rugsėjis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/336173773_An_Overview_of_Lidar_Imaging_Systems_for_Autonomous_Vehicles
24. „Radar and LiDAR Sensorfusion in Low Visibility Environments“. Paul Fritsche, Simon Kueppers, Gunnar Briese, Bernardo Wagner. 2016 m. sausis [žiūrėta 2021-04-03]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/307879190_Radar_and_LiDAR_Sensorfusion_in_Low_Visibility_Environments
25. „Electromagnetic Scattering on spherical polydispersions“. Diran Deirmendjian. 1969 m. [žiūrėta 2020-04-03]. Prieiga per internetą:
<https://www.rand.org/pubs/reports/R0456.html>
26. „Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors“. Robin Heinzler, Philipp Schindler, Jurgen Seekircher, Werner Ritter, Wilhelm Stork. 2019 m. birželis [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
<https://arxiv.org/abs/1906.07675>
27. „Analysis of Automotive Lidar Sensor Model Considering Scattering Effects in Regional Rain Environments“. Mijung Byeon, Sang Won Yoon. 2020 m. kovas [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9097838>
28. „Mapping with Reflection – Detection and Utilization of Reflection in 3D Lidar Scans“. Xiting Zhao, Zhijie Yang, Soren Schwertfeger. 2020 m. spalio [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
<https://arxiv.org/pdf/1909.12483.pdf>
29. „Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS“. Christopher Goodin, Daniel Carruth, Matthew Doude, Christopher Hudson. 2019 m. sausis [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/330415308_Predicting_the_influence_of_rain_on_LIDAR_in_ADAS
30. „Mapping with Reflection – Detection and Utilization of Reflection in 3D Lidar Scans“. Xiting Zhao, Zhijie Yang, Soren Schwertfeger. 2020 m. spalio [žiūrėta 2021-05-08]. Prieiga per internetą:
<https://arxiv.org/pdf/1909.12483.pdf>
31. „Use of a cognitive simulation model of the driver to support the Virtual Human Centred Design (V-HCD) of ADAS and automated vehicles“. Thierry Bellet, Jean-Charles Bornard, Serge Laverdure. 2018 m. gegužė [žiūrėta 2020-06-16]. Prieiga per internetą:

- https://www.researchgate.net/publication/325466857_Use_of_a_cognitive_simulation_model_of_the_driver_to_support_the_Virtual_Human_Centred_Design_V-HCD_of_ADAS_and_automated_vehicles
32. Paveikslēlis „Pro-SiVIC simulation platform“. Mh'D Yakub Abualhoul, Pierre Merdrignac. 2016 m. rugsējis [žiūrēta 2020-06-16]. Prieiga per internetu: https://www.researchgate.net/publication/308544602_Fig_7_Pro-SiVIC_simulation_platform
