



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Uždarų erdvių trimačio lazerinio skenavimo rezultatų
informacinių parametrų tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Rimas Bacevičius

Projekto autorius

Doc. Dr. Pranas Kuzas

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Uždarų erdvių trimačio lazerinio skenavimo rezultatų informacinių parametrų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Rimas Bacevičius

Projekto autorius

Doc. Dr. Pranas Kuzas

Vadovas

Dr. Asta Meškuotienė

Recenzentė

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rimas Bacevičius

Uždarų erdvių trimačio lazerinio skenavimo rezultatų informacinių parametrų tyrimas

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis 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. tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Rimas Bacevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Bacevičius, Rimas. Uždarų erdvių lazerinio skenavimo rezultatų informacinių parametru tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Pranas Kuzas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: 3D lazerinis skenavimas, taškų debesis, informaciniai parametrai, kritimo kampas, atstumas, taškų tankis, RMS paklaida, kuro talpa, kalibravimas, tūrio matavimas.

Kaunas, 2025. 64p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame projekte nagrinėjamas trimačio (3D) lazerinio skenavimo metodo taikymas uždarų erdvių, konkrečiai – horizontalių kuro talpų, geometrijai ir tūriui nustatyti. Darbo tikslas – įvertinti horizontalios kuro talpos trimačio lazerinio skenavimo rezultato (taškų debesis) informatyvumo erdvinį pasiskirstymą, analizuojant pagrindinių informacinių parametru įtaką matavimų kokybei.

Darbe apžvelgiami tradiciniai ir modernūs kuro talpų kalibravimo metodai, 3D lazerinio skenavimo principai ir technologiniai iššūkiai. Tyrimo metodika apima 3D taškų debesis surinkimą naudojant lazerinį skenavimo įrenginį, duomenų apdorojimą taikant sukurtus ir adaptuotus algoritmus (skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas, pjūvių perimetro skaičiavimas ir segmentavimas, paviršiaus orientacijos ir kritimo kampo nustatymas, lokalaus paviršiaus aproksimavimo paklaidos (RMS) įvertinimas). Atlikta detali gautų parametru statistinė analizė (histogramos, šilumos žemėlapiai, koreliacinė analizė), siekiant nustatyti jų tarpusavio ryšius ir įtaką matavimo kokybei.

Tyrimo rezultatai parodė, kad lazerio kritimo kampas, atstumas iki paviršiaus ir taškų tankis daro statistiškai reikšmingą įtaką 3D skenavimo rezultatų tikslumui. Nustatytas optimalus kritimo kampų ir atstumo diapazonas, kuriame gaunami patikimiausi rezultatai. Nustatyta, kad didesnis taškų tankis leidžia stabiliau įvertinti paviršiaus parametrus. Nustatytos tendencijos išlieka nuoseklios analizuojant skirtingo dydžio talpas.

Šis darbas kiekybiškai įvertina informacinių parametru įtaką 3D skenavimo tikslumui kuro talpų kalibravimo kontekste ir pateikia metodologinį pagrindą skenavimo bei duomenų apdorojimo procesų optimizavimui.

Bacevičius, Rimas. Investigation of Information Parameters of 3D Laser Scanning Results of Closed Spaces. Master's Final Degree Project / Supervisor Assoc. Prof., Pranas Kuzas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: 3D laser scanning, point cloud, information parameters, incident angle, distance, point density, RMS error, fuel tank, calibration, volume measurement.

Kaunas, 2025, 64 p.

Summary

This master's final project examines the application of three-dimensional (3D) laser scanning methods for determining the geometry and volume of enclosed spaces, specifically horizontal fuel tanks. The aim of the work is to evaluate the spatial distribution of data quality/uncertainty in the 3D laser scanning result (point cloud) of a horizontal fuel tank by analyzing the influence of key information parameters on measurement quality.

The paper reviews traditional and modern fuel tank calibration methods, 3D laser scanning principles, and technological challenges. The research methodology includes collecting 3D point cloud data using a laser scanner and processing the data using developed and adapted algorithms (determining the scanning device position, calculating and segmenting the cross-section perimeter, determining surface orientation and incidence angle, evaluating local surface approximation error (RMS)). Detailed statistical analysis of the obtained parameters was performed (histograms, heat maps, correlation analysis) to determine their interrelationships and impact on measurement quality.

Research results showed that the laser incidence angle, distance to the surface, and point density have a statistically significant impact on the accuracy of 3D scanning results. An optimal range of incidence angles and distances was determined, within which the most reliable results are obtained. It was found that higher point density allows for more stable evaluation of surface parameters. The identified trends remain consistent when analyzing tanks of different sizes.

This work quantitatively evaluates the influence of information parameters on 3D scanning accuracy in the context of fuel tank calibration and provides a methodological basis for optimizing scanning and data processing procedures.

Įvadas	7
1. Aktualumas	9
2. Lazerinis 3D skenavimas	12
2.1. 3D duomenų apdorojimo būdai	13
3. Kuro talpų kalibravimo metodai, standartai ir iššūkiai	15
3.1. Tradiciniai geometrinio kalibravimo metodai	15
3.2. 3D lazerinio skenavimo kalibravimo metodai.....	16
4. 2D duomenų surinkimo ir apdorojimo eksperimentas	19
4.1. RPLIDAR-A1 jutiklio ypatumai ir duomenų apdorojimo iššūkiai	19
4.2. Dinaminio atsako tyrimo eksperimentas	20
4.3. Dvimačio (2D) skenavimo eksperimentas ir rezultatų analizė.....	22
4.3.1. Eksperimento sąranga ir eiga.....	23
4.3.2. Duomenų apdorojimo procesas	24
4.3.3. Eksperimento rezultatų išvados	25
5. Horizontalios kuro talpos 3D duomenų apdorojimas	27
5.1. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymo algoritmas sintetiniu būdu paruoštame taškų debesyje	27
5.1.1. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas duomenų pjūvyje	27
5.1.2. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas erdvėje	29
5.2. Perimetro apskaičiavimo algoritmas	31
5.3. Paviršiaus orientacijos nustatymo algoritmas	32
5.3.1. Plokštumos pritaikymas segmentui	32
5.3.2. Lazerio kritimo kampo skaičiavimas.....	33
5.3.3. Rezultatai.....	33
5.4. Duomenų analizės algoritmai realaus skenavimo metu gautiems taškų debesims.....	37
5.4.1. Skerspjūvio analizė.....	38
5.4.2. Visos kuro talpos erdvėje analizė	41
5.4.3. Segmentų analizė.....	43
5.4.4. Segmentų šiluminis žemėlapis ir histogramos	46
5.4.5. Vertikalių pjūvių analizė	54
5.4.6. Skirtingų talpų analizės rezultatų palyginimas.....	56
Išvados	58
Literatūros sąrašas	59
Priedai	61
1 priedas. Vizualizacijos kodas Python kalba	61

Ivadas

Tikslus kuro atsargų valdymas ir apskaita yra kritiškai svarbūs naftos produktų pramonėje tiek ekonominiu, tiek teisiniu požiūriu. Pagrindinis įrankis šiam tikslui pasiekti yra periodiškai kuro talpyklų tūrio kalibravimas. Tradiciškai plačiai taikomas tūrinis, užpildymo skysčiu, metodas, nors ir laikomas etaloniniu, turi reikšmingų praktinių trūkumų: jis reikalauja didelių laiko, logistikos sąnaudų, sukelia produkto taršos riziką bei neišvengiamai generuoja didelius kiekius užteršto vandens. Be to, šis metodas neleidžia tiesiogiai įvertinti talpos vidinės geometrijos pokyčių ar lokalių deformacijų. Alternatyvus, geometrinis 3D skenavimu pagrįstas kalibravimo metodas siūlo šių problemų sprendimą. Tai bekontaktis metodas, leidžiantis greitai surinkti detalią erdvinę informaciją apie talpos vidinį paviršių (taškų debesį), eliminuojant skysčio naudojimo poreikį ir su juo susijusias problemas.

Nepaisant 3D lazerinio skenavimo privalumų, praktikoje pastebima, kad taikant skirtingus kalibravimo metodus, gaunami rezultatai nėra identiški. Šį neatitikimą lemia tiek pačių metodų principiniai skirtumai, tiek specifiniai veiksniai, būdingi lazeriniam skenavimui. Skenavimo rezultatų kokybė ir patikimumas priklauso nuo daugelio veiksnių: lazerio spindulio ir skenuojamo paviršiaus sąveikos (paviršiaus medžiagos atspindžio koeficiento, šiurkštumo, užterštumo), aplinkos sąlygų, pačios skenavimo įrangos parametrų bei matavimo objekto geometrijos. Pastarieji veiksniai – atstumas iki matuojamo taško ir lazerio kritimo kampas į paviršių – yra vieni iš esminių informacinių parametrų, tiesiogiai veikiantys gauto taškų debesies charakteristikas, tokius kaip taškų tankis ir erdvinis išsibarstymas. Šių parametrų įtakos nepaisymas arba netinkamas įvertinimas lemia padidėjusią matavimo rezultatų (ir tuo pačiu talpyklos kalibravimo) neapibrėžtį ir galimus sisteminius nuokrypius galutiniame tūrio įvertyje. Aktualumas ir pagrindinė šio darbo keliami problema yra šių informacinių parametrų įtakos lazerinio skenavimo rezultatams tyrimas, siekiant geriau suprasti metodo galimybes, ribotumus ir taikant šiuolaikiškus duomenų apdorojimo algoritmus, vizualizuoti stebimus rezultatų skirtumus lyginant su tradiciniais metodais.

Atsižvelgiant į tai, šio darbo tikslas – įvertinti horizontalios kuro talpos trimačio lazerinio skenavimo rezultato (taškų debesies) nuokrypių erdvinį pasiskirstymą, analizuojant pagrindinių geometrijų informacinių parametrų įtaką matavimų kokybei.

Darbo pagrindiniai uždaviniai:

1. Apžvelgti ir susisteminti mokslinę bei techninę literatūrą, susijusią su lazerinio skenavimo įrenginiais, technologijomis, jų parametrais, taškų debesies apdorojimo bei talpų kalibravimo metodais.
2. Eksperimentiškai ištirti dvimačio skenavimo rezultato, gauto lazeriniu metodu, dinامينius nuokrypius, jų priklausomybes nuo skenuojamo paviršiaus kampo ir atstumo, siekiant įvertinti bazinius lazerinio atstumo ir kampo matavimo įrangos apribojimus.
3. Sukurti programinius algoritmus ir įrankius trimačio skenavimo rezultatų (taškų debesies) importavimui, pirminiam apdorojimui (pvz., skenavimo įrenginio pozicijos nustatymui, perimetro radimui), parametrų (kritimo kampo, RMS paklaidos) skaičiavimui ir vizualizavimui.

4. Ištirti eksperimentiškai išmatuoto trimačio taškų debesies erdvinį duomenų išsibarstymą, taikant aproksimavimo plokštumomis metodą ir skaičiuojant statistinius kokybės įverčius (RMS paklaidą) skirtinguose skenuojamos talpos segmentuose.
5. Vizualizuoti ir analizuoti erdvinio duomenų išsibarstymo statistinių įverčių pasiskirstymą visoje talpos erdvėje, įvertinant jų sąsajas su informaciniais parametrais (atstumu, kritimo kampu, taškų tankiu) iš lazerinio skenavimo įrenginio perspektyvos.

Šiame darbe bus pristatyta tyrimo metodika, detalizuojanti duomenų apdorojimo žingsnius ir parametrų skaičiavimo principus, pateikta išsami gautų rezultatų analizė, atskleidžianti informacinių parametrų įtakos dėsningumus, ir suformuluotos išvados apie 3D lazerinio skenavimo metodo taikymo ypatumus bei tikslumo ribas kalibruojant uždaras erdves.

1. Aktualumas

Kuro talpyklų vystymosi istorija neatsiejama nuo naftos pramonės augimo ir kintančių visuomenės poreikių, susijusių su energijos saugojimu ir transportavimu. Šios raidos supratimas suteikia esminį kontekstą dabartinei praktikai, problemoms ir tikslaus matavimo bei tikrinimo būtinybei.

Nuo XIX amžiaus pabaigos atsiradus rafinuotiems naftos produktams, tokiems kaip žibalas, o vėliau benzinai, iš pradžių saugojimui ir gabenimui buvo naudojama daug medinių statinių ir mažų, dažnai kniedytų metalinių talpyklų. Augant paklausai, populiarėjant vidaus degimo varikliams ir pramoniniam naudojimui, prireikė didesnių specialių saugojimo sprendimų. Ankstyvosios cisternos dažniausiai buvo paprastos cilindro formos plieninės arba geležinės konstrukcijos, dažnai su pritvirtintais stogais. Projektavimo ir konstravimo metodai buvo primityvūs. Su šiomis ankstyvosiomis konstrukcijomis buvo susijusi didelė rizika dėl nuotėkio ar gaisro pavojaus.

Po Antrojo pasaulinio karo smarkiai išaugus pasauliniam energijos suvartojimui, kurį lėmė pramonės augimas, automobilių ir aviacijos plėtra, reikėjo labai išplėsti saugojimo infrastruktūrą. Suvirintos plieninės konstrukcijos tapo standartu, užtikrinančiu geresnį vientisumą nei kniedytos konstrukcijos. Atsirado medžiagų ir konstrukcijų standartai, pavyzdžiui, Amerikos naftos instituto standartai, ypač API 650 [1], skirti suvirintoms plieninėms naftos saugojimo talpykloms, kuriuose pateikiamos projektavimo, gamybos, montavimo ir bandymų gairės. Slėginiai indai, suprojektuoti pagal tokius kodeksus kaip ASME katilų ir slėginių indų kodeksas [2], tapo labai svarbūs sandėliuojant suslėgtas dujas ir skysčius. Taip pat paplito horizontalios talpyklos, ypač mažesnės talpos arba požeminės talpyklos. Augant pasaulinei prekybai nafta, rafinavimo gamyklose, terminaluose ir paskirstymo centruose buvo statomos didžiulės cisternų aikštelės. Siekiant užtikrinti energetinį saugumą, įvairiose šalyse taip pat buvo sukurti strateginiai naftos rezervai.

Dėl didėjančio sąmoningumo apie poveikį aplinkai dėl išsiliėjimų, nutekėjimų ar oro taršos ir griežtesnių teisės aktų atsirado daug naujovių, skirtų saugai ir izoliavimui. Dvisienės talpyklos, antriniai rezervuarai, pažangios dangos ir katodinės apsaugos sistemos tapo standartinėmis priemonėmis, kad būtų išvengta korozijos ir sumažintas nuotėkis tiek iš antžeminių, tiek iš požeminių talpyklų. Suskystintųjų gamtinių dujų laikymo reikalavimai paskatino kurti sudėtingas kriogenines talpyklas su pažangia izoliacija. Siekiant užtikrinti geresnį atsargų valdymą ir saugos stebėseną, rankinius matavimo metodus pradėta papildyti ir pakeisti automatinėmis cisternų matavimo sistemomis, lygio jutikliais ir nuotėkio aptikimo technologijomis. Lazerinis skenavimas tapo veiksminga geometrinio vertinimo ir kalibravimo priemone, leidžiančia nekontaktiniu būdu gauti didelio duomenų tankumo duomenis.

Šiuolaikinė degalų saugojimo infrastruktūra yra sudėtinga sistema, kuriai taikomi griežti standartai ir kuri remiasi pažangiomis medžiagomis ir sudėtingomis stebėsenos technologijomis. Senesnių talpyklų palikimas ir iššūkiai, susiję su vientisumo išlaikymu, tikslu tūrio kalibravimu ir saugos užtikrinimu šioje didžiulėje ir įvairialypėje infrastruktūroje, yra pabrėžiama šiuolaikiniuose moksliniuose tyrimuose nagrinėjamų pažangių tikrinimo ir matavimo metodikų svarbą.

Tikslus degalų talpyklų kalibravimas yra labai svarbus degalų saugojimo ir prekybos operacijų, pavyzdžiui, degalinių, ekonominiam gyvybingumui ir atitikties valdymui. Kaip pabrėžė Cihan Ren [3], išvežtų, parduotų ir inventorizuotų degalų kiekio neatitikimai gali sukelti didelių, dažnai nepastebimų finansinių nuostolių. Šiuos nuostolius lemia daugybė objektyvių veiksnių, būdingų degalų savybėms ir laikymui, tokių kaip tūrio pokyčiai dėl temperatūros ar tankio svyravimų,

fizinės talpyklos sąlygų (deformacijos, pasvirimo, nuotėkių), taip pat subjektyvūs arba eksploataciniai veiksniai (matavimo netikslumai, vagystės, rankinio valdymo klaidos). Netiksliai rezervuaro kalibravimo lentelė tampa pagrindiniu klaidų šaltiniu, dėl kurio neįmanoma tiksliai sekti skystų atsargų kiekį ir nustatyti tikruosius nuostolius.

Gao ir kt., ir Truong-Hong et al. Tyrimai [4] dar labiau pabrėžia rezervuaro geometrijos svarbą, nes tokios deformacijos kaip ovalumo, pasvirimo ar plokštumų nuokrypiai tiesiogiai veikia faktinį rezervuaro pajėgumą įvairiuose lygiuose, palyginti su jo projektine ar anksčiau priimta būkle. Naudojant pažangius matavimo metodus, tokius kaip 3D lazerinis skenavimas [5], galima sukurti tikslus „esamos padėties“ geometrinius modelius, taip panaikinant įprastinių metodų, kurie dažnai remiasi prielaidomis arba ribotais duomenų taškais, apribojimus. Todėl reguliarius ir tikslus kalibravimas, kurio rezultatas - tiksliai rezervuaro schema ar modelis, yra ne tik techninis reikalavimas, bet ir labai svarbi verslo priemonė. Ji leidžia aikštelės operatoriams užtikrinti degalų atitiktį reikalavimams, sumažinti tariamus nuostolius dėl matavimo klaidų, nustatyti tikruosius fizinius nuostolius ar vagystes, optimizuoti siuntimą ir atsargas ir galiausiai užkirsti kelią pelno mažėjimui konkurencingoje rinkoje, kurioje degalų kainos svyruoja.

Kuro talpos yra skirstomos į vertikalias ir horizontalias. Jos skiriasi savo pagrindine orientacija, dydžiu ir tipiškomis naudojimo sritimis. Vertikalios talpyklos, kurių ašis yra statmena pagrindui, dažniausiai naudojamos dideliems kiekiams naftos produktų saugoti naftos perdirbimo gamylose ir terminaluose, o jų skersmuo gali siekti iki 60 metrų ar daugiau [4]. Jų geometrinė forma dažniausiai yra paprastas cilindras su fiksuotu arba plaukiojančiu stogu. Priešingai, horizontalios talpyklos, kurių ašis yra lygiagreti pagrindui, paprastai yra mažesnės talpos ir dažnai naudojamos mažmeninėje prekyboje, pavyzdžiui, degalinėse, arba kaip požeminės saugyklos. Jų geometrinė forma yra sudėtingesnė dėl plokščių ar gaubtų galų, o tūrio apskaičiavimas priklauso nuo skysčio lygio yra netiesinis.

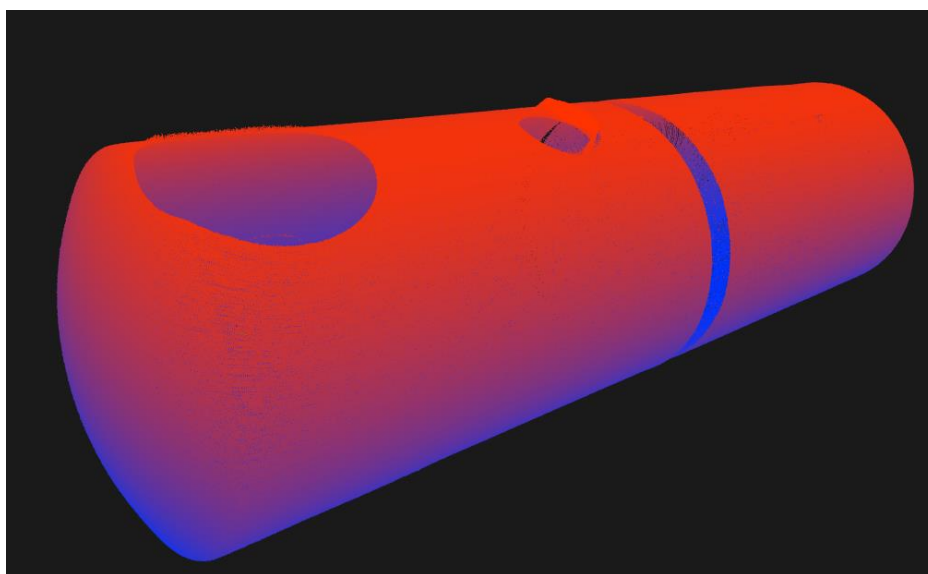
Šiame tyrime dėmesys sutelkiamas horizontalioms talpykloms (**1 pav.**) dėl kelių priežasčių, susijusių su tūrio matavimo ir kalibravimo metodų tyrimu. Pirma, dažniausiai sutinkamos naftos produktų saugojimo talpos pramonėje yra horizontalios talpos, todėl jų tikslus tūrio nustatymas turi didelę ekonominę reikšmę. Antra, joms kalibruoti yra sukurti ir plačiai taikomi specifiniai geometriniai metodai, įskaitant tradicinius ir modernius metodus, apibrėžtus tarptautiniuose standartuose, tokiuose kaip ISO 7507 [6]. Būtent šių modernių, ypač lazerinio skenavimo, metodų tikslumo ir efektyvumo tyrimas yra šio darbo objektas.