 33. „LiDAR sensor simulation in adverse weather condition for driving assistance development“. Mokrane Hadj-Bachir, Philippe de Souza. 2019 m. sausis [žiūrēta 2020-04-27]. Prieiga per internetu: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01998668/document>
 34. „A Brief Survey on SLAM Methods in Autonomous Vehicle“. Talha Takleh Bin Omar Takleh, Nordin Abu Bakar, Shuzlina Abdul Rahman, Zalilah Abd Aziz. 2018 m. lapkritis [žiūrēta 2021-05-08]. Prieiga per internetu: https://www.researchgate.net/publication/329873195_A_Brief_Survey_on_SLAM_Methods_in_Autonomous_Vehicle
 35. „What is SLAM algorithm and why SLAM matters?“. GIS Resources. 2020 m. rugsējis [žiūrēta 2021-01-16]. Prieiga per internetu: <https://www.gisresources.com/what-is-slam-algorithm-and-why-slam-matters/>
 36. „Path Planning for Active SLAM Based on the D* Algorithm with Negative Edge Weights“. Ivan Maurovic, Marija Seder, Kruno Lenac, Ivan Petrovic. 2017 m. kovas [žiūrēta 2021-01-18]. Prieiga per internetu: https://www.researchgate.net/publication/315054156_Path_Planning_for_Active_SLAM_Based_on_the_D_Algorithm_With_Negative_Edge_Weights
 37. „2D Map Building and Path Planning Based on LiDAR“. Junzheng Wang, C. Zhang, M. Yan. 2017 m. lapkritis [žiūrēta 2021-01-18]. Prieiga per internetu: <https://www.semanticscholar.org/paper/2D-Map-Building-and-Path-Planning-Based-on-LiDAR-Zhang-Wang/047e8e18ac926ce861ac49f09e16a2e149aa5ca9>
 38. „An Introduction to Robot Operating System (ROS)“. Yahya Tawil. 2017 m. birželis [žiūrēta 2021-01-18]. Prieiga per internetu: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-robot-operating-system-ros/>
 39. „ROS Introduction“. 2018 m. rugpjūtis [žiūrēta 2021-01-18]. Prieiga per internetu: <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>
 40. „RPLiDAR Low Cost 360 degree 2D Laser Scanner (LIDAR) System Introduction and Datasheet“. RoboPeak 2014 m. balandis [žiūrēta 2020-04-27]. Prieiga per internetu: <https://manualzz.com/doc/8736850/rplidar-low-cost-360-degree-2d-laser-scanner--lidar--system>
 41. „RPLiDAR Low Cost 360 degree Laser Range Scanner Introduction and Datasheet“. Slamtec. 2016 m. liepa [žiūrēta 2020-04-10]. Prieiga per internetu: <https://www.generationrobots.com/media/rplidar-a1m8-360-degree-laser-scanner-development-kit-datasheet-1.pdf>