Horizontalių talpyklų dydžiai gali labai skirtis, jų skersmuo svyruoja nuo kelių iki 60 metrų ar daugiau. Siekiant užtikrinti saugą ir apsaugoti aplinką, jos paprastai įrengiamos antrinio sulaikymo baseinuose, kurie skirti sulaikyti išsiliejusį skystį rezervuaro pažeidimo atveju. Egzistuoja įvairios horizontalių talpyklų konstrukcijos, įskaitant talpyklas su fiksuotu stogu, išoriniu plaukiojančiu stogu, vidiniu plaukiojančiu stogu ir kupoliniu išoriniu plaukiojančiu stogu [7]. Kiekvienas iš šių tipų turi savų privalumų ir trūkumų, todėl tinkamos konstrukcijos pasirinkimas priklauso nuo saugomos naftos ar produkto tipo, aplinkos sąlygų ir specifinių eksploatacinių reikalavimų [8].



1 pav. Horizontali kuro talpa

Nuskenavus tokio tipo talpą iš vidaus 3D skenavimo įrenginiu galima jos vidinę geometriją atvaizduoti naudojant taškų debesies metodą. Šiuo metu rinkoje egzistuoja įvairi specializuota programinė įranga 3D skenavimo duomenų apdorojimui, tokia kaip Leica Cyclone [9], Artec Studio [10] ar FARO [11] programinė įranga. Nors šios programos siūlo platų funkcijų spektrą, pradedant duomenų registracija ir baigiant modeliavimu, joms būdingi tam tikri apribojimai, susiję su lankstumu, kaina ir galimybe pritaikyti algoritmus labai specifiniams uždaviniams. Šiame darbe, siekiant giliai ištirti informacinių parametų įtaką skenavimo kokybei, buvo pasirinktas nuosavų duomenų apdorojimo algoritmų kūrimo kelias, rašant programinę įrangą Python kalba naudojant VS Code aplinką (1 priedas). Tai leido pasiekti maksimalų kontrolės ir lankstumo lygį analizuojant neapdorotus duomenis. Kaip pavyzdys, (2 pav.) pateikiamas taškų debesies atvaizdavimas, sukurtas būtent šia nuosava programine įranga.



2 pav. Kuro talpos 3D skenavimo rezultato (taškų debesies) atvaizdavimas

Nuosavų algoritmų kūrimas suteikė galimybę ne tik atlikti standartinius duomenų apdorojimo veiksmus, bet ir giliai ištirti bei kiekybiškai įvertinti specifinių informacinių parametų poveikį skenavimo rezultatų tikslumui, kas yra šio darbo esmė. Šis požiūris leido pritaikyti analizės metodus būtent kuro talpų kalibravimo kontekstui, atsižvelgiant į jų unikalios geometriją, vidines struktūras ir potencialius matavimo artefaktus, kuriuos standartinė komercinė programinė įranga galbūt negalėtų efektyviai apdoroti ar analizuoti tokiu detalumu.

2. Lazerinis 3D skenavimas

3D skenavimas yra moderni metodika, leidžianti detaliai analizuoti realaus pasaulio objektus ar aplinką, surenkant skaitmeninius duomenis apie jų erdvinę formą ir kartais net paviršiaus savybes [5]. Šie surinkti duomenys, dažniausiai pateikiami kaip didelio tankio taškų debesis (angl. *point cloud*), vėliau gali būti panaudoti kuriant tikslius skaitmeninius trimačius (3D) modelius. Technologijos ištakos siekia XX a. septintąjį dešimtmetį, kai ankstyvosios sistemos rėmėsi šviesų, kamerų ir projektorių deriniais. Tačiau šiuolaikiniai 3D skenavimo įrenginiai naudoja pažangesnes technologijas, tokias kaip struktūrinė šviesa (šešėliavimas), baltoji šviesa ar lazeriai, kad itin tiksliai užfiksuotų objekto paviršiaus detales [12]. Ši technologija tapo ypač naudinga įvairiose srityse, įskaitant mokslinius tyrimus, pramoninį projektavimą [13], atvirkštinę inžineriją, virtualų surinkimą, kokybės kontrolę, kultūros paveldo išsaugojimą ir greitą prototipų kūrimą [12].

Egzistuoja įvairios technologijos, skirtos skaitmeniniu būdu užfiksuoti objektų 3D geometriją. Pagal sąveikos su objektu pobūdį jas iš esmės galima suskirstyti į du pagrindinius tipus: kontaktinius ir nekontaktinius 3D skenavimo įrenginius.

Kontaktiniai 3D skenavimo įrenginiai veikia fiziškai liesdami tiriamo objekto paviršių. Vienas žinomiausių pavyzdžių yra koordinačių matavimo mašina (CMM). CMM yra specialiai sukurta itin tiksliam objekto fizinių geometrinių charakteristikų matavimui. Matavimai atliekami specialiu zonu, pritvirtintu prie daugiaašės judančios konstrukcijos, kuri gali būti valdoma rankiniu būdu arba kompiuteriu. Pagrindinis CMM privalumas yra labai didelis matavimo tikslumas. Tačiau šis metodas turi ir trūkumų: jis paprastai yra gerokai lėtesnis už bekontakčius metodus, o dėl fizinio kontakto kyla pavojus pažeisti ar netiksliai išmatuoti jautrius, lanksčius ar minkštus paviršius.

Priešingai nei kontaktiniai, nekontaktiniai 3D skenavimo įrenginiai renka informaciją apie objekto formą be jokio fizinio sąlyčio su jo paviršiumi. Vietoj to, jie naudoja įvairias optines ar kitokias technologijas duomenims rinkti. Tipinis šių metodų išvesties rezultatas yra didelio tankio ir tikslumo taškų debesis. Nektaktiniai metodai toliau skirstomi į aktyvius ir pasyviuos.

Aktyvūs skenavimo įrenginiai patys skleidžia tam tikros formos energiją, dažniausiai šviesą, į objekto pusę ir analizuoja tos energijos atspindėtą ar kitaip paveiktą signalą. Pagrindinė ir plačiausiai naudojama aktyvioji technologija yra LiDAR (angl. *Light Detection and Ranging*).

LiDAR sistemos veikia skleidžiamos lazerio šviesos impulsus į objektą ir matuodamos atspindėjusios šviesos savybes. Atstumui iki objekto paviršiaus taško nustatyti naudojami keli pagrindiniai metodai.

Skrydžio laikas (ToF): šiuo metodu matuojamas laikas, per kurį lazerio impulsas nukeliauja nuo skenavimo įrenginio iki objekto ir atgal iki detektoriaus. Žinant šviesos greitį (c), atstumas (d) apskaičiuojamas pagal formulę $d = (c \times t) / 2$, kur t – išmatuotas laikas. ToF sistemos dažniausiai naudojamos didesnių nuotolių (nuo kelių metrų iki kilometrų) skenavimui.

Fazės poslinkis: šios sistemos skleidžia nuolat moduluojamą (pagal amplitudę) lazerio spindulį. Matuojamas atspindėtos šviesos fazės poslinkis lyginant su skleidžiamos šviesos faze. Fazių skirtumas yra proporcingas atstumui. Šis metodas dažnai yra greitesnis nei ToF ir paprastai naudojamas vidutinio nuotolio (iki kelių dešimčių ar šimtų metrų) skenavimui, tačiau gali būti jautresnis aplinkos sąlygoms.

Trianguliacija: taikant šį metodą, lazerio taškas arba linija projektuojama į objektą. Detektorius (kamera), esantis žinomą atstumu ir kampu nuo lazerio šaltinio, fiksuoja lazerio projekcijos padėtį ant objekto paviršiaus. Naudojant žinomą atstumą tarp šaltinio ir detektoriaus bei išmatuotus kampus, taško 3D koordinatės apskaičiuojamos geometrinės trianguliacijos principu. Šis metodas paprastai užtikrina didelį tikslumą, bet yra taikomas tik mažiems atstumams (nuo kelių centimetrų iki kelių metrų).

Pasyvieji skenavimo įrenginiai, priešingai nei aktyvieji, neturi savo energijos šaltinio. Jie remiasi aplinkos spinduliuotės, dažniausiai matomos šviesos, kurią objektas atspindi arba skleidžia, aptikimu ir analize. Pagrindiniai šiai kategorijai priskiriami metodai yra fotogrametrija ir stereovizija. Šie metodai dažnai naudoja dvi ar daugiau sinchronizuotų kamerų, kurios fiksuoja vaizdus iš skirtingų pozicijų. Analizuojant vaizdų skirtumus, galima atkurti objekto 3D geometriją. Nors pasyviųjų skaitytuvų įranga dažnai yra pigesnė nei aktyviųjų, jų tikslumas gali labai priklausyti nuo aplinkos apšvietimo sąlygų ir objekto paviršiaus tekstūros.

Gauti taškų debesies duomenys, nepriklausomai nuo jų surinkimo metodo, vėliau yra apdorojami ir naudojami įvairiose taikomosiose programose, kaip minėta anksčiau.

2.1. 3D duomenų apdorojimo būdai

Iš skenavimo įrenginių gautus 3D duomenis galima naudoti įvairiais tikslais - nuo tiesioginio panaudojimo iki sudėtingų modelių kūrimo.

Užfiksuotus taškų debesis galima tiesiogiai naudoti tam tikroms užduotims atlikti be papildomo modeliavimo. Tai ypač paplitę atliekant [14] pagrindinį vizualizavimą, ypač tokiose srityse kaip architektūra ir statyba. Šis metodas vertingas, kai pakanka pačių neapdorotų geometrinių duomenų, nes nereikia kurti sudėtingų modelių tokioms užduotims kaip atstumo apskaičiavimas, atstumo patikrinimas.

Dažnas apdorojimo etapas, kai taškų debesis paverčiamas daugiakampiu 3D modeliu, dažnai vadinamu tinkleliu [15]. Šiuose modeliuose išlenkti paviršiai aproksimuojami daugybe mažų plokščių daugiakampių. Daugiakampiai modeliai plačiai naudojami kaip standartinis formatas, tinkamas vizualizacijai ir tam tikroms kompiuterizuotos gamybos (CAM) programoms. Dėl jų dažnai gaunami dideli failų dydžiai, ypač sudėtingų objektų, nuskaitytų didele raiška. Šių modelių redagavimas gali būti sudėtingas, nes keičiant pagrindinę formą reikia keisti ne aukšto lygio parametrus, o atskiras viršūnes ar paviršius. Rekonstrukcijos procesas paprastai susideda iš algoritmų, kurie debesyje suranda gretimus taškus ir sujungia juos tiesiomis linijomis (briaunomis), kad būtų suformuoti daugiakampiai veidai, taip sukuriant ištisinio paviršiaus atvaizdavimą.

Taikant pažangesnį metodą, objekto forma modeliuojama naudojant matematiškai apibrėžtų kreivų paviršiaus elementų rinkinį [16]. Įprasti paviršiaus tipai: NURBS (ang. *Non-Uniform Rational B-Splines*) ir T-Splines, taip pat kiti sudėtingi kreivių atvaizdai. Skirtingai nuo poligoninių modelių, šiais modeliais galima atvaizduoti lygią, išlenktą geometriją (pvz., sferą) tikru matematiniu tikslumu. Kuriant šiuos modelius reikia apibrėžti ir išdėstyti šiuos paviršiaus dėmenis taškų debesyje. Kai kuri programinė įranga palengvina rankinį dėmių išdėstymą, o sudėtingesnės priemonės siūlo ir automatizuotus, ir rankinius metodus. Paviršiaus modeliai dažnai turi privalumų, nes yra mažesnio dydžio failai nei tankios tinklelio formos ir paprastai juos lengviau valdyti ir integruoti į CAD programinę įrangą, kuri įprastai teikia pirmenybę matematiškai apibrėžtiems

paviršiams. Nors ir redaguojami, pakeitimai dažnai susiję su valdymo taškų ar kreivių manipuliavimu, kuris labiau primena skaitmeninį skulptūrinį, o ne funkcijomis pagrįstą parametrinį projektavimą. Šis vaizdavimas ypač gerai tinka organinėms, laisvos formos ar stilizuotoms meninėms formoms modeliuoti [12].

Tūrinio vaizdavimo metodu pirmiausia siekiama vizualizuoti nuskaitytą objektą, kartais įskaitant jo vidinę struktūrą, ypač jei duomenys gaunami iš tokių šaltinių kaip kompiuterinė tomografija ar magnetinio rezonanso tomografija, o ne tik iš paviršiaus lazerinio skenavimo. Dažnai kartu su tūriniais duomenimis naudojamas vaizdo segmentavimas - tai procesas, naudojamas nepageidaujamoms struktūroms ar regionams iš duomenų rinkinio išskirti ir pašalinti. Segmentuotus duomenis galima eksportuoti į standartinius formatus, pavyzdžiui, CAD arba STL, kad būtų galima juos toliau tvarkyti. Be to, egzistuoja automatizuoti procesai, skirti tikslams geometriniais aprašymams (dažnai modeliavimui tinkamoms tūrinėms tinklėliams) kurti tiesiogiai iš nuskaitytų tūrinių duomenų - tai vadinama vaizdu pagrįstu tinklėlių kūrimu.

Šie skirtingi metodai siūlo įvairius kompromisus, susijusius su failo dydžiu, redagavimo galimybėmis, geometriniu tikslumu ir tinkamumu konkrečioms tolesnėms programoms. Metodo pasirinkimas labai priklauso nuo numatomo nuskaitytų duomenų naudojimo būdo.

Detali 3D duomenų reprezentacijos ir apdorojimo metodų apžvalga yra esminė šio magistro darbo dalis, nes ji tiesiogiai susijusi su pagrindiniu tyrimo objektu – kuro talpų trimačiu lazeriniu skenavimu ir gautų taškų debesies analize. Supratimas, kaip neapdoroti skenavimo duomenys gali būti paversti įvairiomis skaitmeninėmis formomis (taškų debesis, tinklinis modelis, paviršiaus modelis), yra svarbus pasirenkant ir kuriant algoritmus, skirtus ištirti informacinių parametrų (kritimo kampo, atstumo, taškų tankio) įtaką matavimo kokybei. Kiekvienas reprezentacijos būdas turi savus privalumus ir trūkumus, kurie tiesiogiai veikia, kokią informaciją galime išgauti iš duomenų ir koku tikslumu galime vertinti paviršiaus savybes ar deformacijas.

Šiame darbe, orientuotame į informacinių parametrų įtakos skenavimo kokybei ir patikimumui tyrimą, ypatingas dėmesys skiriamas darbui su taškų debesimi ir jo lokalių savybių analizei. Nors aukštesnio lygio modeliai (tokie kaip tinkliniai ar paviršiaus modeliai) yra naudingi vizualizacijai ar bendrai geometrijos reprezentacijai, pagrindiniai šio tyrimo rodikliai (pvz., RMS paklaida) yra skaičiuojami remiantis originalių taškų pasiskirstymu tam tikruose segmentuose ir geometrinių primityvų pritaikymu šiems taškų poaibiams. Todėl apžvelgtų metodų, ypač susijusių su tiesiogine taškų debesies analize ir lokaliu modeliavimu (pvz., plokštumų ar apskritimų pritaikymu segmentams), samprata sudaro metodologinį pagrindą tolesnei tyrimo daliai.

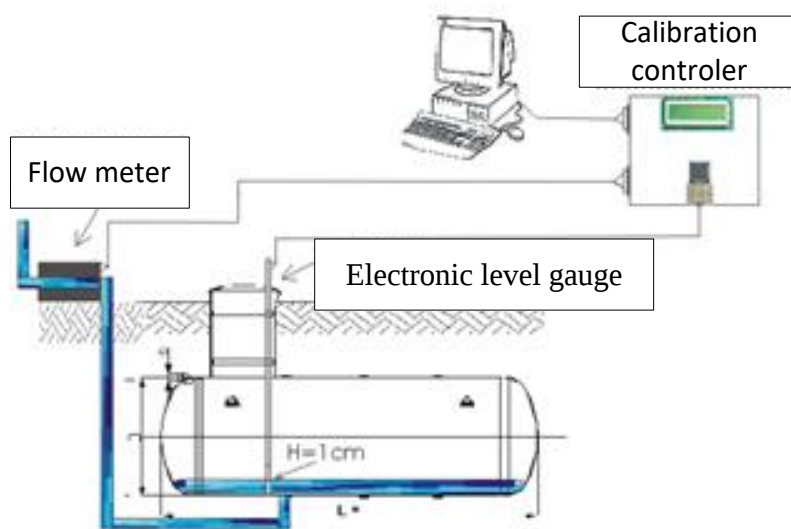
3. Kuro talpų kalibravimo metodai, standartai ir iššūkiai

Tikslus kuro talpyklų tūrio kalibravimas yra itin svarbus procesas, užtikrinantis patikimą atsargų valdymą, veiklos efektyvumą bei atitiktį teisiniams ir komerciniams reikalavimams. Kalibravimo procesus reglamentuoja įvairūs tarptautiniai ir nacionaliniai standartai, tokie kaip ISO/IEC 17025:2017 [17], apibrėžiantis bandymų ir kalibravimo laboratorijų kompetencijos bendruosius reikalavimus. Šios raidos supratimas suteikia esminį kontekstą dabartinei praktikai, problemoms ir tikslaus matavimo bei tikrinimo būtinybei. Bėgant metams, kalibravimo metodikos evoliucionavo, tačiau tiek tradiciniai, tiek modernūs metodai turi savų privalumų ir iššūkių. Pastarųjų metų tyrimai rodo didelę pažangą taikant 3D lazerinio skenavimo technologijas šioje srityje, tačiau kartu atskleidžia ir naujus probleminius aspektus, kuriuos reikia spręsti.

3.1. Tradiciniai geometrinio kalibravimo metodai

Istoriškai nusistovėję kuro talpų kalibravimo metodai skirstomi į dvi pagrindines grupes: tūrinius (skysčio užpildymo) ir geometrinius.

Plačiausiai paplitęs tūrinis (skysčio užpildymo) metodas (**3 pav.**) remiasi principu, kai į ištuštintą ir išvalytą talpą palaipsniui pilamas tiksliai išmatuotas kalibravimo skysčio (dažniausiai vandens) kiekis, naudojant kalibruotus srauto ar tūrinius matuoklius[18]. Šis metodas, apibrėžtas tarptautiniame standarte ISO 4269:2001 [19], reikalauja po kiekvieno įpylimo registruoti skysčio lygį sertifikuotu lygio matuokliu. Nors pritaikius būtinas korekcijas, dėl skysčio temperatūrinio plėtimosi, talpos deformacijos dėl hidrostatinio slėgio, galima gauti patenkinamo tikslumo rezultatus [18], šis metodas turi esminių trūkumų. Visų pirma, jam reikia didžiulio kiekio vandens, kurį po kalibravimo, užterštą kuro likučiais, būtina utilizuoti laikantis griežtų aplinkosaugos reikalavimų, kas lemia dideles logistikos ir finansines sąnaudas. Be to, procesas yra ilgas, užtrunka kelias valandas ar net dienas, ir reikalauja talpos eksploatacijos sustabdymo. Svarbiausia, šis metodas suteikia tik netiesioginę informaciją apie talpos geometriją – faktinis talpos tūris nustatomas pagal įpilto skysčio tūrį ir lygį, tačiau tikroji vidinė forma, galimos lokalias deformacijos ar pasvirimas lieka neįvertinti.



3 pav. Horizontalių degalų bakų kalibravimas skysčio pripildymo metodu [14]

Kita tradicinių metodų grupė – geometriniai metodai, dažnai taikomi Europoje ir apibrėžti tokiuose standartuose kaip ISO 12917-1:2017 (horizontalios cilindrinės talpyklos) [20] bei Lietuvos metrologijos instituto patvirtinta metodika BPM8871101-96/1:2005 [21]. Šie metodai apima:

- rezervuarų juostų tvirtinimą, tai fizinis bako išorinio perimetro matavimas skirtinguose aukščiuose;
- optinę atskaitos liniją, tai nuokrypių nuo vertikalių linijų matavimas optiniais prietaisais;
- optinę trianguliaciją, tai geometrijos apskaičiavimas naudojant geodezinius prietaisus (pvz., teodolitą) pagal kampinius matavimus.

Dažnai taikomas šių metodų derinys. Nors tarptautiniai standartai, kaip ISO 7507 [6], apibrėžia geometrinius metodus vertikalioms talpykloms, pagrindinis šių tradicinių metodų trūkumas yra jų priklausomybė nuo diskrečių matavimų ribotame taškų skaičiuje. Daroma prielaida, kad tarp matavimo taškų talpos geometrija yra ideali, todėl nepavyksta tiksliai užfiksuoti lokalių paviršiaus deformacijų ar bendro rezervuaro posvyrio, kurie gali reikšmingai paveikti tikrąją talpos tūrį. Šie metodai taip pat reikalauja daug rankinio darbo, laiko ir kelių darbuotojų, o tikslus rezervuarų dugno tūrio nustatymas išlieka sudėtingas.

Taigi, abu tradicinių metodų tipai turi esminių apribojimų, susijusių su tikslumu, laiko ir išteklių sąnaudomis bei poveikiu aplinkai, kas skatina ieškoti efektyvesnių alternatyvų.