42. „RPLiDAR A1 Development Kit User Manual“. Slamtec. 2016 m. liepa [žiūrēta 2021-02-11]. Prieiga per internetą:
http://bucket.download.slamtec.com/e680b4e2d99c4349c019553820904f28c7e6ec32/LM108_SLAMTEC_rplidarkit_usermaunal_A1M8_v1.0_en.pdf
43. „STM32F103x8 / STM32F103xB datasheet“. ST Microelectronics. 2015 m. rugpjūtis [žiūrēta 2021-02-10]. Prieiga per internetą:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
44. „MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2“. InvenSense Inc. 2013 m. rugpjūtis [žiūrēta 2021-02-10]. Prieiga per internetą:
<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>
45. „MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo“. Components 101. [žiūrēta 2021-02-10]. Prieiga per internetą:
<https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor-datasheet>
46. „PCF8574; PCF8574A product data sheet“. NXP. 2013 m. gegužė [žiūrēta 2021-02-11]. Prieiga per internetą:
https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF8574_PCF8574A.pdf

Priedai

1 priedas. Eksperimento Nr. 1 rezultatai

Lentelėje naudojami ženkliniai: d – atstumas iki tiriamojo objekto, f – skenavimo dažnis, i – taškų skaičius, $d_{i=1\ mat}$ – užfiksuoto artimiausio taško iki kliūtis nuotolis, RMS_{vid} – matavimų vidutinė kvadratinė paklaida, σ_{vid} – matavimų dispersija.

10 lentelė. Eksperimento rezultatai prie gerų oro sąlygų

d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1\ mat}$, mm	RMS_{vid} , ± mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
1000	2	49	943,93	44,467	7,837	<p>Matavimai, kai $d = 1$ m</p>
	2,6	29	970,96	23,097	5,946	
	3,5	21	974,90	20,081	6,671	
	4,3	17	986,98	8,564	3,796	
	5,5	13	997,95	4,809	4,393	
	7	10	995,77	4,589	2,886	
2000	2	29	1936,00	42,629	16,768	<p>Matavimai, kai $d = 2$ m</p>
	2,6	16	1978,74	17,504	3,387	
	3,5	11	1997,00	7,706	5,724	
	4,3	8	1996,99	2,865	2,305	
	5,5	7	1998,99	1,794	1,300	
	7	5	1999,91	1,774	1,736	

d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1\text{ mat}}$, mm	RMS_{vid} , \pm mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
3000	2	20	2880,99	77,724	28,409	<p>Matavimai, kai $d = 3$ m</p>
	2,6	10	2957,92	23,102	16,354	
	3,5	6	2961,81	19,727	14,422	
	4,3	5	2991,96	4,272	2,168	
	5,5	3	2998,91	0,831	0,382	
	7	3	3002,96	2,824	0,374	
4000	2	12	3915,85	64,441	18,092	<p>Matavimai, kai $d = 4$ m</p>
	2,6	6	3979,99	17,334	6,024	
	3,5	3	3987,99	12,519	0,453	
	4,3	4	4016,89	13,076	4,426	
	5,5	3	4009,00	10,584	4,666	
	7	2	4011,71	10,194	2,144	

d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1\text{ mat}}$, mm	RMS_{vid} , ± mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
5000	2	7	4966,97	26,339	11,443	<p>Matavimai, kai $d = 5$ m</p>
	2,6	3	4979,99	14,001	11,249	
	3,5	2	5011,84	10,522	1,869	
	4,3	2	5003,99	7,009	4,264	
	5,5	1	5012,42	10,878	-	
	7	1	5024,41	20,502	-	
6000	2	10	5884,78	82,033	36,745	<p>Matavimai, kai $d = 6$ m</p>
	2,6	4	5900,97	82,820	14,879	
	3,5	3	5922,99	80,886	3,402	
	4,3	2	5923,89	80,662	6,442	
	5,5	1	5981,90	20,227	-	
	7	1	5945,83	54,173	-	

2 priedas. Eksperimento Nr. 2 rezultatai

11 lentelė. Eksperimento rezultatai imitavus lietu

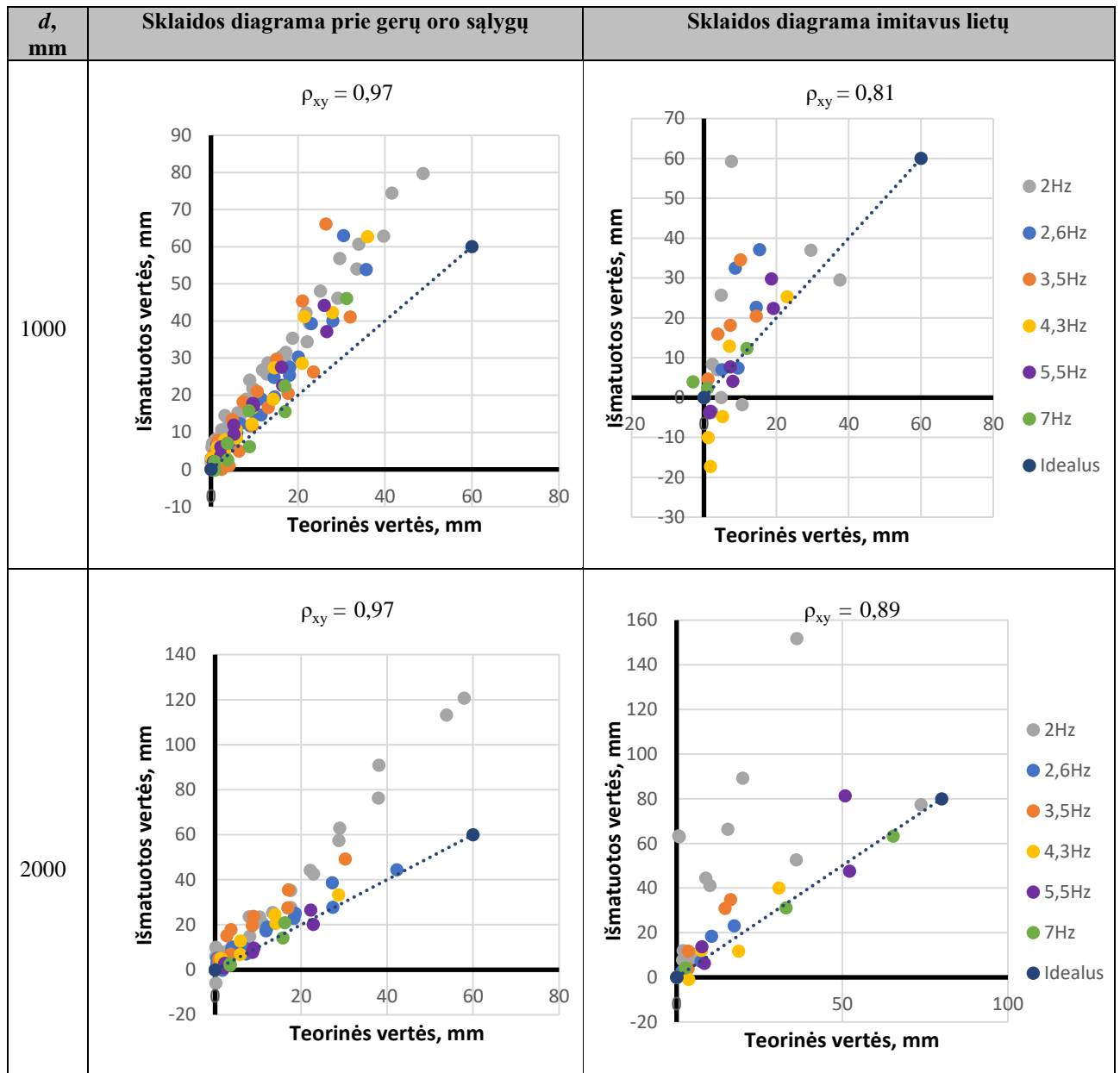
d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_{i=1 \text{ mat.}}$, mm	RMS_{vid} , ± mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
1000	2	10	983,10	16,739	10,104	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 1 \text{ m}$</p>
	2,6	6	978,00	13,658	10,359	
	3,5	6	973,80	16,735	8,589	
	4,3	6	990,68	8,050	4,656	
	5,5	7	997,95	4,418	3,925	
	7	4	1009,05	8,178	3,256	
2000	2	14	1893,76	73,800	31,115	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 2 \text{ m}$</p>
	2,6	6	1932,49	65,044	3,489	
	3,5	5	1950,28	40,988	8,615	
	4,3	5	1973,68	25,205	6,546	
	5,5	5	1983,80	15,940	4,076	
	7	4	1996,40	6,503	1,737	