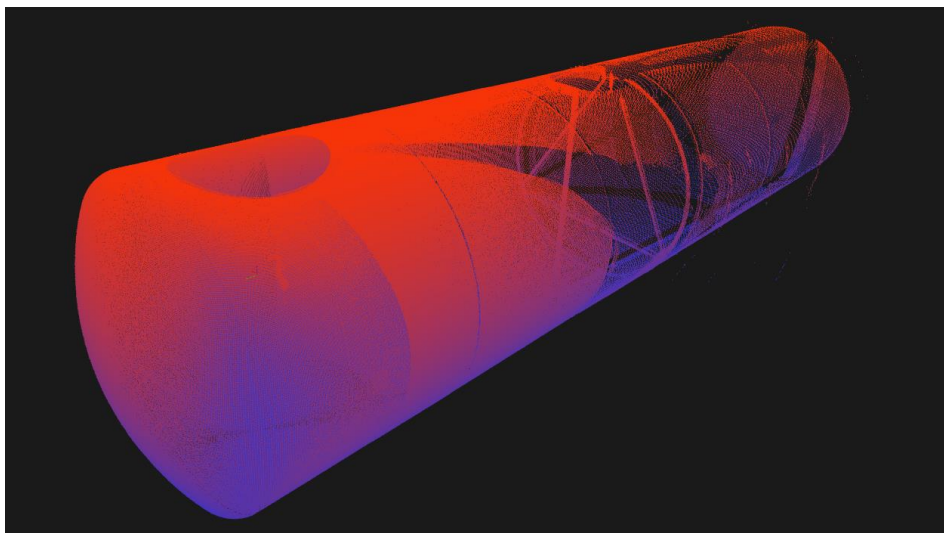
3.2. 3D lazerinio skenavimo kalibravimo metodai

Atsižvelgiant į tradicinių metodų trūkumus, 3D lazerinis skenavimas tampa vis populiariesne ir galingesne alternatyva. Šis metodas yra įteisintas ir reglamentuotas tarptautiniuose standartuose, pavyzdžiui, ISO 7507-4:2010 [22], skirtame vertikalių cilindrinė talpyklų kalibravimui elektro-optiniu metodu, bei nacionalinėse metodikose, tokiose kaip Lietuvos metrologijos instituto BPM300637345-01:2013 [23], apibrėžiančiose 3D lazerinio skenavimo taikymą skysčių produktų talpykloms.[12]. 3D lazerinio skenavimo esmė – bekontakčiu būdu surinkti didelio tankio trimatį taškų debesį, detalai atvaizduojantį visą talpos vidinį paviršių [5]. Kaip parodė V. Knyva ir M. Knyva [14], pagrindiniai šio metodo privalumai lyginant su tūriniu metodu yra didesnis greitis, vandens nenaudojimas ir didesnis lankstumas [14]. Lyginant su tradiciniais geometriniais metodais, esminis privalumas yra tiesioginis visos talpos geometrijos fiksavimas dideliu detalumu, kas leidžia tiksliai įvertinti ne tik bendrą formą, bet ir lokalizuotas deformacijas bei pasvirimą.

Dažniausiai taikoma 3D skenavimo duomenų apdorojimo metodika remiasi pjūvių metodu: visas 3D taškų debesis yra padalinamas į daugybę plonų lygiagrečių horizontalių sluoksnių (pjūvių). Kiekvieno pjūvio skerspjūvio plotas, užimamas skenavimo taškų, yra tiksliai apskaičiuojamas algoritmais. Rezervuaro tūris iki konkretaus lygio nustatomas sumuojant visų žemiau esančių pjūvių tūrius [14]. Šis laipsniškas sumavimas leidžia sudaryti išsamią ir tikslią aukščio ir tūrio kalibravimo lentelę tiesiogiai iš 3D skenavimo duomenų.

Nors 3D lazerinis skenavimas siūlo didelį potencialą, jo efektyviam taikymui rezervuarų kalibravimui reikia įveikti keletą iššūkių.

- Taškų erdvinis išsibarstymas: skenavimo duomenims būdinga tam tikra sklaida, kuri gali įvesti paklaidas į tūrio skaičiavimus. Reikalingi efektyvūs filtravimo algoritmai šiam poveikiui sumažinti [14].
- Vidinio paviršiaus būklė: net nedidelės degalų ar kitų medžiagų plėvelės ant sienelių gali smarkiai pabloginti matavimo kokybę, ypač esant aštriam lazerio kritimo kampui [7]. Būtina užtikrinti skenavimo įrenginio optikos švarą.
- Aplinkos sąlygos: pavojinga vidinė talpos aplinka (pvz., degūs garai), didelė drėgmė (kondensatas), oro ar garų turbulencija, temperatūros svyravimai gali trikdyti lazerio spindulį ar paveikti matavimo prietaisų veikimą [7].
- Ribota prieiga ir šešėliai: vidinės talpos struktūros (pertvaros, vamzdžiai, atramos) ar ribota prieiga per liukus gali sudaryti „šešėlius“ [16] – sritis, kurių skenavimo įrenginys „nemato“ [5]. Tai apsunkina pilnos paviršiaus aprėpties gavimą (**4 pav.**). Kelių skenavimų registracija iš skirtingų pozicijų padeda, bet prailgina apdorojimo laiką ir gali įvesti registracijos paklaidas [24][7]
- Skenavimo įrenginio tikslumas: paties skenavimo įrenginio vidinis tikslumas (atstumo konstanta, kampinės paklaidos, ašių statmenumas) tiesiogiai veikia rezultatų patikimumą. Reguliarus ir kruopštus prietaiso kalibravimas yra būtinas [7]
- Duomenų apdorojimas: taškų debesies pavertimas tikslia kalibravimo lentele reikalauja specializuotos programinės įrangos ir algoritmų duomenų registracijai, jei skenuota iš kelių vietų, filtravimui, modeliavimui [25] ir galutiniam tūrio skaičiavimui [7].
- Deformacijų kiekybinis įvertinimas: nors skenavimas fiksuoja detalią geometriją, tikslus kiekybinis deformacijų (ovalumo, pasvirimo, įlenkimų, išgaubimų) įvertinimas ir jų įtakos tūriui apskaičiavimas reikalauja sudėtingos analizės ir algoritmų [26][4][15].



4 pav. Nuskenuotos talpos su vidinėmis struktūromis atvaizdavimas

Siekiant dar labiau pagerinti kalibravimo patikimumą ir tikslumą, ypač sudėtingų ar dinamiškai kintančių talpyklų atveju, perspektyvu integruoti 3D lazerinio skenavimo duomenis su tradiciniais metodais ar kitų jutiklių (pvz., deformacijos, temperatūros) duomenimis, taikant hibridinius

metodus [27]. Detalūs geometriniai duomenys, gauti 3D skenavimo būdu, gali ženkliai pagerinti atsargų valdymą ir nuostolių kontrolę.

Apibendrinant, 3D lazerinis skenavimas siūlo transformuojantį požiūrį į rezervuarų kalibravimą, žadantį didesnę tikslumą, greitį ir efektyvumą bei mažesnę poveikį aplinkai. Tačiau sėkmingas šios technologijos įdiegimas priklauso nuo gebėjimo įveikti iššūkius, susijusius su duomenų kokybe, aplinkos sąlygomis, prietaisų tikslumu ir pažangių duomenų apdorojimo bei analizės metodų poreikiu.

4. 2D duomenų surinkimo ir apdorojimo eksperimentas

Kad būtų galima geriau suprasti fundamentalius lazerinio skenavimo principus ir potencialius ribotumus, ypač būdingus pigesnės konstrukcijos įrenginiams, prieš pradedant pagrindinę analizę su aukštos klasės 3D skenavimo įrenginiu, buvo atlikta serija preliminarinių eksperimentų naudojant RPLIDAR-A1 dvimatį (2D) šviesos aptikimo ir nuotolio nustatymo sensorių [28]. Pagrindinės šio prietaiso charakteristikos: nuskaitymo diapazonas 0,15 - 12 m, darbinis diapazonas 360°, nuskaitymo dažnis iki 55 Hz, kampinė skiriamoji geba 1°.

Šie preliminarūs tyrimai turėjo kelis tikslus:

- identifikuoti ir suprasti specifinius artefaktus ir paklaidų šaltinius, kylančius dėl pigesnės įrangos mechaninių ir elektroninių netobulumų;
- ištirti jutiklio dinaminį atsaką į staigius matuojamo atstumo pokyčius, kas yra aktualu skenuojant objektus su aiškiomis geometrinėmis briaunomis;
- įvertinti, kokią įtaką šie baziniai efektai galėtų turėti sudėtingesniai 3D skenavimui realiomis sąlygomis.

4.1. RPLIDAR-A1 jutiklio ypatumai ir duomenų apdorojimo iššūkiai

Prieš pradedant pagrindinę analizę su aukštos klasės 3D skenavimo įrenginiu, atlikta serija preliminarinių eksperimentų naudojant pigesnės konstrukcijos dvimatį (2D) šviesos aptikimo ir nuotolio nustatymo sensorių RPLIDAR-A1. Šie tyrimai turėjo kelis tikslus, įskaitant fundamentalių lazerinio skenavimo principų ir potencialių ribotumų, ypač būdingų tokio tipo įrenginiams, supratimą.

Tačiau pradinių bandymų metu renkant ir apdorojant gautus duomenis MATLAB aplinkoje, išryškėjo reikšmingas iššūkis: užfiksuoti atstumo ir kampo duomenys kiekvienam pilnam skenavimo apsisukimui sudarė skirtingo ilgio masyvus. Šis kintamumas buvo tiesioginė prietaiso konstrukcijos ypatumų pasekmė, visų pirma susijusi su netolygiu variklio sukimosi greičiu ir mechaniniais netobulumais, kaip aprašyta toliau. Skirtingo ilgio duomenų masyvai kėlė fundamentalų sunkumą tiesiogiai taikyti standartinius duomenų apdorojimo algoritmus, kurie dažnai reikalauja fiksuotos ar nuspėjamos įvesties struktūros. Siekiant įveikti šią kliūtį ir užtikrinti duomenų tinkamumą analizei, teko nuodugniai ištirti šiuos specifinius jutiklio artefaktus ir sukurti ar adaptuoti duomenų apdorojimo strategijas, leidžiančias efektyviai dirbti su kintamos struktūros duomenimis.

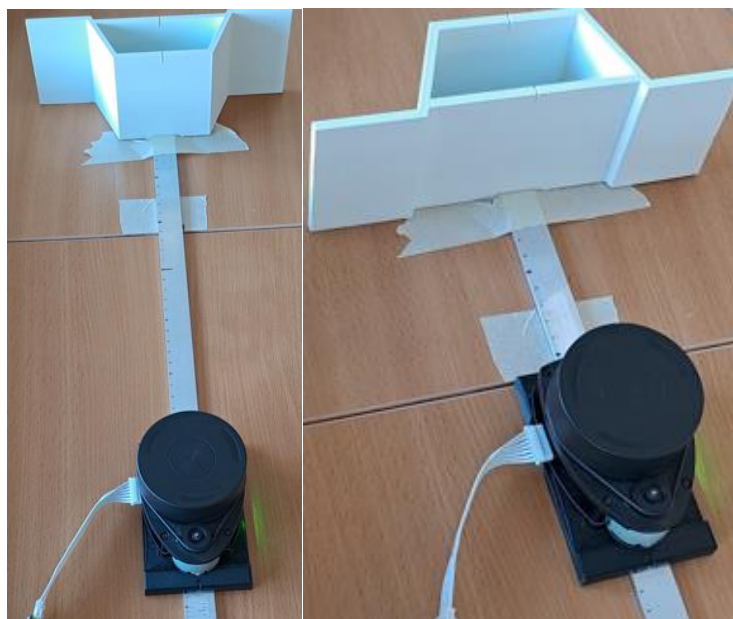
Buvo atsižvelgta į du pagrindinius šio konkretaus prietaiso trūkumus:

- dėl pigios konstrukcijos, PWM valdomas variklis be grįžtamojo ryšio, lanksti guminė jungtis, nestabilus korpusas, jutiklio sukimosi greitis nėra pastovus, tai lemia, kad per vieną pilną apsisukimą surinktų duomenų masyvų ilgiai skiriasi;
- galimas lęšio montavimo netikslumas gali iškreipti lazerio trajektoriją, jai suteikiant į skėtį panašią formą, užuot buvus plokščiai.

Kintantis masyvų ilgis sukelia nepatogumų apdorojant duomenis, nes dauguma algoritmų reikalauja vienodos įvesties struktūros. Galimi sprendimo būdai – interpoliacija arba duomenų filtravimas pagal ilgį. Interpoliacija gali paslėpti smulkius objektus, o masyvų atrinkimas reikalauja ilgesnio skenavimo laiko. Šiame darbe buvo pasirinktas vienodo ilgio masyvų atrinkimo metodas: duomenys buvo renkami tol, kol buvo surinktas pakankamas (nustatyta 60) skaičius masyvų, turinčių dažniausiai pasikartojantį (dominantį) ilgį.

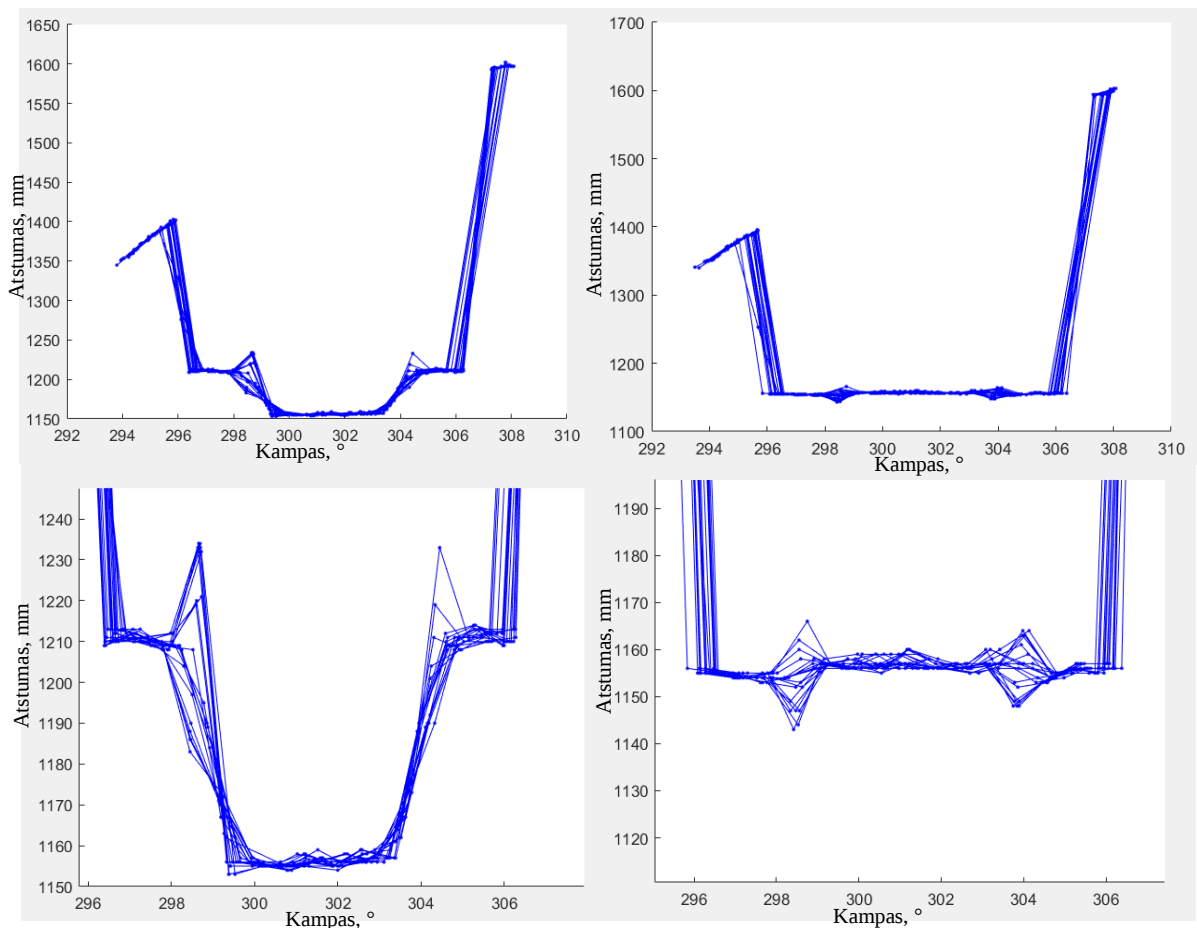
4.2. Dinaminio atsako tyrimo eksperimentas

Siekiant ištirti jutiklio elgseną staigiai keičiantis matuojamam atstumui, buvo atliktas specialus eksperimentas. Tam buvo sukurta ir nuskaityta speciali 3D spausdinta kliūtis. Ši kliūtis turėjo dvi skirtingas puses su aiškiomis geometrinėmis briaunomis ir šlaitais. Viena pusė pasižymėjo teigiamu šlaitu, kurio aukštis siekė 5 cm, o kita pusė – neigiamu šlaitu, kurio aukštis buvo 5 mm. Abi taikinio pusės buvo suprojektuotos taip, kad šlaitų pradžioje ir pabaigoje turėtų lygias „platformas“ (5 pav.). Šių platformų tikslas buvo leisti lazerio spinduliui stabilizuotis ant horizontalaus paviršiaus prieš pereinant į staigų šlaitą ir po jo. Kiekviena šlaitų pusė (teigiamas ir neigiamas šlaitas) buvo simetriška pati sau – t. y., kylanti ir krintanti taikinio dalys per vidurį buvo identiškos formos. Jutiklis buvo statomas įvairiais atstumais nuo objekto, pradedant 15 cm ir didinant žingsniu po 20 cm, kad būtų galima stebėti atsako priklausomybę nuo atstumo visame veikimo diapazone.



5 pav. RPLIDAR-A1 dinamikos eksperimentas

Gauti atstumo ir kampo duomenys buvo apdoroti ir vizualizuoti 2D poliarinėse diagramose, vaizduojančiose išmatuotą atstumą kaip kampo funkciją (6 pav.).



6 pav. RPLIDAR-A1 dinamikos eksperimento rezultatai

Diagramų analizė (**6 pav.**) atskleidė nuoseklų ir aiškų dinaminio atsako artefaktą: staigų ir trumpalaikį matavimo nuokrypį, iš karto po to, kai lazerio spindulys pereina per objekto geometrinę briauną. Kai išmatuotas atstumas staiga pasikeisdavo, kitas užfiksuotas matavimo taškas laikinai smarkiai nukrypavo nuo tikėtinės vertės:

- jei atstumas staiga padidėdavo, jutiklis trumpam užfiksuodavo dar didesnę atstumą nei naujasis paviršius;
- jei atstumas staiga sumažėdavo, jutiklis trumpam užfiksuodavo dar mažesnę atstumą nei naujasis paviršius.

Šie paviršiai duomenyse atsirasdavo iš karto po atstumo pokyčio, kol rodmenys stabilizuodavosi ties nauja tikrąja verte. Nors reikšminys stebėtas esant įvairiems atstumams, jis buvo ryškiausias ir lengviausiai interpretuojamas matuojant iš mažesnių atstumų. Šis viršijimas rodo šio konkretaus pigaus jutiklio dinaminio atsako ribotumą – jo reakcija į staigius atstumo pokyčius yra pavėluota arba netiksli.

Tikėtina, kad šį dinaminį netikslumą lemia kelių veiksnių, būdingų RPLIDAR-A1 konstrukcijai, derinys:

- momentinio sukimosi greičio netolygumas ties briauna, galintis lemti neteisingą atstumo rodmenis susiejimą su kampine padėtimi;

- nedidelis vėlavimas tarp fizinio šviesos atspindėjimo ir galutinio atstumo/kampo poros apskaičiavimo gali lemti klaidingą priskyrimą sparčiai keičiantis kraštui;
- vidinių algoritmų, interpretuojančių atspindėtą impulsą, ribotumai arba filtravimo savybės gali neleisti tiksliai ir greitai reaguoti į staigius žingsninius signalo pokyčius;
- lazerio spinduliui pereinant per geometrinį kraštą, jis gali vienu metu apšviesti skirtingu atstumu esančius paviršius, artimąjį ir tolimąjį. Tai gali sukelti mišrų ar dviprasmišką grįžtamąjį signalą, kuris trumpam suklaidina atstumo apskaičiavimo algoritmą.

Šių mechaninių, elektroninių ir algoritmų lygmens netikslumų derinys greičiausiai paaiškina stebėtus dinامينius nuokrypius ties geometriniais perėjimais.

Nors šis paviršiaus efektas yra ypač ryškus naudojant pigesnės konstrukcijos 2D skenavimo įrenginį, jis pabrėžia fundamentalų iššūkį, potencialiai aktualų ir aukštos klasės 3D skenavimui sudėtingose aplinkose, tokiose kaip kuro talpos. Talpų viduje skenavimo spindulys nuolat susiduria su staigiais geometriniais perėjimais: suvirinimo siūlėmis, vidinėmis konstrukcijomis, atraminėmis kolonomis, pertvaromis, vamzdžiais, užpildymo linijomis, šulinių angomis, taip pat galimais pačios talpos sienelės paviršiaus nelygumais, įdubimais, išgaubimais.

Kiekvienas toks perėjimas yra potenciali vieta, kur gali atsirasti panašūs, nors galbūt ir mažesnio masto, matavimo artefaktai – klaidingi duomenų taškai šalia geometrinių ypatybių. Toks lokalizuotas triukšmas gali:

- iškreipti šių elementų geometrinį atvaizdavimą taškų debesyje, jie gali atrodyti storesni, plonesni ar šiek tiek pasislinkę;
- sukurti taškus vaiduoklius, nukrypstančius nuo tikrojo paviršiaus profilio ties ryškesnėmis deformacijomis;
- apsunkinti tolesnį duomenų apdorojimą, reikalaujant agresyvesnio filtravimo ar sudėtingesnių modeliavimo algoritmų;
- nors poveikis bendram apskaičiuotam tūriui gali būti nedidelis, netikslus vidinių struktūrų ar didelių deformacijų atvaizdavimas gali trukdyti atlikti tikslią rezervuaro vidaus būklės analizę ir sukelti nedidelius netikslumus skaičiuojant tūrį specifiniuose aukščio intervaluose, kur yra šių elementų.

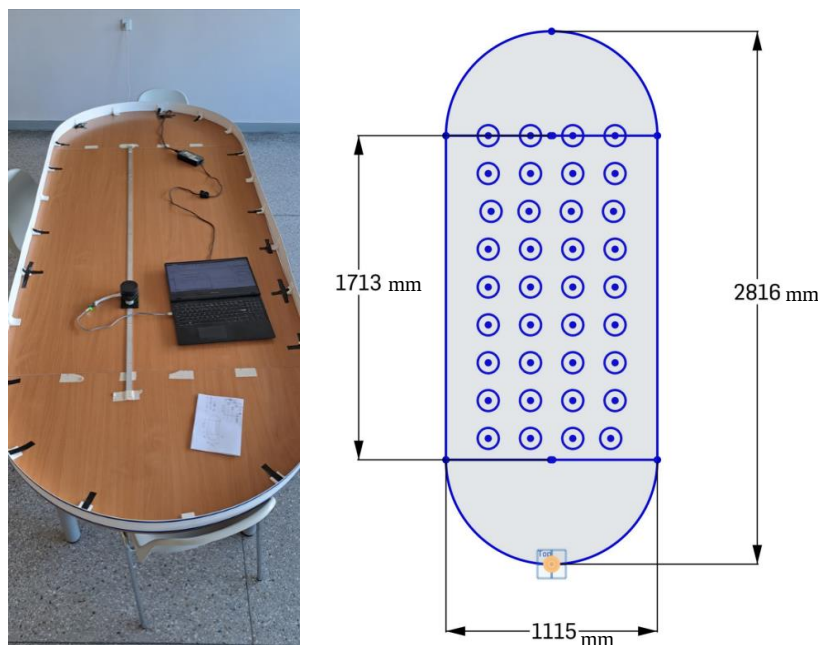
Todėl šie preliminarūs eksperimentai su RPLIDAR-A1, nors ir atlikti su paprastesne įranga, suteikia vertingų įžvalgų apie potencialius matavimo netikslumus ir artefaktus, su kuriais galima susidurti analizuojant realių kuro talpų 3D skenavimo duomenis ir pagrindžia poreikį detaliai tirti informacinių parametrų įtaką pagrindinėje darbo dalyje.

4.3. Dvimačio (2D) skenavimo eksperimentas ir rezultatų analizė

Siekiant geriau suprasti bazinius veiksnius, veikiančius lazerinio skenavimo rezultatų kokybę uždarose erdvėse, ypač naudojant pigesnės konstrukcijos įrangą, buvo atliktas dvimatis eksperimentas. Jo tikslas – ištirti ryšį tarp skenavimo rezultatų kokybės, šiuo atveju – kampinio matavimo stabilumo, ir matuojamo objekto geometrijos bei atstumo santykio.

4.3.1. Eksperimento sąranga ir eiga

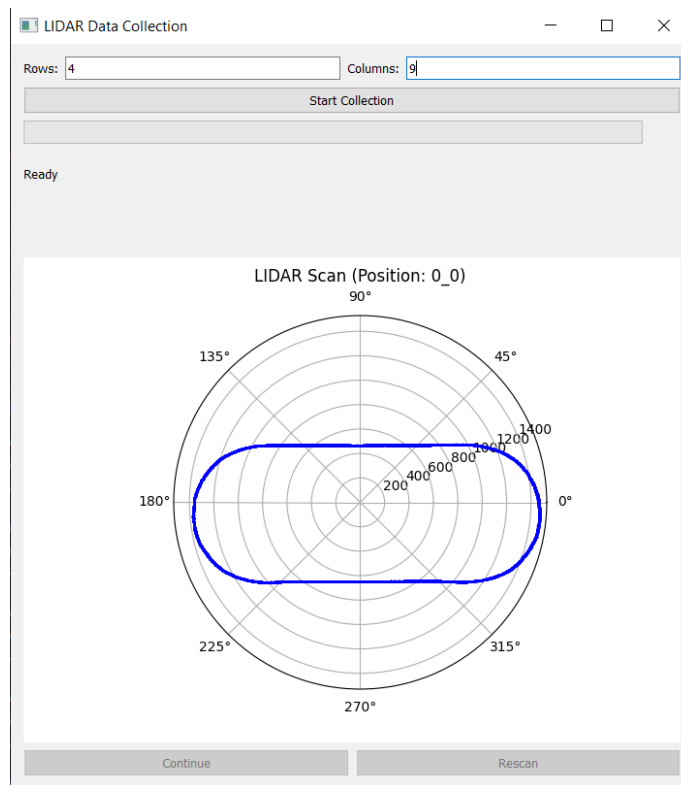
Eksperimentui buvo naudojamas ovalo formos stalas (matmenys 2.8x1.1 m), kurio perimetrą juosė sienelė, pagaminta iš balto, blizgaus paviršiaus PVC plastiko. Ši sąranga imitavo dvimatį uždaro erdvės skerspjūvį (**7 pav.**). Matavimai atlikti naudojant pigios konstrukcijos lazerinį skenavimo įrenginį (LiDAR), jį nuosekliai statant į 36 iš anksto numatytas pozicijas, išdėstytas 4 stulpeliais po 9 pozicijas, taip padengiant skirtingus atstumus ir kampus iki sienelės.



7 pav. Eksperimento vykdymo įranga ir jos išdėstymas

Duomenų surinkimas eksperimento metu buvo valdomas per specialiai Python kalba sukurtą vartotojo sąsajos programą, kuri užtikrino ryšį su lazeriniu skenavimo įrenginiu ir realiu laiku apdorojo gautus matavimų rezultatus. Programinė įranga dinamiškai apskaičiuodavo atstumo ir kampo duomenų masių dydžius ir, remiantis nustatyto kriterijumi, užtikrindavo pakankamo kiekio tam tikro (dominuojančio) dydžio masių surinkimą prieš išsaugant duomenis į failus. Vartotojo sąsaja (UI) turėjo valdymo lauką, leidžiantį nustatyti skenavimo pozicijų skaičių (eilučių ir stulpelių), ir realiu laiku atvaizduodavo preliminarų skenavimo vaizdą (**8 pav.**).

Eksperimentas buvo atliktas du kartus. Pirmojo bandymo metu pastebėta, kad gauti rezultatai buvo iškreipti dėl netolygaus stalo paviršiaus ir lazerio spindulio dalinio užstojimo pačios eksperimento sąrangos elementais: prilaikančios konstrukcijos, maitinimo elementas. Antrojo bandymo metu šios problemos buvo išspręstos: stalas išlygintas, o skenavimo įrenginys pakeltas į optimalų aukštį, užtikrinantį, kad lazerio trajektorija visame diapazone nebūtų blokuojama. Taip pat, siekiant užtikrinti duomenų kokybę tyrimo eigoje, buvo naudojamas realaus laiko skenavimo atvaizdavimas programos sąsajoje.



8 pav. Antrojo bandymo vartotojo sąsaja

Pagrindinis surinktas informacijos tipas šių eksperimentų metu buvo atstumo ir kampo porų masyvai kiekvienam skenavimo ciklui iš visų 36 pozicijų.

4.3.2. Duomenų apdorojimo procesas

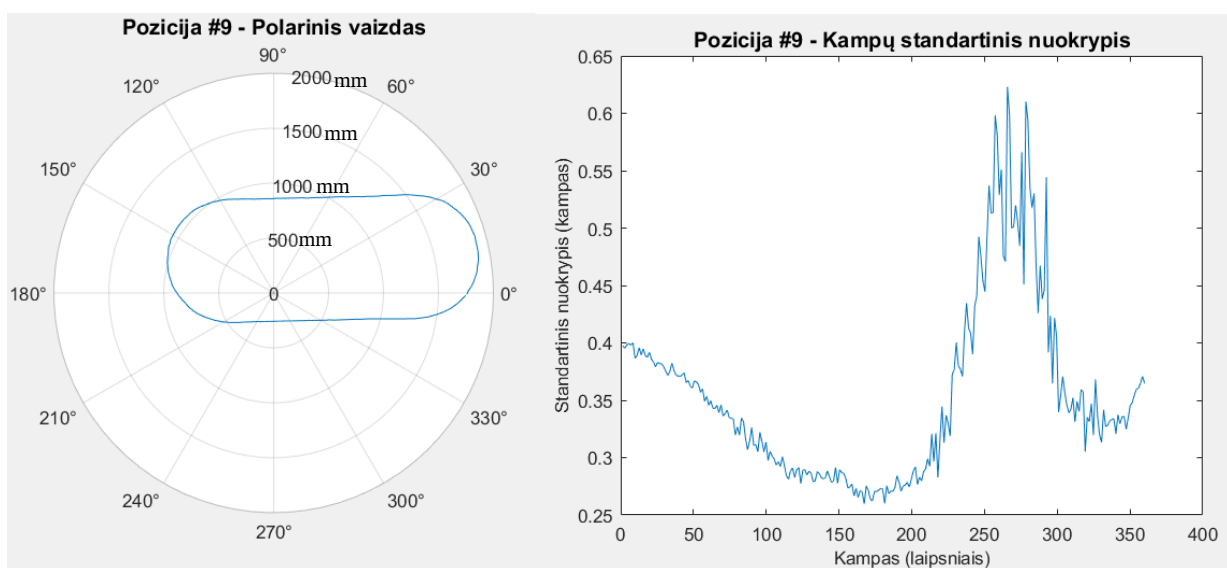
Surinkti duomenys buvo apdoroti naudojant MATLAB aplinką. Pagrindiniai duomenų apdorojimo žingsniai:

1. Masyvų ilgio suvienodinimas: dėl pigesnės konstrukcijos skenavimo įrenginio netolygaus sukimosi greičio, vieno apsisukimo metu gautų matavimų masyvų ilgiai skyrėsi. Siekiant tai išspręsti, buvo pasirinktas dominuojantis masyvo ilgis (dažniausiai pasikartojantis per kelis skenavimus konkrečioje pozicijoje), ir tolimesnei analizei atrinkti tik šio ilgio duomenų masyvai, iš kiekvienos pozicijos paimta po 60 vienodo ilgio skenavimo ciklų.
2. Kampinio matavimo stabilumo įvertinimas: kiekvienoje iš 36 skenavimo įrenginio pozicijų, buvo apskaičiuotas standartinis nuokrypis (*std* funkcija) kampo matavimo reikšmėms, atitinkančioms tą pačią teorinę kampinę padėtį per 60 atliktų skenavimo ciklų. Šis rodiklis parodo kampinio matavimo stabilumą arba išsibarstymą kiekviename matavimo taške aplink visą perimetrą.
3. Vizualizavimas: kiekvienai pozicijai buvo generuojami du grafikai: a) poliarinis grafikas (*polarplot* funkcija), atvaizduojantis vieno skenavimo ciklo metu išmatuotus atstumus skirtingais kampais, siekiant parodyti bendrą geometriją; b) standartinio nuokrypio grafikas, atvaizduojantis apskaičiuotą kampinio matavimo standartinę nuokrypį pagal kampą.

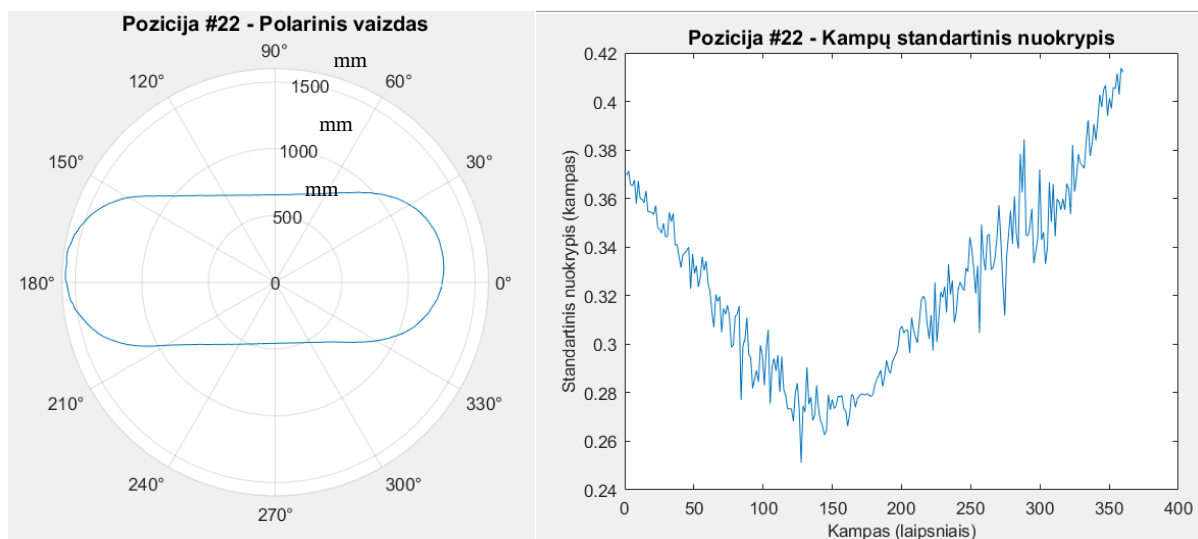
4.3.3. Eksperimento rezultatų išvados

Duomenų analizė atskleidė nuoseklią tendenciją visose 36 matavimo pozicijose. Kaip pavyzdžiai, detaliau analizuojami rezultatai iš 9-osios artimos pozicija sieniei ir 22-osios tolimesnės pozicijos matavimo vietų.

Grafike (9 pav.) kairėje pusėje pateiktas 9-osios pozicijos poliarinis atstumo grafikas rodo ovalią matuojamo perimetro formą ir skenavimo įrenginio padėtį arti sienelės ypač $\sim 270^\circ$ kryptimi. Dešinėje pusėje pateiktas kampinio matavimo standartinio nuokrypio grafikas aiškiai rodo, kad didžiausias kampo matavimo nestabilumas, didžiausias standartinis nuokrypis, siekiantis beveik 0.6 laipsnio, yra stebimas tose kryptyse, kur atstumas iki sienelės yra mažiausias ir lazerio kritimo kampas į blizgų PVC paviršių yra artimas statmenam.



9 pav. 9 pozicijos skenavimo rezultatai ir kampinio matavimo standartinis nuokrypis



10 pav. 22 pozicijos skenavimo rezultatai ir kampinio matavimo standartinis nuokrypis

Palyginimui, grafike (10 pav.) pateikti analogiški grafikai iš 22-osios matavimo pozicijos, kuri yra toliau nuo sienelių. Pastebima, kad bendras kampinio matavimo standartinis nuokrypis yra

mažesnis, didžiausios vertės siekia 0.4 laipsnio. Vis dėlto, pati tendencija išlieka – santykinai didesnis kampinis nestabilumas stebimas ten, kur lazerio kritimo kampas į paviršių yra statesnis.

Apibendrinant visų 36 pozicijų rezultatus, galima teigti, kad naudojant pigios konstrukcijos skenavimo įrenginį ir matuojant baltą, blizgų PVC paviršių, kampinio matavimo stabilumas yra prastesnis tose zonose, kur atstumas iki paviršiaus yra mažas, o lazerio kritimo kampas yra artimas statmenam. Šis efektas silpnėja didėjant atstumui, tačiau pati tendencija išlieka. Tai rodo, kad tokiomis sąlygomis gauti kampiniai matavimai yra mažiau patikimi artimose ir stačiai skenuojamose zonose.

Šis 2D eksperimentas, nors ir atliktas naudojant pigesnę įrangą ir specifinį paviršių, išryškino fundamentalią problemą – lazerinio skenavimo rezultatų kokybė priklauso nuo matavimo geometrijos, atstumo ir kampo, bei paviršiaus savybių, šiuo atveju blizgumo. Konkrečiai, pademonstruotas kampinio matavimo stabilumo sumažėjimas esant mažam atstumui ir stačiam kritimo kampui į atspindintį paviršių.

Nors šio eksperimento rezultatai negali būti tiesiogiai perkelti aukštos kokybės 3D skenavimo įrenginiams, naudojamiems pagrindiniame darbe, jie iliustruoja potencialius iššūkius ir paklaidų šaltinius, kurie gali pasireikšti, nors ir mažesniu mastu, skenuojant realias kuro talpas. Tai ypač aktualu vertinant duomenis, surinktus arti talpos sienelių, vidinių konstrukcijų ar specifinių paviršių. Šis eksperimentas pabrėžia būtinybę atsižvelgti į matavimo geometriją ir paviršiaus charakteristikas interpretuojant 3D skenavimo duomenis ir pagrindžia detalesnės informacinių parametrų analizės poreikį, atliekamą 5 skyriuje.

5. Horizontalios kuro talpos 3D duomenų apdorojimas

Iš įmonės, atliekančios kuro talpų kalibravimą, gautas taškų debesis yra viso objekto geometrinės informacijos rinkinys, sudarytas iš milijonų taškų, turinčių savo koordinates trijose dimensijose (X, Y, Z). Duomenys buvo surinkti naudojant „FARO Focus Laser Scanner“ [29]. Šie duomenys prieš pirminį naudojimą analizei buvo iš dalies apdoroti - pašalintos akivaizdžios išskirtys, užpildyti trūkstanti taškai ir pritaikyti baziniai filtravimo algoritmai, siekiant užtikrinti aukštą duomenų kokybę. Pirmieji algoritmai bus testuojami naudojant filtruotus duomenis, nes taip galima aiškiau pasitikrinti ar naudojami algoritmai veikia taip kaip planuota. Norint atlikti horizontalaus pjūvio analizę, paruoštame taškų debesyje atliekami šie procesai:

1. Taškų atranka pagal aukštį: aukščio filtravimas atliekamas pasirenkant tik tuos taškus, kurie atitinka norimą Z reikšmę. Tai užtikrina, kad analizuojamas tik konkretus objekto sluoksnis, o nereikalingi duomenys pašalinami siekiant sumažinti analizės sudėtingumą.
2. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas: tikslus skenavimo įrenginio vietos nustatymas yra būtinas, kad būtų išvengta duomenų persidengimo ar netikslumų, atsirandančių dėl netinkamai išdėstyto skenavimo įrenginio.
3. Perimetro segmentavimas: taikant geometrijos algoritmus, perimetras padalinamas į mažesnes dalis (segmentus), kad būtų galima tiksliau aprašyti objekto ribas.
4. Paviršiaus orientacijos nustatymas: naudojant vektorių analizes, nustatomos paviršiaus kryptys, kurios padeda atkurti tikslią objekto formą.

Horizontalaus pjūvio analizė yra būtina ne tik tiksliam objekto geometrijos supratimui, bet ir jo deformacijų ar kitų pokyčių stebėsenai.

5.1. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymo algoritmas sintetiniu būdu paruoštame taškų debesyje

Išanalizavus gautus 3D debesies duomenis pastebėta, kad koordinačių ašies pradžia nėra skenavimo įrenginio pozicija, todėl iš gautų duomenų pirma reikia nustatyti skenavimo įrenginio poziciją debesyje, tai yra fundamentali užduotis, turinti įtakos visiems tolimesniems analizės etapams. Tai reikalauja kruopštaus taškų tankio ir jų pasiskirstymo analizės.

5.1.1. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas duomenų pjūvyje

Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas remiasi keliais pagrindiniais principais:

1. Taškų tankio analizė: Aplink skenavimo įrenginį susidaro didesnio tankio zona, nes lazerio spindulys sklinda iš vieno taško į visas puses vienodu kampiniu žingsniu, sukurdamas tankesnę taškų tinklą arčiau skenavimo įrenginio. Šiam principui pritaikyti naudojama dviejų dimensijų histograma (ang. *2D histogram*), kuri suskaičiuoja taškų tankį skirtingose erdvės dalyse.
2. Vidinės zonos atranka: Iš visų taškų atrenkami 20% arčiausiai masės centro esančių taškų. Šis procentas parinktas empiriškai, atsižvelgiant į tipinį taškų pasiskirstymą aplink skenavimo įrenginį. Atranka atliekama apskaičiuojant Euklido atstumus nuo kiekvieno taško iki masės centro:

$$h = \sqrt{(x - x_{centras})^2 + (y - y_{centras})^2} \quad (1)$$

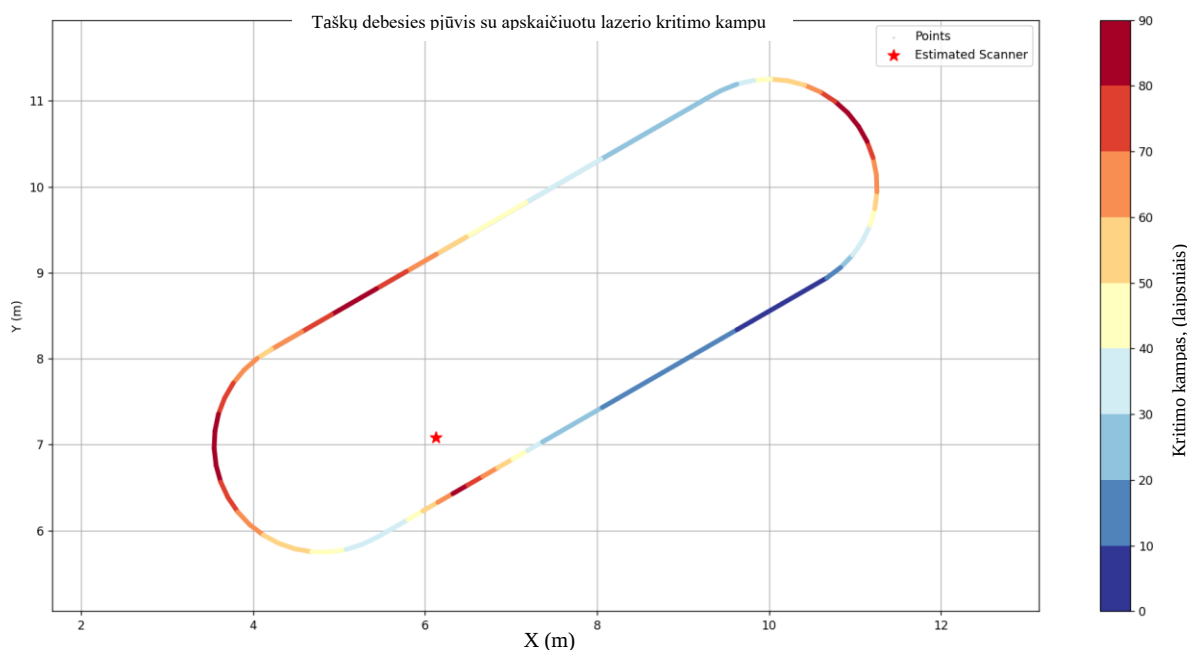
3. Tankio minimumų paieška: Vidinėje zonoje sudaroma smulkesnė histograma, kurioje ieškoma mažiausio tankio sritis. Ši sritis su didžiausia tikimybe atitinka skenavimo įrenginio poziciją, nes būtent iš jos sklinda lazerio spinduliai.