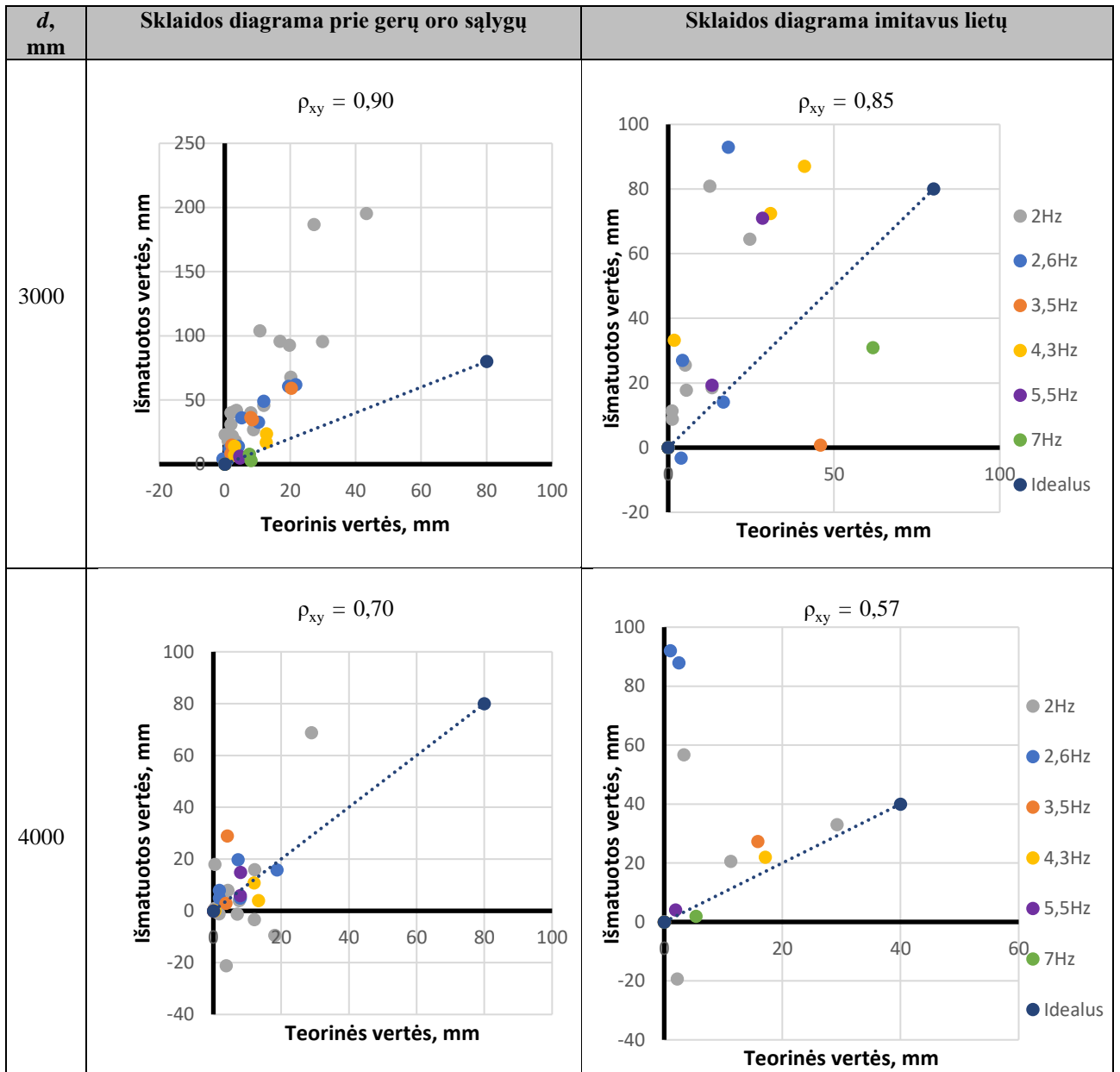
d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_i = 1 \text{ mat}$, mm	RMS_{vid} , \pm mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
3000	2	8	2884,51	94,980	22,876	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 3$ m</p> <p>Y, mm</p> <p>X, mm</p> <ul style="list-style-type: none"> Tiriamasis objektas >2Hz 2,6Hz 3,5Hz 4,3Hz 5,5Hz 7Hz
	2,6	5	2945,27	42,801	15,549	
	3,5	2	2968,69	37,804	10,299	
	4,3	4	2964,21	14,026	16,056	
	5,5	3	2985,49	17,128	9,582	
	7	2	2989,95	25,430	21,752	
4000	2	5	3848,22	123,432	27,437	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 4$ m</p> <p>Y, mm</p> <p>X, mm</p> <ul style="list-style-type: none"> Tiriamasis objektas >2Hz 2,6Hz 3,5Hz 4,3Hz 5,5Hz 7Hz
	2,6	3	3858,22	83,230	51,037	
	3,5	2	3972,43	21,818	8,137	
	4,3	2	3998,75	2,431	1,673	
	5,5	2	4033,95	27,346	1,565	
	7	2	4039,00	23,926	2,403	