Pagrindinis metodo privalumas yra jo universalumas - jis gali būti taikomas įvairioms geometrijoms ir nereikalauja išankstinių žinių apie skenuojamą objektą.

Pozicijos nustatymo tikslumas priklauso nuo kelių faktorių:

- taškų debesies tankio;
- skenuojamos geometrijos sudėtingumo;
- histogramos gardelių dydžio parinkimo;
- vidinės zonos dydžio (procentinės dalies) parinkimo.

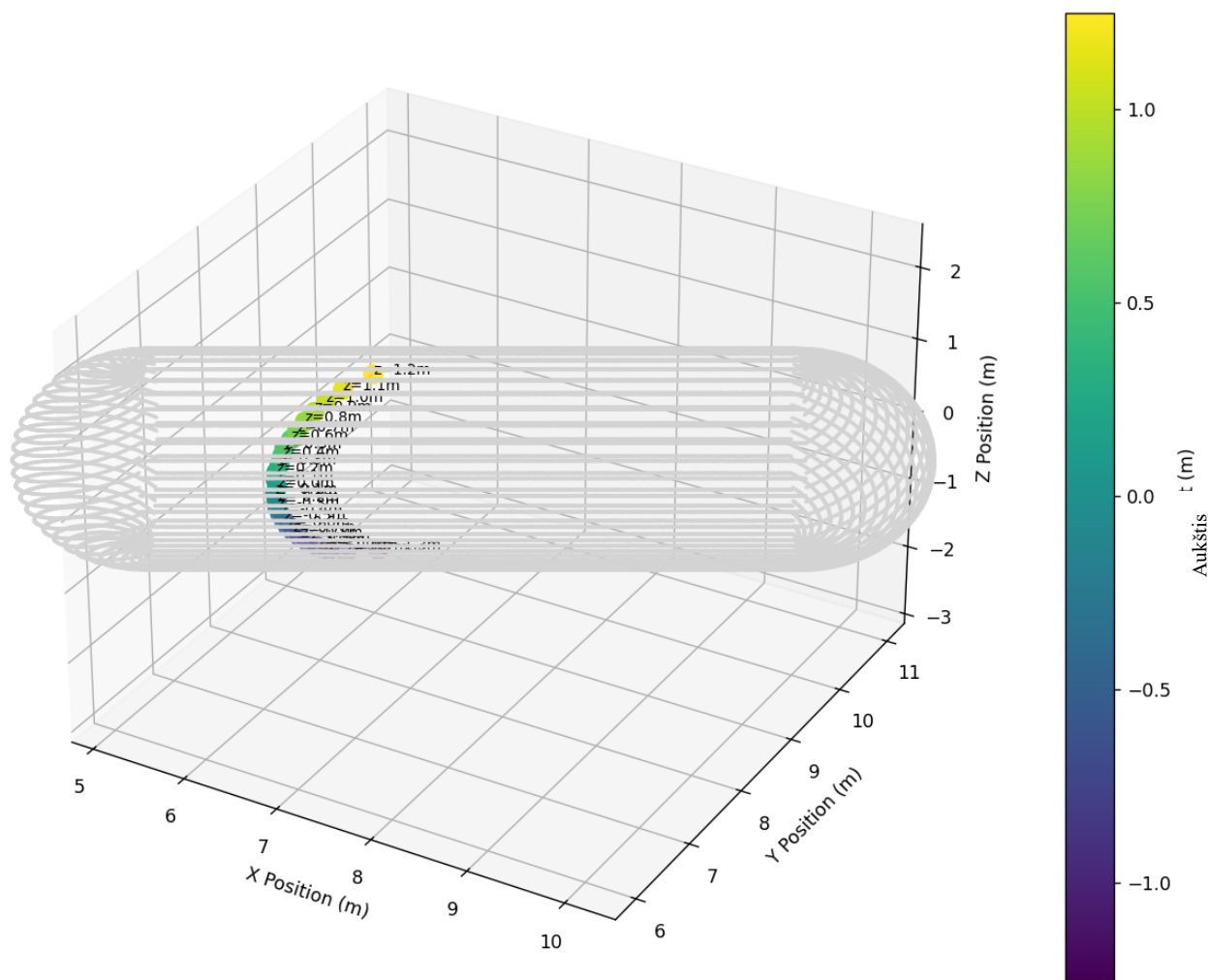
Atsižvelgiant į paminėtus faktorius, buvo parašytas programinis įrankis PY aplinkoje, skirtas suskaičiuoti skenavimo įrenginio poziciją. Pirminis skaičiavimo rezultatas, gautas parašytu įrankiu, pateikiamas **11 pav.**



11 pav. Skenavimo įrenginio pozicija duomenų pjūvyje

Apskaičiuojant skenavimo įrenginio poziciją tik iš pavienių pjūvių duomenų gaunami netikslūs rezultatai, visuose Z ašies pjūviuose skenavimo įrenginio X ir Y koordinatės ženkliai skiriasi (**12 pav.**), nes neatsižvelgiama į pilną taškų debesies struktūrą Z ašyje. Pjūvių analizė, nors ir naudinga pradiniam pozicijos įvertinimui, negali pilnai atspindėti tikrosios skenavimo įrenginio pozicijos dėl kelių priežasčių:

- taškų tankio pasiskirstymas skiriasi skirtinguose aukščiuose;
- geometrinės struktūros gali keistis vertikalia kryptimi;
- pjūviai gali neapimti svarbių objekto charakteristikų.



12 pav. Skenavimo įrenginio pozicija skirtinguose pjūvio aukščiuose

Todėl tiksliai skenavimo įrenginio pozicijai nustatyti būtina naudoti visą trimačių taškų debesies informaciją, taikant anksčiau aprašytą 3D metodiką. Toks metodas leidžia įvertinti visą erdvinę taškų pasiskirstymo informaciją ir užtikrina patikimesnius rezultatus tolimesnei analizei.

5.1.2. Skenavimo įrenginio pozicijos nustatymas erdvėje

Pereinant nuo 2D pjūvio prie pilno 3D taškų debesies analizės, skenavimo įrenginio pozicijos nustatymo algoritmas buvo pritaikytas darbui su trimis dimensijomis, integruojant pažangius optimizavimo metodus. Šiam tikslui buvo pasirinktas L-BFGS-B [30] (ang. *Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno with Bounds*) optimizavimo metodas, kuris leidžia efektyviai nustatyti skenavimo įrenginio poziciją didelių taškų debesų atveju.

Skenavimo įrenginio pozicijos erdvėje algoritmo pagrindą sudaro keturi esminiai komponentai:

1. **Tūrinė tankio analizė.** Naudojama trimatė histograma taškų tankio skaičiavimui erdvinuose tūrio elementuose (vokseliuose). Vokselių dydis parenkamas automatiškai pagal taškų debesies charakteristikas - apskaičiuojamas vidutinis taškų tankis kubiniame metre, siekiama vidutiniškai 100 taškų viename vokselyje, o gardelės dydis ribojamas 10-100 vokselių intervale kiekvienoje ašyje.

2. **Adaptyvus erdvės segmentavimas.** Erdvė dalijama į sluoksnius Z ašyje, kur kiekviename sluoksnyje atliekama išsami analizė: tiriamas taškų tankio pasiskirstymas, identifikuojami tankio gradiento pokyčiai ir nustatoma tikėtina skenavimo įrenginio pozicija. Šis segmentavimas leidžia tiksliau įvertinti skenavimo įrenginio poziciją skirtinguose aukščiuose.

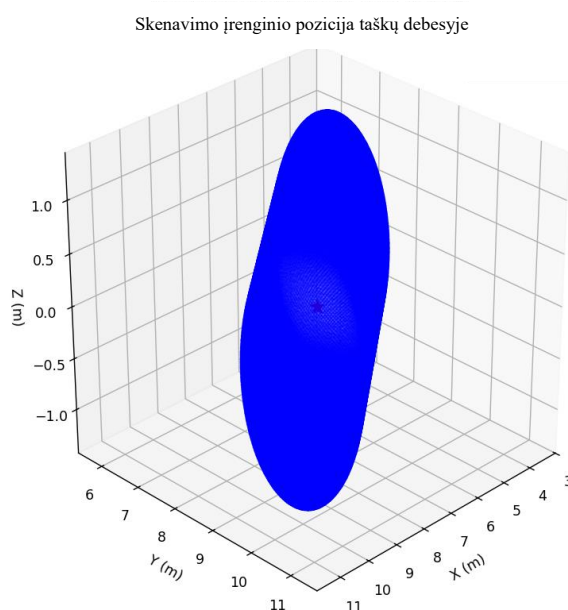
3. **Optimizavimo strategija.** L-BFGS-B metodas pasirinktas dėl kelių esminių privalumų: galimybės nustatyti paieškos ribas kiekvienai koordinatei ir efektyvaus atminties panaudojimo, sumažinančio skaičiavimų sudėtingumą nuo $O(n^2)$ iki $O(n)$. Optimizavimo procesas pradedamas nuo trijų strateginių pradinių spėjimų (taškų debesies centro, apatinio ir viršutinio trečdalio), kiekvienai pozicijai atliekant iki 100 iteracijų.

4. **Tikslo funkcijos optimizavimas.** Vertinami trys pagrindiniai kriterijai: atstumų proporcingumas taškų tankiui (ang. *inverse square law*), bendras atstumas iki visų taškų ir Z pozicijos įtaka tankio pasiskirstymui. Ypatingas dėmesys skiriamas optimalios Z pozicijos paieškai, kur tankio gradientas yra ryškiausias.

Algoritmo tikslumas priklauso nuo kelių esminių faktorių:

- taškų debesies tankio ir pasiskirstymo tolygumo visose ašyse;
- skenuojamos geometrijos sudėtingumo ir simetriškumo;
- vokselių dydžio parinkimo;
- optimizavimo parametrų suderinimo;

Atsižvelgiant į paminėtus faktorius, buvo parašytas patobulintas programinis įrankis PY aplinkoje, skirtas suskaičiuoti skenavimo įrenginio poziciją. Skaičiavimo rezultatas, gautas parašytu įrankiu, pateikiamas **13 pav.**



13 pav. Skenavimo įrenginio pozicija trimatėje erdvėje

Eksperimentiniai tyrimai patvirtino, kad šis algoritmas pasižymi greitesne konvergencija, didesniu stabilumu, mažesne priklausomybe nuo pradinio spėjimo ir atsparumu lokaliems minimumams.

Nustatyta skenavimo įrenginio pozicija tampa esminiu parametru tolimesniuose analizės etapuose, ypač skaičiuojant kampus tarp skenavimo įrenginio ir paviršiaus normalės bei padalinant pjūvių perimetrą į vienodo ilgio atkarpas.

5.2. Perimetro apskaičiavimo algoritmas

Nustačius skenavimo įrenginio poziciją, sekantis žingsnis yra skenuojamo objekto pjūvio perimetro apskaičiavimas. Šis procesas yra svarbus norint analizuoti objekto geometriją ir nustatyti paviršiaus orientaciją skirtingose vietose. Perimetro radimui naudojamas kombinuotas metodas, apjungiantis iškiilojo daugiakampio (ang. *convex hull*) algoritmą su papildomais filtravimo žingsniais.

Pirmiausia atliekamas taškų debesies pjūvis pasirinktame aukštyje. Pjūvio plotis parenkamas empiriškai - 5cm, kas leidžia surinkti pakankamą kiekį taškų analizei, bet išvengia pernelyg didelio duomenų išsibarstymo vertikalia kryptimi. Šiame pjūvyje taškai projektuojami į horizontalią plokštumą, taip supaprastinant tolimesnę analizę.

Perimetro radimo procesas vyksta keliais etapais:

- iškiilojo daugiakampio radimas naudojant Scipy bibliotekos ConvexHull [31] algoritmą. Šis algoritmas efektyviai randa išorinius taškus, apibrėžiančius objekto kontūrą;
- perimetro taškų filtravimas pagal minimalų atstumą tarp taškų. Šis žingsnis pašalina perteklinius taškus ir užtikrina tolygesnį perimetro taškų pasiskirstymą.

Perimetro ilgio apskaičiavimas sumuojant atstumus tarp gretimų taškų.

Gautas perimetras toliau dalinamas į vienodo ilgio segmentus (50 mm). Toks segmentavimas leidžia:

- sistemingai analizuoti paviršiaus orientaciją skirtingose vietose;
- palyginti matavimus tarp skirtingų objekto dalių;
- standartizuoti duomenų analizės procesą.

Perimetro segmentavimo tikslumas - pagrindinis žingsnis analizuojant rezervuaro skerspjūvio geometriją - neatsiejamas nuo pradinio taškų debesies tankio ir pasiskirstymo. Vėlesnei analizei, kurios metu perimetras padalijamas į mažesnius segmentus reikia pasirinkti tinkamą segmento ilgį.

Atsižvelgdami į naudotos skenavimo įrangos specifikacijas - konkrečiai, į maždaug 0,9 mm matavimo neapibrėžties ribą, ypač matuojant tamsesnius paviršius, - ir į rezervuaro geometriją (spindulys $R \approx 2,5$ m arba 2500 mm), įvertinome, kad 50 mm segmento ilgis yra tinkamas.

Svarbiausia suprasti, kiek išlenkta rezervuaro sienelė nukrypsta nuo tiesios linijos šiame 50 mm segmente. Apskrito skerspjūvio, kurio spindulys $R \approx 2500$ mm, 50 mm perimetro segmentas atitinka mažą centrinį kampą (α). Didžiausias šio išlenkto segmento geometrinių nuokrypis nuo atitinkamos tiesiosios akordos vadinamas sagita (h), apskaičiuojamas pagal formulę:

$$h = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \quad (2)$$

Naudojant pateiktą atitinkamą kampą $\alpha \approx 0,6$ laipsnio 50 mm segmentui, apskaičiuojama: $h \approx 0,034$ mm. Šis apskaičiuotas geometrinis nuokrypis yra gerokai mažesnis už skenavimo įrenginiui būdingą matavimo neapibrėžtį. Kadangi dėl faktinio geometrinio kreivumo 50 mm atkarpoje nuokrypis ($\approx 0,03$ mm) yra gerokai mažesnis už jutiklio triukšmo lygį (0,9 mm), šio segmento traktavimas kaip apytiksliai tiesinio vietinei analizei yra geometriškai pagrįstas. Todėl šis 50 mm ilgis yra optimalus kompromisas: jis yra pakankamai detalus, kad būtų galima užfiksuoti didelius geometrinius nuokrypius, tačiau pakankamai ilgas, kad būtų užtikrinta, jog vietinė analizė (pavyzdžiui, plokštumų pritaikymas ar orientacijos nustatymas) būtų stabili ir nebūtų pernelyg paveikta atskiriems taškams būdingo matavimo triukšmo. Žymiai trumpesnėse atkarpose gali dominuoti jutiklio triukšmas, o žymiai ilgesnės atkarpos negalėtų tinkamai atspindėti vietinio rezervuaro sienelės kreivumo.

Kiekviename segmente vėliau atliekama lokali taškų analizė, įskaitant:

- paviršiaus normalės vektoriaus skaičiavimą;
- kampo tarp skenavimo įrenginio spindulio ir paviršiaus nustatymą;
- taškų išsibarstymo nuo teorinės plokštumos įvertinimą.

Svarbu paminėti tai, kad metodas gerai veikia net ir esant netolygiam taškų pasiskirstymui, kas yra dažna problema realių objektų skenavimuose.

5.3. Paviršiaus orientacijos nustatymo algoritmas

Padalinus perimetrą į vienodo ilgio segmentus, kiekvienam segmentui reikia nustatyti jį geriausiai aprašančią plokštumą ir apskaičiuoti lazerio spindulio kritimo kampą. Šis procesas yra kritiškai svarbus norint įvertinti matavimo tikslumą, nes lazerio spindulio kritimo kampas turi tiesioginę įtaką matavimo patikimumui.

5.3.1. Plokštumos pritaikymas segmentui

Siekiant kiekvienam taškų debesies segmentui pritaikyti plokštumą, kuri geriausiai apibūdintų jame esančių taškų geometriją, buvo naudojamas mažiausių kvadratų metodas, realizuotas per singuliarinės vertės išskaidymą (angl. *Singular Value Decomposition* - SVD).

SVD plokštumos pritaikymo procesas vyksta tokiais pagrindiniais žingsniais:

1. Segmento taškų centravimas: pirmiausia iš visų segmento taškų koordinatų atimama jų vidutinė vertė. Tai perkelią taškų debesies centrą į koordinatų pradžią, palengvinant tolimesnę analizę.
2. Singuliarinės vertės išskaidymas (SVD): atliekamas centruotų taškų duomenų matricos SVD. SVD dekomponuoja duomenis į pagrindinius komponentus (vektorius) ir singuliarines vertes, apibūdinančias duomenų sklaidą (variaciją) tų vektorių kryptimis.
3. Normalės vektoriaus nustatymas: SVD rezultate gauti vektoriai rodo pagrindines duomenų sklaidos kryptis. Kryptis, atitinkanti mažiausią singuliarinę vertę, yra mažiausios sklaidos

kryptis. Būtent šia kryptimi nukreiptas vektorius yra statmenas plokštumai, kuri geriausiai tinka duomenims mažiausių kvadratų prasme. Taigi, plokštumos normalės vektoriumi tampa vektorius, atitinkantis mažiausią singularinę vertę.

4. Normalės krypties koregavimas: galiausiai, nustatyto normalės vektoriaus kryptis patikslinama taip, kad ji visada būtų nukreipta į išorę nuo skenavimo įrenginio pozicijos. Tai užtikrina nuoseklų kampo tarp lazerio spindulio ir paviršiaus interpretavimą visuose segmentuose.

Šis SVD apskaičiavimo algoritmas leidžia tiksliai apibrėžti lokalią paviršiaus orientaciją kiekviename segmente, net esant triukšmingiems ar neišsamiesiems duomenims, kas yra svarbu tolesniems kritimo kampo ir taškų išsibarstymo skaičiavimams.

5.3.2. Lazerio kritimo kampo skaičiavimas

Po to, kai kiekvienam segmentui pritaikoma geriausiai jį atitinkanti plokštuma ir nustatomas jos normalės vektorius, sekantis kritiškai svarbus žingsnis yra apskaičiuoti lazerio spindulio kritimo kampą kiekvienam segmentui. Šis kampas yra itin svarbus įvertinant matavimo tikslumą ir patikimumą, nes, kaip vėliau parodys atlikta analizė, matavimo kokybė tiesiogiai priklauso nuo to, koku kampu lazerio spindulys pasiekia paviršių.

Lazerio kritimo kampo skaičiavimas atliekamas naudojant vektorių algebrą, remiantis skenavimo įrenginio pozicija ir segmento pritaikytos plokštumos normalės vektoriumi. Pagrindiniai skaičiavimo žingsniai yra šie:

1. Sudaromas vektorius nuo skenavimo įrenginio iki segmento centro: apskaičiuojamas krypties vektorius, jungiantis žinomą skenavimo įrenginio poziciją su kiekvieno analizuojamo segmento centru. Šis vektorius atspindi lazerio spindulio kryptį, pasiekiančią konkretų segmentą.
2. Vektorių normalizavimas: kadangi kampui tarp vektorių skaičiuoti svarbios tik jų kryptys, o ne ilgiai, tiek įrenginio - segmento vektorius, tiek segmento normalės vektorius yra normalizuojami (padalinami iš savo ilgio, kad taptų vienetiniais vektoriais).
3. Kampo tarp spindulio ir normalės skaičiavimas: naudojant normalizuotų vektorių skaliarinę sandaugą ir atvirkštinę kosinuso funkciją, apskaičiuojamas kampas tarp lazerio spindulio krypties ir segmento plokštumos normalės vektoriaus. Šis kampas rodo, kiek spindulys nukrypsta nuo tiesaus statmens paviršiui.
4. Kritimo kampo (paviršiaus atžvilgiu) nustatymas: nors skaliarinė sandauga tiesiogiai suteikia kampą tarp spindulio ir normalės, šiame darbe "kritimo kampas" dažniausiai apibrėžiamas kaip kampas tarp spindulio ir pačio paviršiaus.. Todėl galutinis kritimo kampas gaunamas atimant apskaičiuotą kampą nuo 90° .

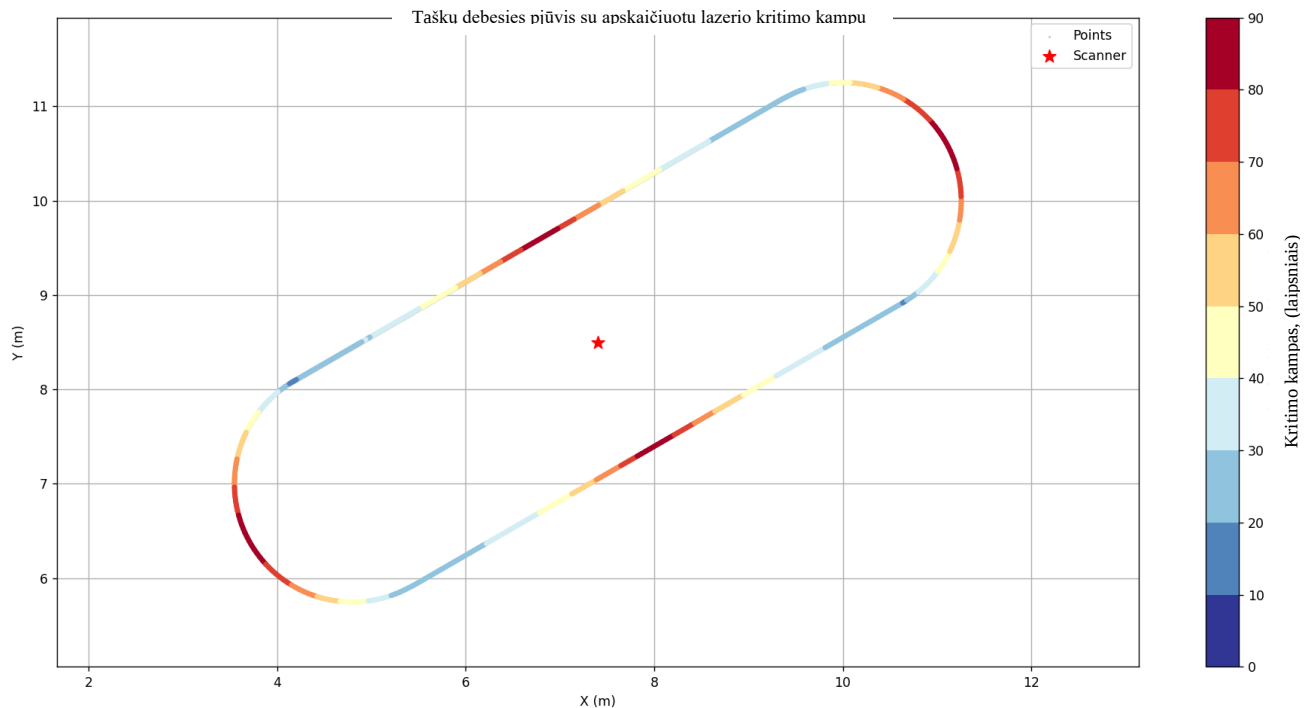
Šis procesas leidžia kiekybiškai apibrėžti skenavimo geometriją kiekviename taške ir susieti ją su vėliau analizuojamais matavimo kokybės rodikliais, tokiais kaip taškų išsibarstymas.

5.3.3. Rezultatai

Be plokštumos pritaikymo ir kritimo kampo skaičiavimo, kiekvienam segmentui papildomai nustatomi du svarbūs parametrai, leidžiantys geriau įvertinti lokalią matavimo kokybę: taškų išsibarstymo nuo pritaikytos plokštumos kvadratinė paklaida (RMS) ir taškų tankis segmente. Šie

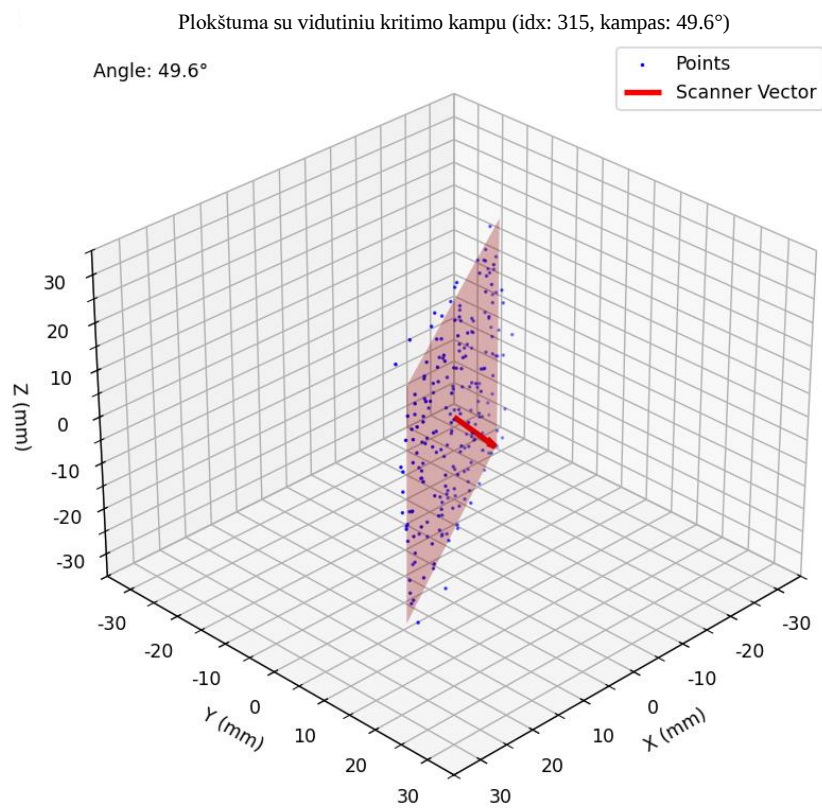
rodikliai yra svarbūs įvertinant pritaikytos plokštumos tinkamumą ir apskaičiuoto kampo patikimumą konkrečioje paviršiaus srityje.

Pirminei rezultatų vizualizacijai (**14 pav.**) pateikiamas apskaičiuoto kritimo kampo pasiskirstymo atvaizdavimas viename talpos pjūvyje. Ši diagrama iliustruoja, kaip kritimo kampas kinta perimetru, atspindėdamas lokalią paviršiaus orientaciją skenavimo įrenginio atžvilgiu. Iš šios vizualizacijos matomos sritys, kuriose spindulys krenta beveik statmenai (apie 90°) ir sritys, kur kampas yra mažesnis.

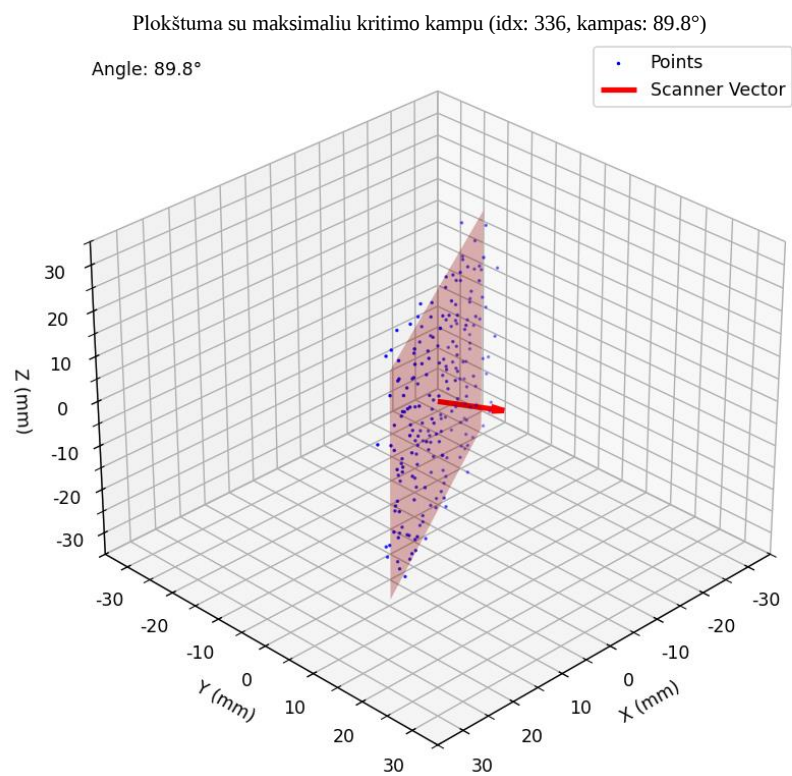


14 pav. Kritimo kampo atvaizdavimas pjūvyje

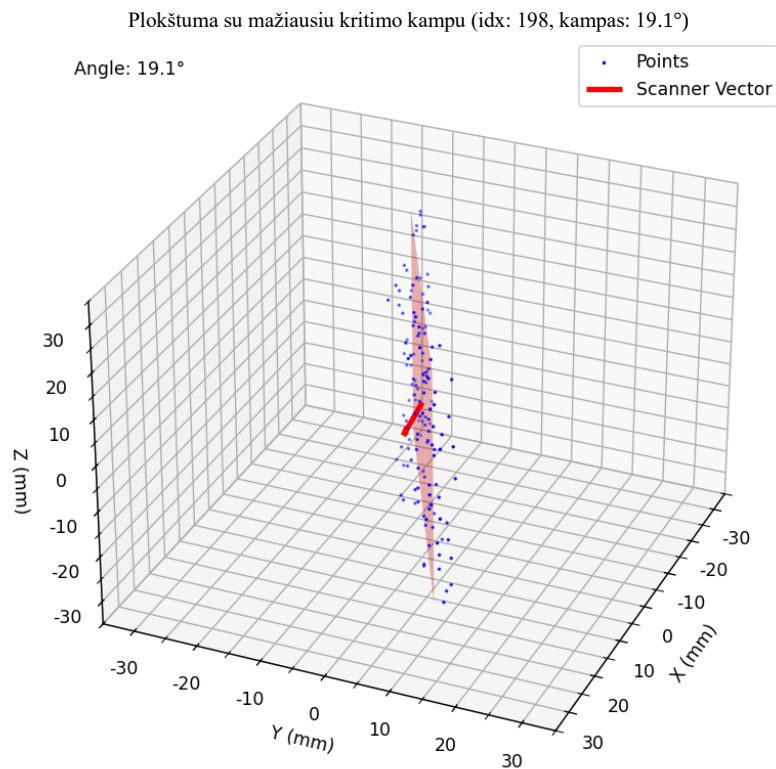
Siekiant vizualiai patikrinti algoritmų veikimą ir įsitikinti, kad apskaičiuotos RMS vertės atitinka realią taškų sklaidą, buvo atlikta keleto pasirinktų segmentų 3D vizualizacija (**15 pav.- 17 pav.**). Šios vizualizacijos parodė, kad, dirbant su filtruotais ir pirminiu būdu apdorotais duomenimis, pritaikytos plokštumos gerai atvaizduoja taškų debesį konkrečiuose segmentuose, o apskaičiuota RMS vertė išties atspindi lokalią taškų sklaidą aplink pritaikytą plokštumą. Pavyzdžiui, (**15 pav.**) rodo segmentą su vidutiniu kritimo kampu (49.6°), kur taškai glaudžiai telkiasi apie plokštumą, (**16 pav.**) – segmentą su didžiausiu kampu (89.8°), o (**17 pav.**) – segmentą su mažiausiu kampu (19.1°). Ši vizualizacija leido užtikrinti, kad algoritmų veikimas ir skaičiuojami rodikliai (pvz., kampas, RMS) yra patikimi be ryškaus trūkstamų taškų ar triukšmų poveikio, gauto pradiniame duomenų rinkinyje.



15 pav. Plokštuma su vidutiniu 49.6° lazerio spindulio kritimo kampu



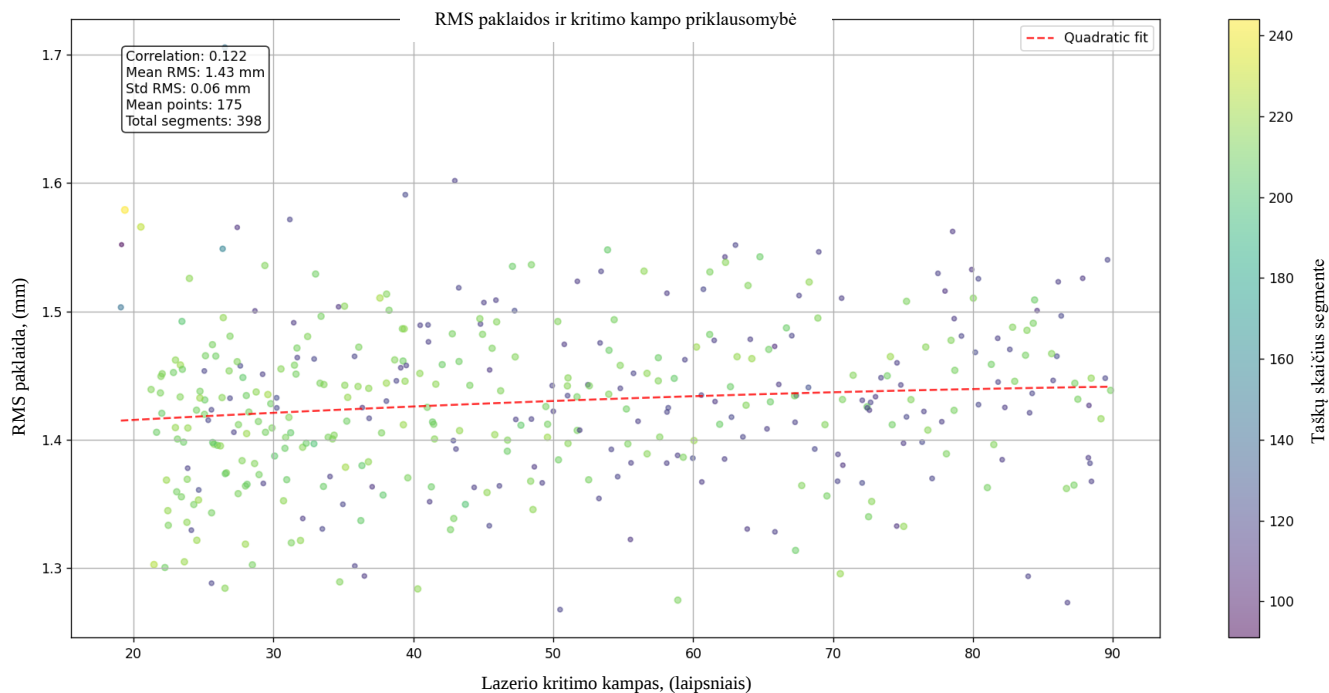
16 pav. Plokštuma su didžiausiu 89.8° lazerio spindulio kritimo kampu



17 pav. Plokštuma su mažiausiu 19.1° lazerio spindulio kritimo kampu

Atlikus šią pirminę validaciją, buvo pereita prie pagrindinės skerspjūvio analizės dalies – kritimo kampo ir vidutinės kvadratinės paklaidos (RMS) ryšio tyrimo. Svarbiausias aspektas buvo ištirti, ar didesnis kritimo kampas (artimas 90°) lemia mažesnę RMS paklaidą, o mažesni kampai (artimi 0°) – didesnę paklaidą. **(18 pav.)** pateikiami šios koreliacinės analizės rezultatai, vaizduojantys apskaičiuotas RMS vertes kaip kritimo kampo funkciją šiame konkrečiame išvalytų duomenų rinkinyje.

Analizuojant **(18 pav.)** matoma, kad šiuo konkrečiu atveju, dirbant su išvalytais duomenimis, nebuvo pastebėta stipri koreliacija tarp lazerio kritimo kampo ir segmento vidutinės kvadratinės paklaidos. Kitaip tariant, didesni kritimo kampai nebūtinai lėmė žymiai mažesnes RMS vertes ir atvirkščiai šiame duomenų rinkinyje.



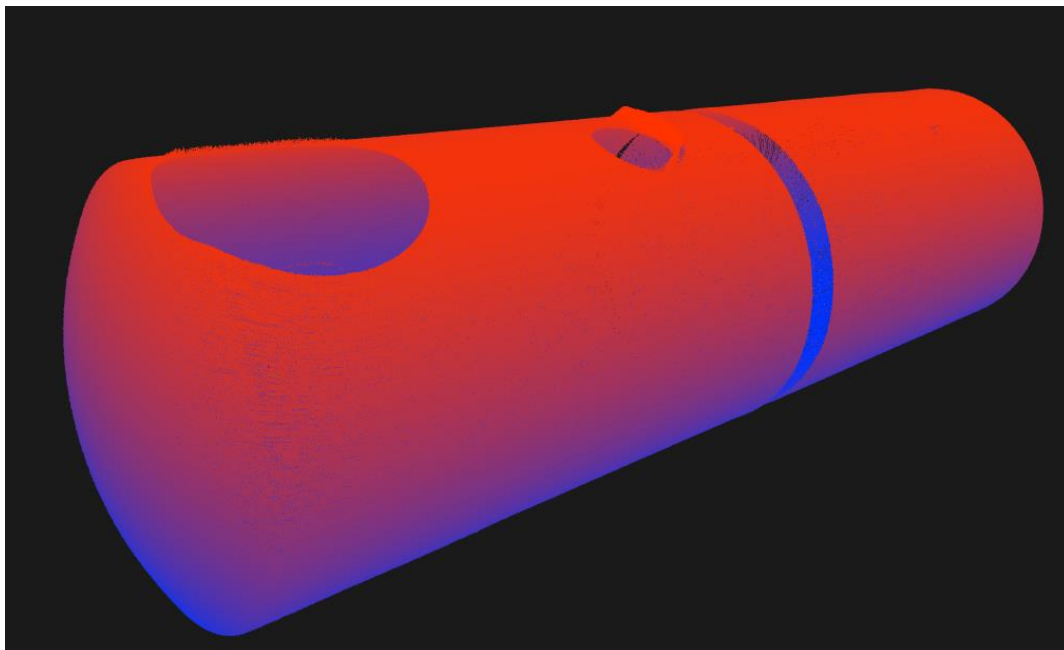
18 pav. Koreliacija tarp kritančio kampo ir RMS paklaidos

Šis rezultatas paaiškinamas tuo, kad šioje skyriaus dalyje analizei buvo naudojami jau išvalyti ir pirminiu būdu apdoroti (sintetiniai) duomenys, kuriems anksčiau buvo pritaikyti išskirčių filtravimo ir duomenų interpoliacijos metodai. Šie išankstinio apdorojimo veiksmai buvo atlikti siekiant pagerinti bendrą duomenų kokybę ir palengvinti pradinis algoritmus. Tačiau, pašalindami arba išlygindami anomalijas ir triukšmą, būdingą neapdorotiems duomenims, šie metodai kartu užmaskavo arba sumažino tuos efektus (susijusius su krašutiniais kampais, mažu taškų tankiu ir pan.), kurie paprastai ir lemia koreliaciją tarp kritimo kampo ir RMS paklaidos. Dėl to, analizuojant tokį švelnesnį duomenų rinkinį, tiesioginė kritimo kampo įtaka RMS paklaidai tapo ne tokia akivaizdi.

Todėl galima daryti prielaidą, kad šiame konkrečiame scenarijuje, naudojant aukštos kokybės prietaisą ir taikant išankstinį duomenų apdorojimą, kritimo kampo įtaka matavimo netikslumui (vertinamam per RMS) buvo ženkliai sumažinta arba užmaskuota kitų veiksnių. Šie pradiniai rezultatai atskleidė, kad, nors kritimo kampas teoriškai yra svarbus, praktikoje, esant aukštai duomenų kokybei ir švelniam apdorojimui, tiesioginė koreliacija ne visada yra akivaizdi. Detalesnė ir gilesnė analizė, naudojant neapdorotus duomenis, aprašyta vėlesniuose skyriuose, leis geriau suprasti šių parametru įtaką be išankstinio filtravimo poveikio.

5.4. Duomenų analizės algoritmai realaus skenavimo metu gautiems taškų debesims

Atlikę iš anksto apdorotų ir filtruotų duomenų rinkinio analizę, dabar dėmesį sutelksime į neapdorotą taškų debesį (**19 pav.**).



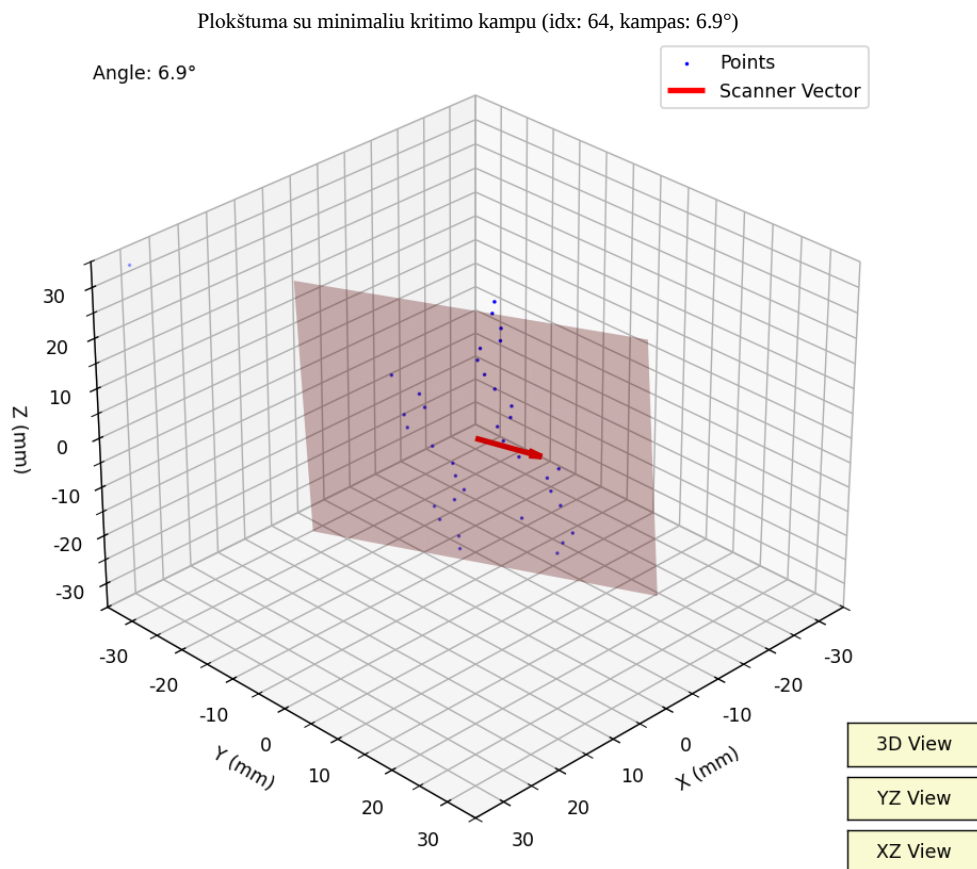
19 pav. Neapdorotų duomenų taškų debesis atvaizdavimas

Šis taškų debesis vaizduoja realaus skenavimo metu gautą neapdorotą horizontalaus kuro talpyklos taškų debesį. Jau pirminėje vizualizacijoje matomos būdingos savybės ir trūkumai, susijusios su skenavimo procesu ir objekto geometrija. Viršutinėje dalyje aiškiai matoma apvali sritis, kurioje taškų nėra – tai vadinamoji „akloji zona“ tiesiai po skenavimo įrenginiu, kurios lazerio spindulys negali pasiekti. Taip pat pastebimos pertraukos ar retesnio tankio zonos talpyklos viduryje ir viršuje, pavyzdžiui, šulinių angos srityje ir ten, kur vidurinės konstrukcijos elementai užstojo dalį išorinės sienelės nuo skenavimo įrenginio perspektyvos, sukurdami duomenų spragas. Šios neapdorotų duomenų ypatybės pabrėžia būtinybę taikyti apdorojimo algoritmus.