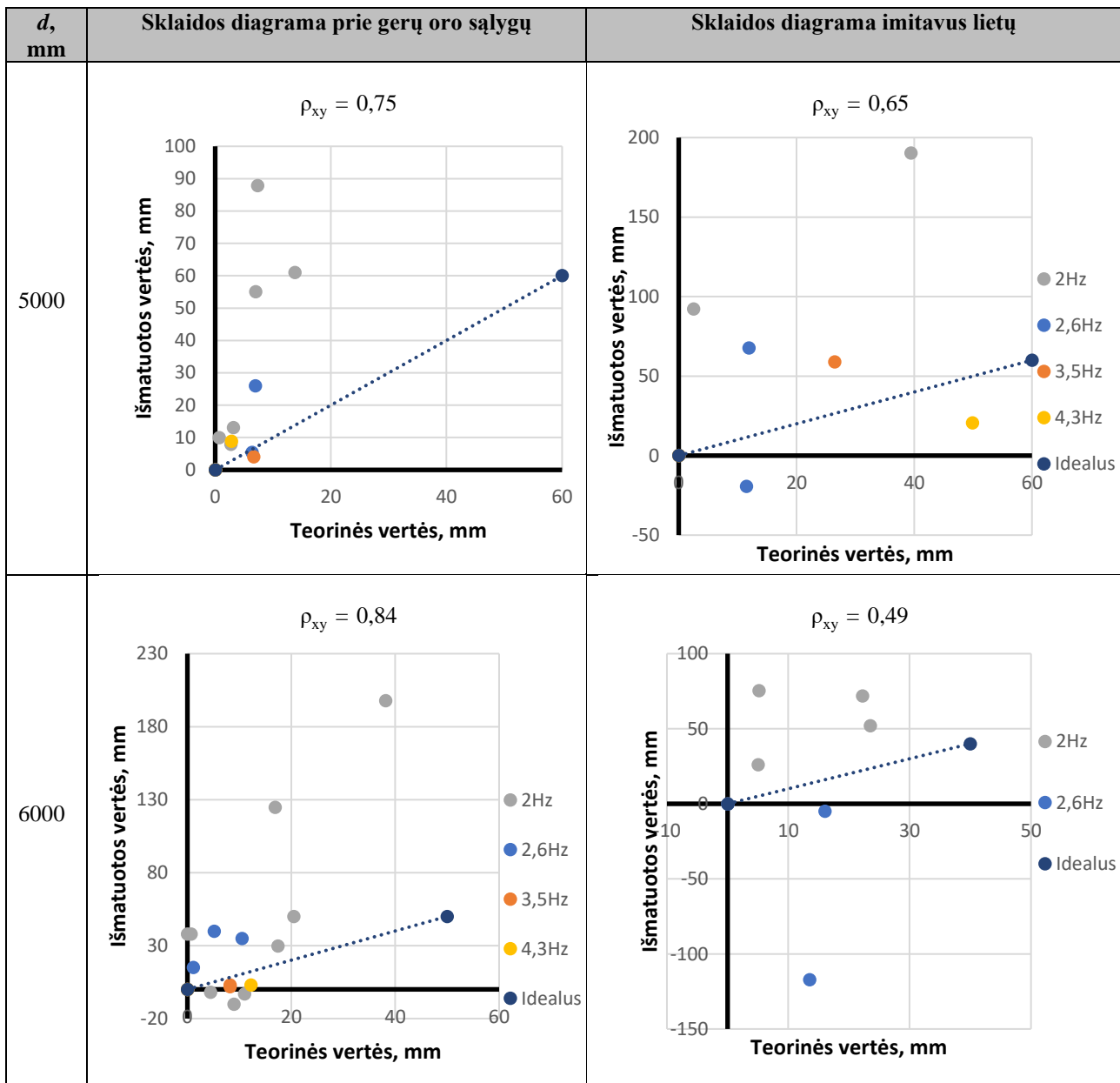
d , mm	f , Hz	i , vnt.	$d_i = 1 \text{ mat}$, mm	RMS_{vid} , \pm mm	σ_{vid} , mm	Atkurtas objekto vaizdas (idealaus atvejo lyginimas su matavimais)
5000	2	3	4843,49	76,379	75,846	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 5$ m</p> <p>● Tiriamasis objektas ● >2Hz ● 2,6Hz ● 3,5Hz ● 4,3Hz ● 5,5Hz ● 7Hz</p>
	2,6	3	4945,61	40,556	23,073	
	3,5	2	4971,48	16,200	17,421	
	4,3	2	4968,00	46,704	20,715	
	5,5	1	4983,59	31,137	-	
	7	1	4976,16	30,459	-	
6000	2	5	5836,29	129,825	26,977	<p>Matavimai imitavus lietu, kai $d = 6$ m</p> <p>● Tiriamasis objektas ● >2Hz ● 2,6Hz ● 3,5Hz ● 4,3Hz ● 5,5Hz ● 7Hz</p>
	2,6	3	5823,00	110,360	70,211	
	3,5	1	5989,07	35,633	-	
	4,3	1	6054,31	34,449	-	
	5,5	1	6052,10	23,182	-	
	7	1	5989,49	11,225	-	