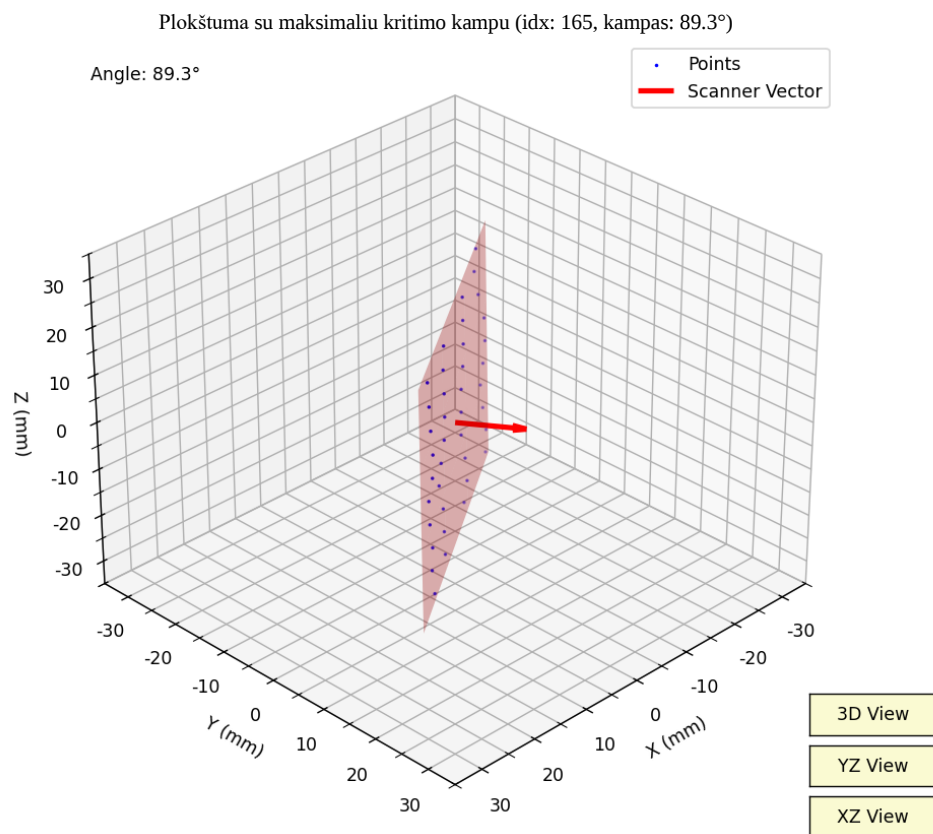
5.4.1. Skerspjūvio analizė

Siekiant geriau suprasti tiesioginio skenavimo duomenims būdingus iššūkius ir pabrėžti duomenų parengimo svarbą, pakartota identiška analizės procedūra. Jos metu tiesiogiai iš neapdorotų duomenų buvo apskaičiuotas lazerio kritimo kampas ir kiekvieno perimetro segmento vidutinė kvadratinė paklaida (RMS) bei ištirta jų koreliacija.

Pagrindinė problema, su kuria susiduriama apskaičiuojant kritimo kampus ir vidutines kvadratinės paklaidas tiesiogiai iš neapdorotų duomenų, yra didelė taškų skaičiaus variacija viename segmente – nuo vos kelių (**20 pav.** ir **21 pav.**) iki kelių šimtų. Toks labai netolygus taškų pasiskirstymas iš esmės iškreipia vietinio plokštumos pritaikymo ir vėlesnių vidutinių kvadratinų verčių skaičiavimų tikslumą, todėl daugelyje segmentų sunku atlikti patikimą statistinę analizę.



20 pav. Plokštuma su mažiausiu 6.9° lazerio spindulio kritimo kampu

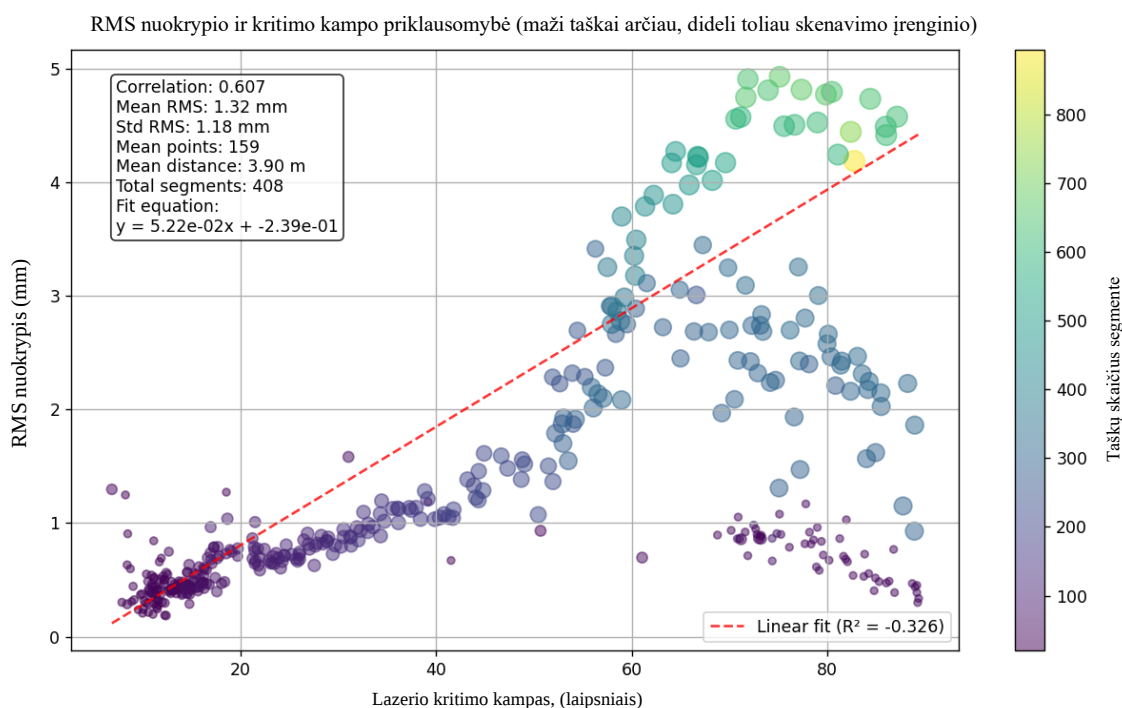


21 pav. Plokštuma su didžiausiu 89.3° lazerio spindulio kritimo kampu

Ši analizė rodo, kad labai svarbus yra skenavimo įrenginiui būdingas tikslumas (nuosekliai fiksuojant taškus) ir būtinybė tinkamai paruošti rezervuarą prieš skenavimą, kad būtų užtikrinta tinkama ir nuosekli duomenų aprėptis visame paviršiuje.

Paviršiaus sąlygų svarbą patvirtina ir Samoilenko ir Zaets darbo „Skysčių laikymo ir transportavimo cisternų ir laivų cisternų kalibravimas lazeriniu skenavimu“ išvados. Jie teigia: „Net ir nedidelis dyzelino kiekis ant cisternos sienelių turi itin neigiamą poveikį skenavimo rezultatams. Standartinis koordinatinių matavimų nuokrypis gali padidėti 10, 20 ar daugiau kartų. Ypač jei spindulys į užterštą paviršių krinta smailiu kampu“ [7]. Tai rodo, kad paviršiaus švarumas yra esminis veiksnys, turintis įtakos skenavimo kokybei ir tikslumui, o užterštumo poveikis ypač ryškus, kai lazerio spindulys į paviršių patenka smailiu kampu.

Įdomu tai, kad mūsų konkretūs rezultatai, gauti naudojant neapdorotus duomenis (**22 pav.**) parodė, kad didžiausios vidutinės kvadratinės vertės paklaidos pirmiausia buvo daromos ne esant aštriems kampams, o segmentuose, orientuotuose beveik statmenai skenavimo įrenginiui (t. y. stačiais kritimo kampais, artimais 90°). Atrodo, kad šis pastebėjimas iš esmės skiriasi nuo Samoilenko ir Zaets akcentuojamų problemų, susijusių būtent su aštriais kampais ant užterštų paviršių.



22 pav. Koreliacija tarp krintančio kampo ir RMS paklaidos

Šiuose duomenyse (**22 pav.**) pastebėta stipri koreliacija tarp didėjančio kritimo kampo ir RMS paklaidos. Atstumas nuo įrenginio iki paviršiaus grafikuose atvaizduotas taško dydžiu – kuo didesnis taškas, tuo jis arčiau skenavimo įrenginio. Atlikus detalesnę analizę matyti, kad didžiausios paklaidos pasireiškia taškuose, kurie yra arčiausiai skenavimo įrenginio ir į kuriuos lazerio spindulys krinta beveik statmenai. Šį reiškinį galima paaiškinti keliais faktoriais:

1. Kai lazerio spindulys krinta beveik statmenai (artimas 90° kampui) į paviršių ir taškas yra arti skenavimo įrenginio, atspindžio intensyvumas gali viršyti optimalias detektoriaus veikimo ribas, sukeldamas signalo persotinimą (galimai ir „Speckle“ efektą [32]) ir padidindamas matavimo paklaidą.

2. Arčiau skenavimo įrenginio esančiuose taškuose lazerio spindulio skerspjūvis dar nėra optimaliai sukoncentruotas, todėl matavimo zona yra platesnė nei nutolusių objektų atveju. Šis efektas ypač pastebimas, kai spindulys krinta statmenai į paviršių.
3. Tankesnio taškų pasiskirstymo zonose (paprastai arčiau skenavimo įrenginio) plokštumos pritaikymas mažiausių kvadratų metodu tampa jautresnis mikroskopiniams paviršiaus nelygumo variacijoms, kas padidina bendrąją RMS paklaidą, nors individualių taškų matavimai gali būti santykinai tikslūs.

Šie rezultatai patvirtina hipotezę, kad skenavimo tikslumas priklauso ne tik nuo kritimo kampo, bet ir nuo atstumo iki matuojamo paviršiaus. Tai svarbi informacija optimizuojant 3D skenavimo procesus horizontalių kuro talpų kalibravimui.

5.4.2. Visos kuro talpos erdvėje analizė

Išnagrinėjus jutiklio veikimo charakteristikas atskiruose 2D skerspjūvio pjūviuose, dabar analizė išplečiama ir apima visą nuskaitytą degalų bako paviršių trimis matmenimis. Nors pjūvių analizė suteikė vertingų įžvalgų tam tikruose aukščiuose, siekiant išsamesnio supratimo reikia įvertinti matavimo kokybės ir skenavimo geometrijos ryšį visame taškų debesies erdviniame plote.

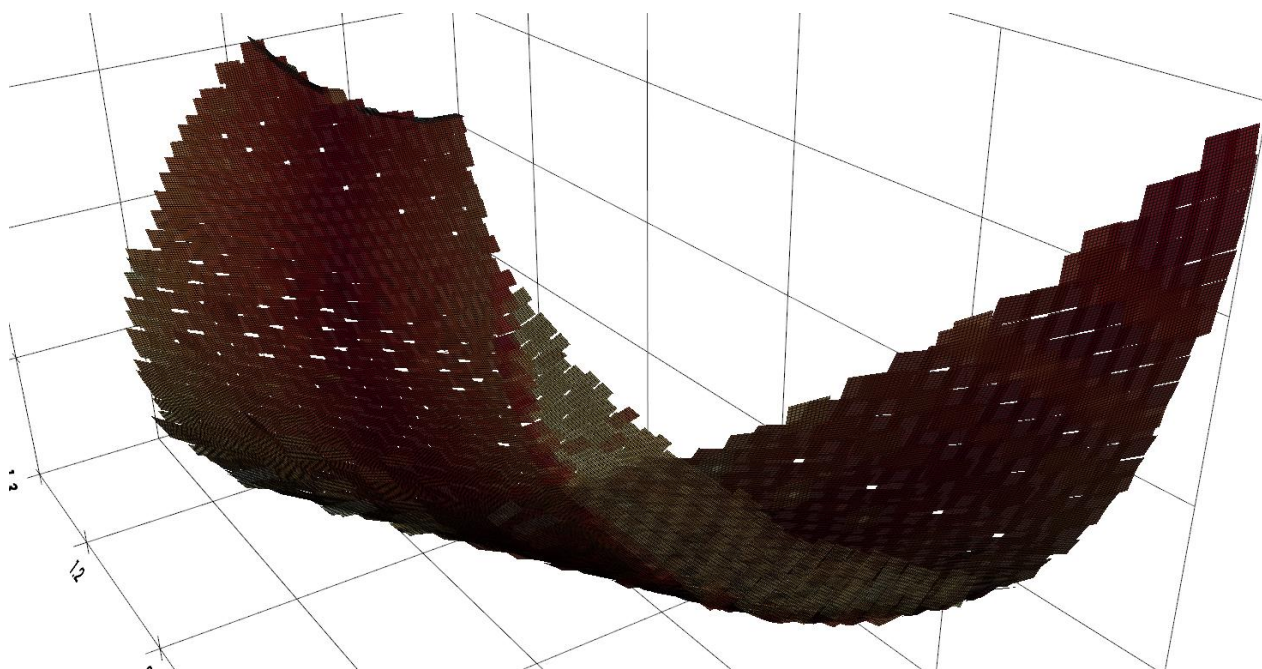
Siekiant šio tikslo, neapdoroti 3D taškų debesies duomenys, vaizduojantys horizontalios talpos vidinį paviršių, buvo sistemingai segmentuojami taikant tinklelio metodą. Paviršius buvo suskirstytas į daugybę gretimų sričių, kurių kiekviena atitinka 50x50 mm plotą. Kiekvienam atskiram segmentui, sukurtam taikant šį procesą, buvo atliekami toliau nurodyti veiksmai, atspindintys vietinę analizę, atliktą 2D pjūviuose:

- geriausiai tinkanti plokštuma segmente esantiems taškams buvo nustatyta naudojant mažiausių kvadratų metodą, taikant singularinės vertės dekompoziciją;
- apskaičiuota vidutinė kvadratinė paklaida (RMS), kuri parodo taškų nuokrypį nuo šios pritaikytos plokštumos;
- apskaičiuotas kritimo kampas, apibrėžiamas kaip kampas tarp įeinančio lazerio vektoriaus (nuo nustatytos skenavimo įrenginio padėties iki segmento centro) ir pritaikytos plokštumos normalės vektoriaus.

Taip pat buvo užregistruotas atstumas nuo skenavimo įrenginio padėties iki kiekvieno segmento centro.

Atlikus išsamų 3D paviršiaus segmentavimą ir analizę, gautas gausus duomenų rinkinys, kuriame taškai visame rezervuaro viduje susieti vietine paviršiaus orientacija (kritimo kampas), atstumas nuo skenavimo įrenginio ir atitinkama matavimo kokybė (vidutinė kvadratinė paklaida).

Siekiant toliau vertinti paviršiaus segmentavimo proceso erdvinį nuoseklumą ir veiksmingumą, Python kalba buvo sukurta trimatė vizualizacija. Šioje vizualizacijoje pavaizduota dalis atskirų 50x50mm dydžio segmentų, apskaičiuotų dalyje rezervuaro paviršiaus (23 pav.).



23 pav. horizontalios talpos dugno segmentas nutolęs 1,2 m atstumu nuo lazerinio skenavimo įrenginio

Šis 3D vaizdas padeda vizualizuoti parašytų funkcijų atitikmenį realybei. Pastebėta, kad dideliuose plotuose, ypač lygesnėse rezervuaro sienelių dalyse, atskiri segmentai jungiasi logiškai ir gretimai, teisingai atkartoja numatomą rezervuaro išlinkimą ir bendrą formą. Apskritai sklandūs perėjimai ir linijinis gretimų segmentų suderinimas šiuose regionuose patvirtina, kad algoritmas sėkmingai apdorojo taškų debesį į prasmingus vietinius plokštuminius elementus.

Tačiau vizualizacija taip pat vertinga norint išryškinti anomalijas. Aiškiai matomos kelios atkarpos, kurių apskaičiuota padėtis ar orientacija smarkiai nukrypsta nuo aplinkinės paviršiaus tendencijos. Šie nutolę arba netaisyklingi segmentai yra svarbūs galimų problemų, kurios gali kilti dėl įvairių priežasčių, indikatoriai:

1. Faktiniai paviršiaus pažeidimai. Segmentas gali tiksliai atspindėti tikrą fizinę cisternos paviršiaus ypatybę, pavyzdžiui, didelę suvirinimo siūlę, įdubimą, išgaubimą arba vidinių įtaisų, turinčių įtakos nuskaitytiems taškams, vietą.
2. Nepakankami duomenys. Kai kuriose 50x50 mm tinklelio srityse gali būti per mažai nuskaitymo taškų dėl užstojimo, mažo atspindžio arba atstumo nuo skenavimo įrenginio. Dėl nepakankamo duomenų kiekio gali atsirasti nestabilus arba blogai apibrėžtas plokštumos atitikimas, todėl segmentas gali būti netiksliai orientuotas.
3. Matavimų triukšmas. Didelis triukšmo lygis arba reikšmingos nuokrypos konkretų segmentą apibrėžiančiuose taškuose gali iškreipti mažiausių kvadratų plokštumos derinimo procesą.
4. Kraštinių efektai. Segmentai, esantys ties nuskaitytos srities ribomis arba besidriekiantys per aštirus geometrinius perėjimus, gali būti ne tokie patikimi.

Todėl šis 3D vizualizavimas leidžia ne tik kokybiškai įvertinti segmentavimo kokybę visame rezervuare, bet ir pasitarnauja kaip labai svarbi diagnostinė priemonė, leidžianti erdvėje tiksliai nustatyti konkrečias sritis, kuriose pirminių duomenų kokybė arba pagrindo paviršiaus geometrijos sudėtingumas galėjo turėti įtakos vietinės plokštuminės aproksimacijos patikimumui.

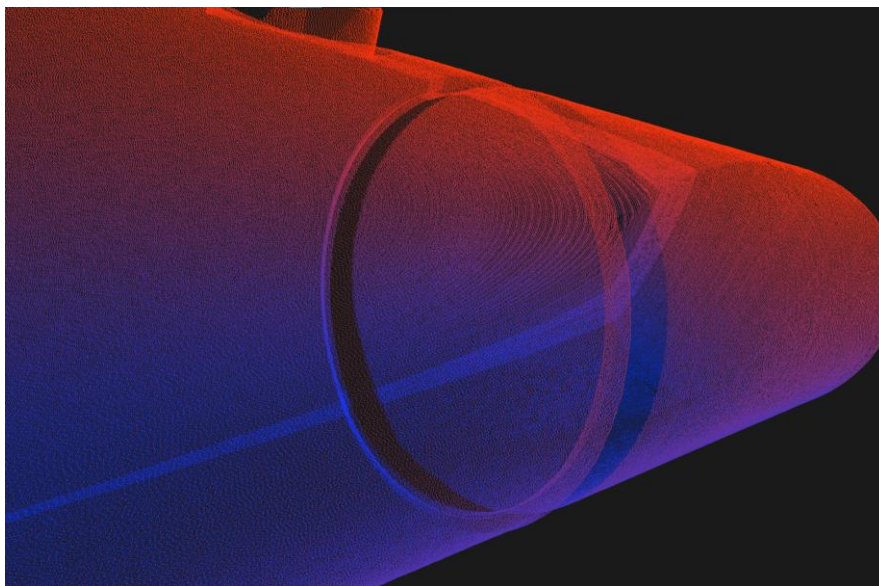
5.4.3. Segmentų analizė

Siekiant išsamiau suprasti RMS paklaidos, atstumo nuo skenavimo įrenginio ir lazerio kritimo kampo sąveiką visame rezervuaro viduje, buvo sukurta išsami visų segmentuotų duomenų 3D vizualizacija. Šiose diagramose rodomas kiekvieno segmento centras pagal apskaičiuotą atstumą, kritimo kampą ir vidutinę kvadratinę nuokrypą. Svarbu paminėti, kad ketvirtasis matmuo įtraukiamas naudojant spalvinį kodavimą, kai kiekvieno taško spalvos intensyvumas rodo atskirų skenavimo taškų, esančių tame konkrečiame 50x50 mm segmente, skaičių. Analizuojant šių daugiamatės informacijos dvimates projekcijas, galima aiškiau suprasti jutiklio veikimo charakteristikas:

Atstumo ir kritimo kampo projekcija:

Ši projekcija (**25 pav.**) atskleidžia aiškų erdvinio pasiskirstymo modelį, būdingą cilindrinio objekto skenavimui iš vidinio apžvalgos taško. Žiūrint į šią projekciją, taškai paprastai sudaro pailgą, šiek tiek ovalią formą. Tam tikrais atstumais aiškiai matomos kelios horizontalios taškų lygtys arba tankios taškų juostos. Tolimiausiu atstumu, maždaug 7-8 m, yra ryški juosta, vaizduojanti tolimąją cisternos sieną skenavimo įrenginio atžvilgiu. Kaip ir tikėtasi, šis požymis apima beveik visą galimų kritimo kampų diapazoną, nes tolimoji siena matoma visame skenavimo įrenginio horizontalaus matymo lauke. Pastebėtina, kad šie taškai daugiausia yra tamsesnių spalvų, o tai rodo mažesnį taškų skaičių viename segmente, kas atitinka didesnę atstumą dėl lazerio spindulio išsisklaidymo ir galimo signalo susilpnėjimo.