3 priedas. Eksperimentų Nr. 1 ir Nr. 2 sklaidos diagramos

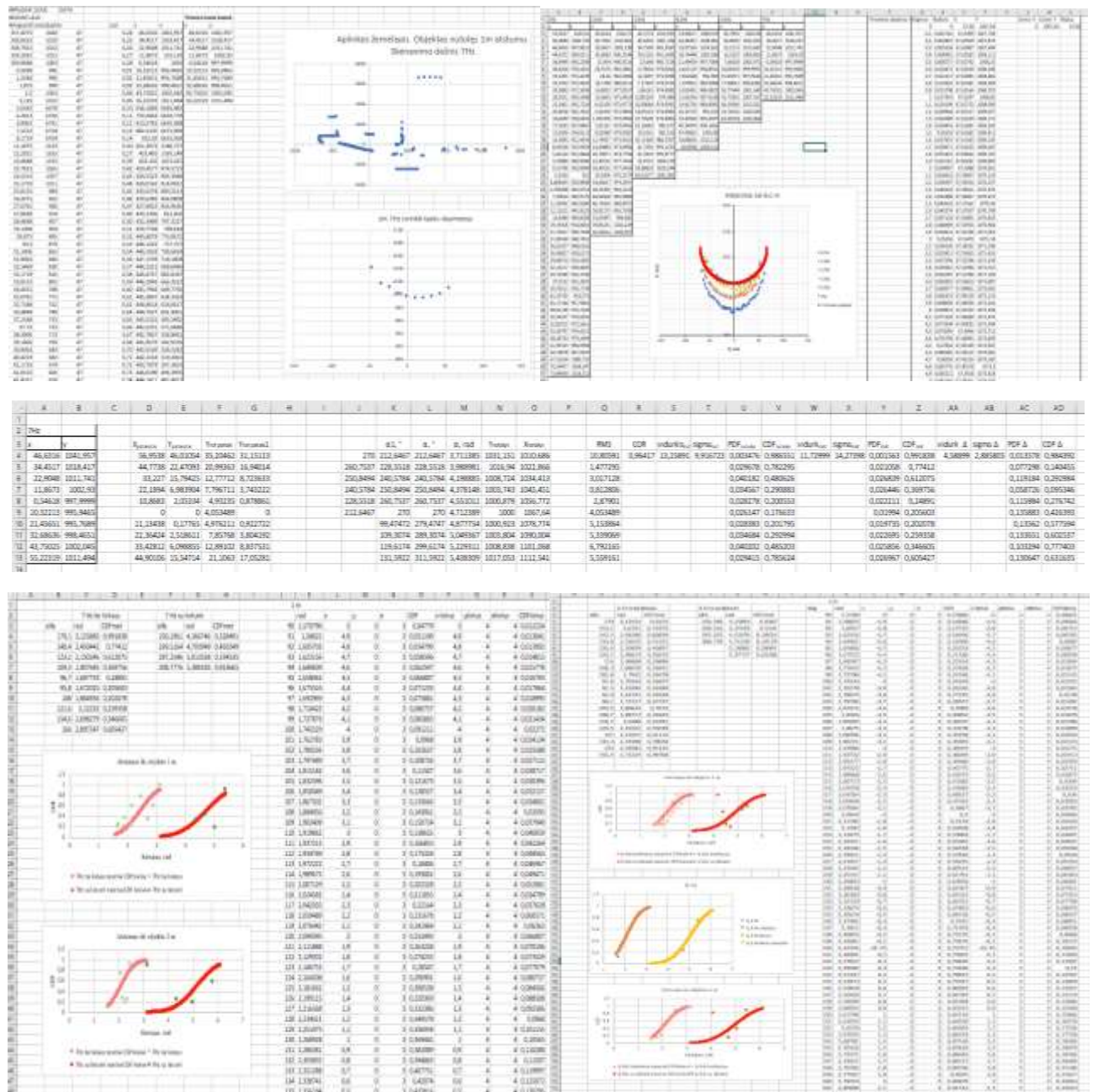
12 lentelė. Sklaidos diagramos







4 priedas. Duomenų apdorojimo pavyzdys su „Microsoft Excel“ programa



5 priedas. Sertifikatas



SERTIFIKATAS

už dalyvavimą neformalaus ugdymo(si) veiklose.

Šiuo sertifikatu pažymima, kad

Lukas Jazokas

vykdydamas žinių ir patirties sklaidą dalyvavo
šiose veiklose



Renginio TECHNORAMA dalyvis

Už dalyvavimą Kauno technologijos universiteto organizuotoje virtualioje parodoje "Technorama" 2020. Renginio metu buvo siekiama praplėsti su technologiniais sprendimais dirbančių jaunųjų mokslininkų, tyrėjų ir startuolių technologinių ar vadybinių idėjų akiratį bei praktiškai įgyvendinti ir realizuoti unikalias idėjas.

Dalyvavimo veiklose pradžia
2020-10-07

Sertifikato išdavimo data
2020-10-08

Sertifikato numeris
A6C62BUT5K

Šis sertifikatas yra unikalus dokumentas, automatiškai sugeneruotas Badgecraft.eu pasiekimų platformoje. Sertifikato tikrumą galima patikrinti badgecraft.eu/certificates.