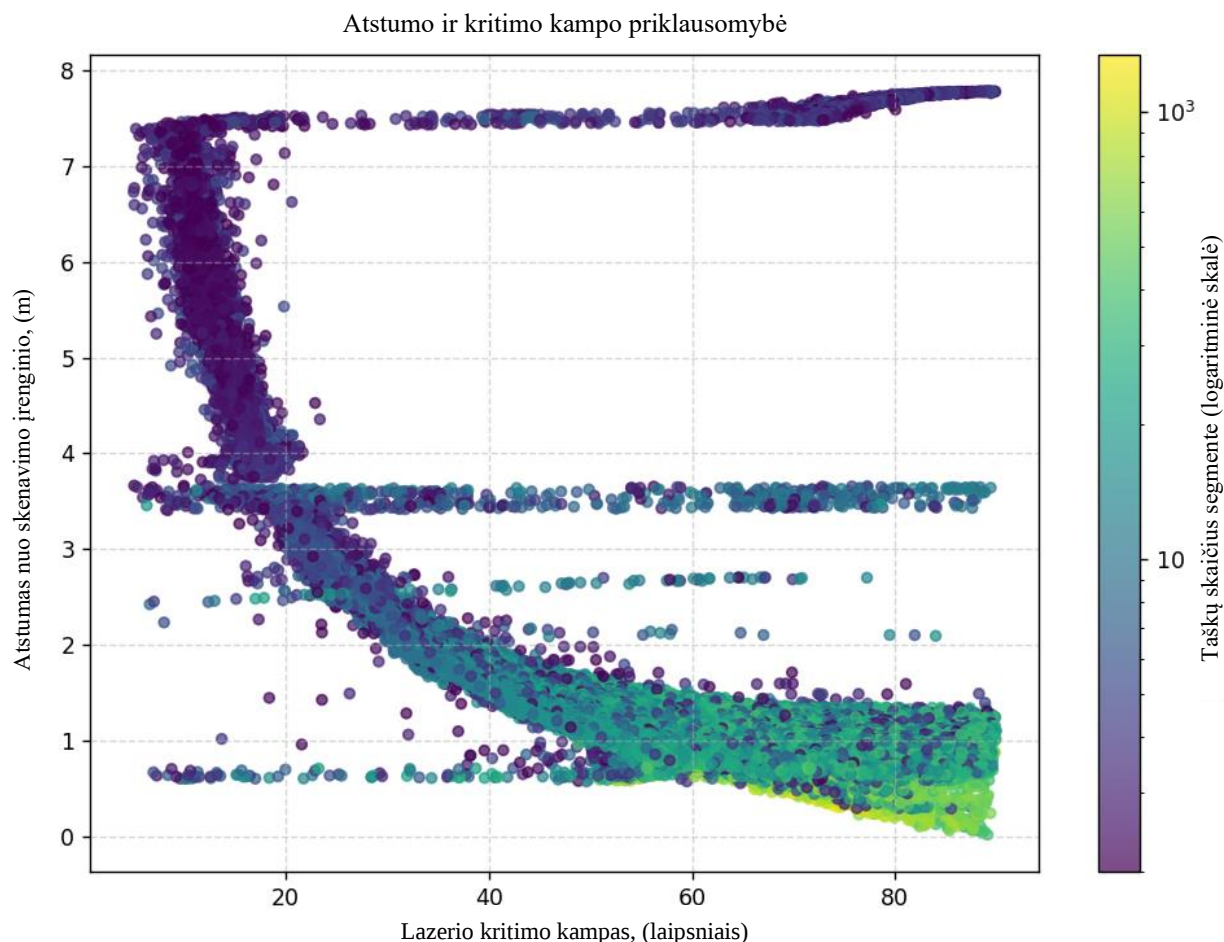
Dar viena aiški horizontali juosta atsiranda ties 3-4 metrų riba. Tai tiksliai atitinka žinomo vidinio konstrukcijos elemento vietą rezervuare (**24 pav.**), kuris, kaip ir tolimoji siena, yra paviršius, matomas įvairiais kritimo kampais.



24 pav. Vidinio konstrukcijos elemento vietą rezervuare

Trečioji tanki sritis matoma artimiausiu atstumu, atitinkanti artimąją rezervuaro sienelę, ir vėl apimanti platų kritimo kampų diapazoną ir dėl didesnio taškų skaičiaus viename segmente pasižyminti šviesesnėmis spalvomis.

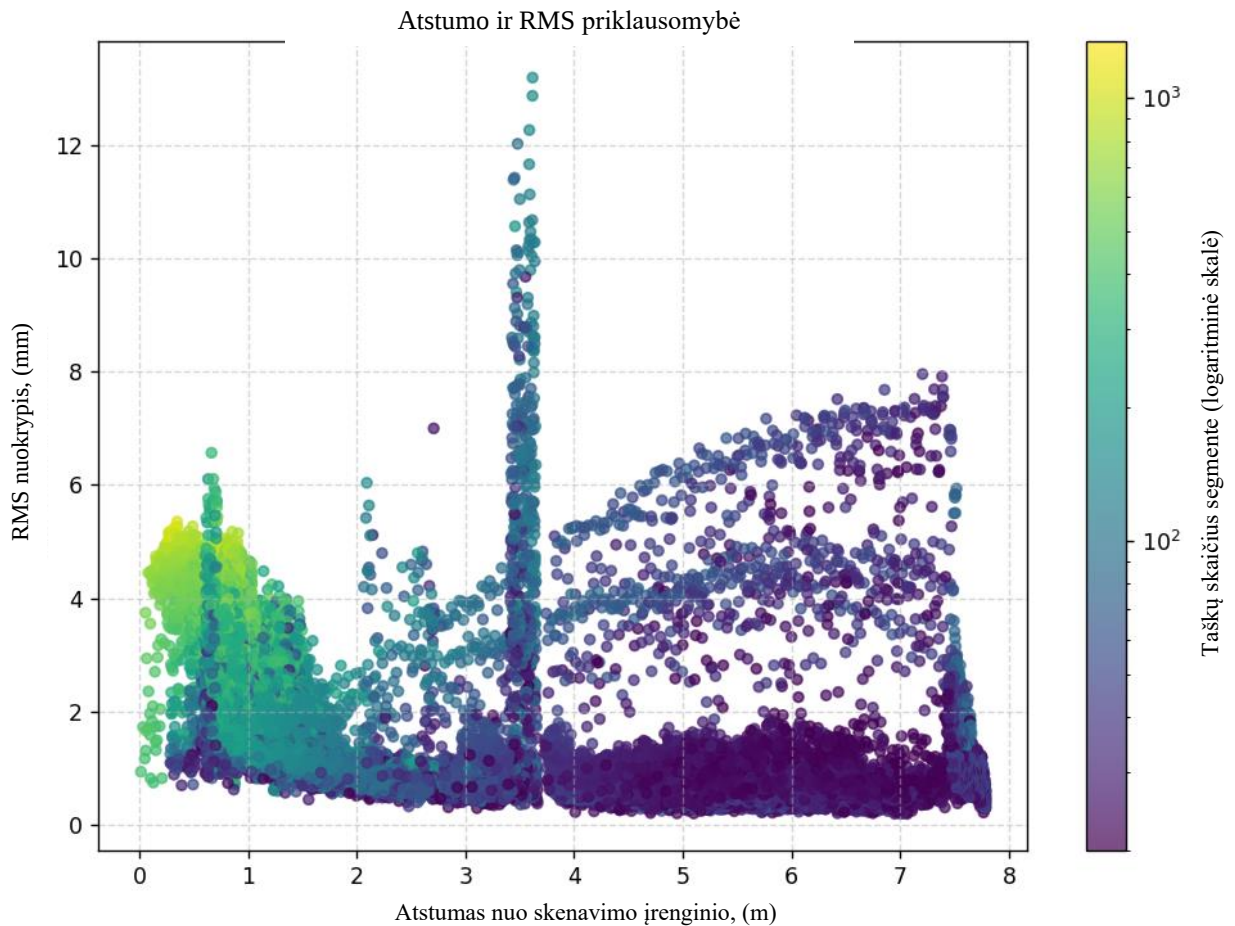
Šis brėžinys parodo santykį tarp cisternos vidaus geometrijos ir kampų, kuriais šie paviršiai buvo matuojami skenavimo įrenginio padėties atžvilgiu. Taškų skaičiaus kitimas aiškiai iliustruoja tikėtiną duomenų tankio mažėjimą didėjant atstumui.



25 pav. Atstumo ir kritimo kampo projekcija

Atstumo ir vidutinės kvadratinės vertės nuokrypio projekcija:

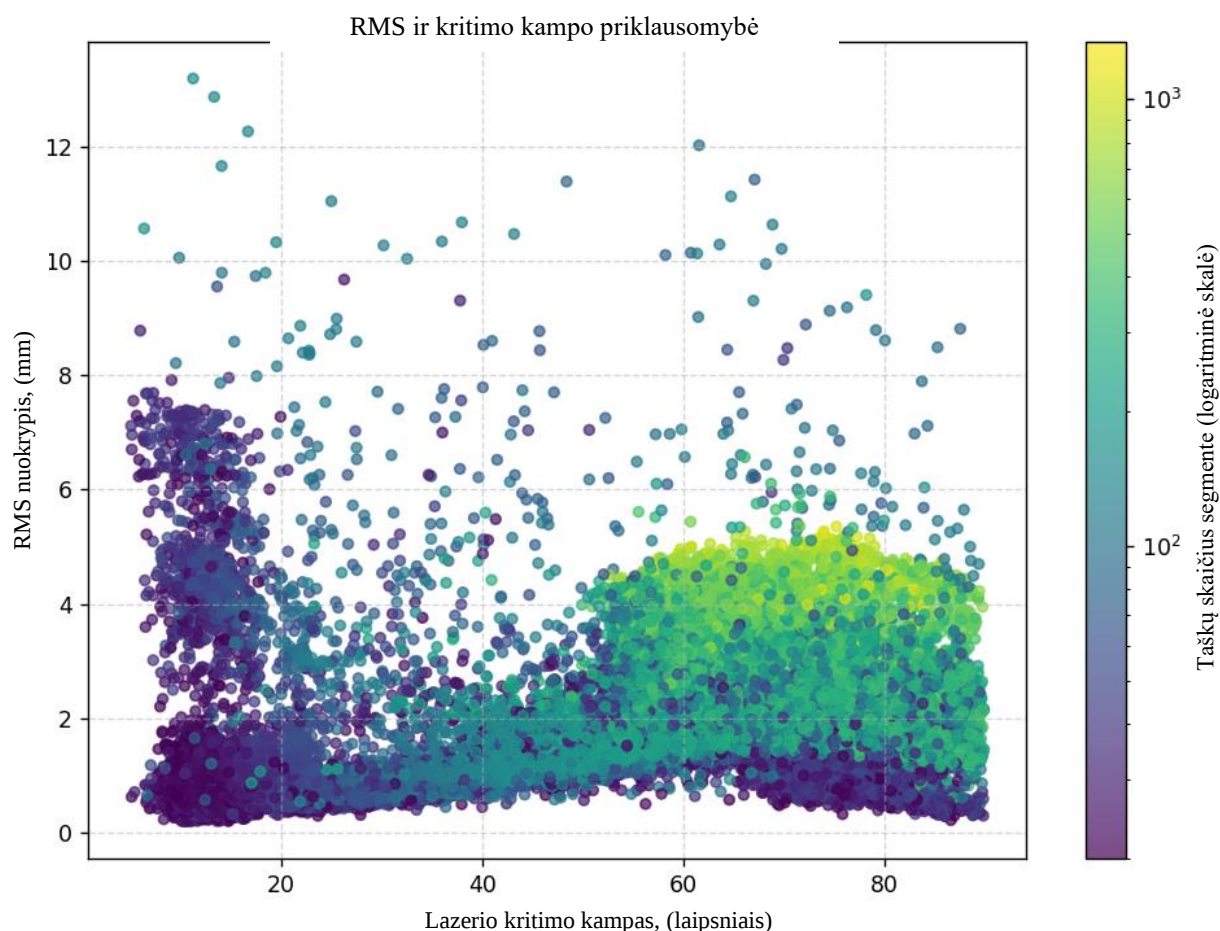
Šioje projekcijoje (**26 pav.**) pastebima bendra tendencija, kad vidutinis kvadratinis nuokrypis turi tendenciją didėti, kai atstumas iki skenavimo įrenginio didėja. Ryškiausias bruožas - didelis didesnių vidutinių kvadratinių verčių telkinys 3-4 metrų atstumu. Didėjant atstumui, didėja lazerio taško dydis, mažėja taškų tankis ir gali pablogėti signalo ir triukšmo santykis, o tai lemia didesnę taškų koordinatų neapibrėžtumą, taigi ir prastesnę plokštumos atitikimą. Ryškus vidutinės kvadratinės vertės padidėjimas 3-4 metrų atstumu glaudžiai siejasi su anksčiau nustatyta vidinio konstrukcijos elemento vieta. Tai leidžia manyti, kad šio elemento paviršiaus geometrija yra sudėtingesnė arba netaisyklingesnė nei pagrindinių rezervuaro sienelių, arba galbūt jo kraštai labai prisideda prie atitikimo paklaidų, todėl segmentų, esančių ant jo arba šalia jo, vidutinės kvadratinės vertės nuokrypiai yra nuolat didesni. Tai rodo, kad metodas gali išryškinti sudėtingos geometrijos ar galimai prastesnės kokybės matavimo sritis, remiantis vidutinėmis kvadratinėmis vertėmis.



26 pav. Atstumo ir vidutinės kvadratinės vertės nuokrypio projekcija

Vidutinės kvadratinės vertės nuokrypis nuo kritimo kampo projekcija:

Skirtingai nei kitose dviejose projekcijose, šioje projekcijoje (**27 pav.**) nėra ryškios, visa apimančios tendencijos, tiesiogiai koreliuojančios vidutinį kvadratinį nuokrypį su kritimo kampu visame duomenų rinkinyje. Tačiau matyti subtilesnis ryšys, susijęs su taškų skaičiumi. Spalvinis kodavimas atskleidžia svarbią įžvalgą: segmentai, kuriuose taškų skaičius didesnis, paprastai pasižymi mažesnėmis RMS vertėmis, nepriklausomai nuo kampo. Ir atvirkščiai, segmentai, kuriuose yra mažiau taškų (tamsesnės spalvos), pasižymi didesniu vidutinių kvadratinių verčių spektru, įskaitant kai kuriuos didesnius nuokrypius. Tai statistškai tikėtina - kai segmente yra daugiau duomenų taškų, plokštumos pritaikymas tampa patikimesnis ir mažiau jautrus atskirų taškų triukšmui. Todėl, nors pats kritimo kampas šiame duomenų rinkinyje neatrodo esąs pagrindinis vidutinės kvadratinės vertės paklaidos veiksnys, greičiausiai dėl gerų prietaisų ir išankstinio duomenų apdorojimo, segmente užfiksuotų taškų skaičius akivaizdžiai daro įtaką vietinės plokštumos atitikimo stabilumui ir kokybei.



27 pav. Vidutinės kvadratinės vertės nuokrypis nuo kritimo kampo projekcija

Apibendrinant galima teigti, kad šie įvairiapusiai vaizdai veiksmingai išskaido sudėtingus 3D ryšius ir patvirtina rezervuaro geometrijos ir atstumo įtaką duomenų tankiui ir vidutinei kvadratinei paklaidai, taip pat pabrėžia santykinį nejautrumą kritimo kampui šiame konkrečiame aukštos kokybės duomenų rinkinyje išbandytomis sąlygomis. Atlikus analizę aiškiai nustatomas geometrinis vidinių struktūrų parašas ir patvirtinami tikėtini lazerinio skenavimo fizikiniai principai.

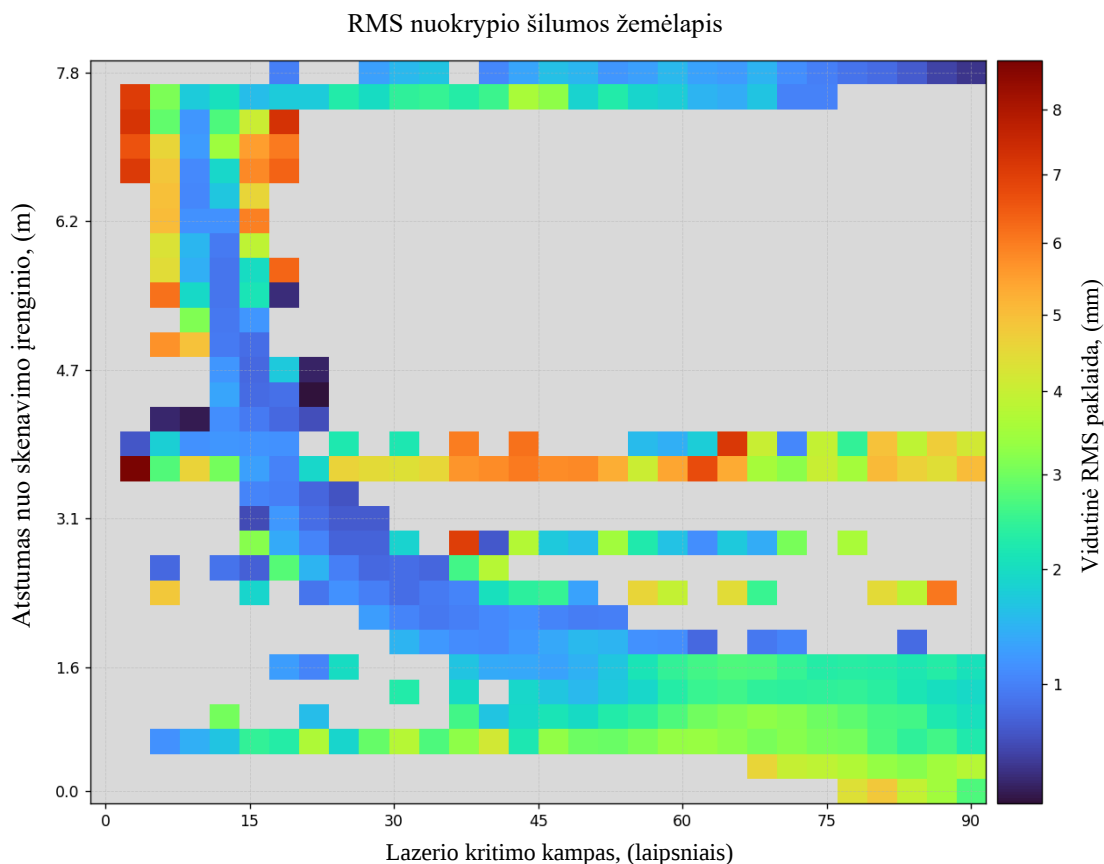
5.4.4. Segmentų šiluminis žemėlapis ir histogramos

Nors 3D paskirstymo diagramos suteikia vertingą pradinę informaciją, kiekybinį ir išsamesnį jutiklio charakteristikų supratimą galima gauti išnagrinėję 2D projekcijas ir konkrečius duomenų pasiskirstymus. Šiuo tikslu buvo sukurtas šilumos žemėlapis, vaizduojantis ryšį tarp kritimo kampo, atstumo ir matavimo kokybės, ir išsamios tipinių regionų vidutinių kvadratinių verčių histogramos

Vidutinio kvadratinio nuokrypio šilumos žemėlapio analizė

Sukurtas šilumos žemėlapis (**28 pav.**) suteikia išsamią matavimo kokybės apžvalgą visame nuskenuotame rezervuaro viduje. X ašis rodo apskaičiuotą kritimo kampą (laipsniais), Y ašis - atstumą nuo skenavimo įrenginio (metrais), o kiekvieno langelio spalvos intensyvumas atitinka visų 50x50 mm segmentų, kurių centras patenka į konkretų atstumo ir kampo intervalą, vidutinį - vidutinį kvadratinį nuokrypį (milimetrais). Bendrieji statistiniai duomenys, gauti iš 27994 analizuotų segmentų, paskaičiuota, kad vidutinis - vidutinis kvadratinis nuokrypis yra 1,60 mm, o

standartinis nuokrypis - 1,32 mm, atstumo diapazone nuo 0,02 m iki 7,78 m ir kampo diapazone nuo 5,0° iki 89,9°.



28 pav. Vidutinio kvadratinio nuokrypio šilumos žemėlapis

Pagrindiniai šilumos žemėlapio pastebėjimai:

Optimali nuskaitymo zona: yra aiškiai identifikuojama sritis, kurioje vidutinės - vidutinės kvadratinės vertės yra mažesnės, paprastai atitinkanti maždaug 15° - 60° kritimo kampus ir maždaug 1,6-4,7 m atstumus. Šioje zonoje vidutinis - vidutinis kvadratinis nuokrypis viename langelyje yra nuosekliai mažesnis, dažnai mažesnis nei 1,5 mm, o tai rodo, kad plokštumos priderinimas yra stabilesnis ir patikimesnis.

Priklausomybė nuo atstumo: bendra tendencija, atitinkanti ankstesnę 3D projekcijos analizę, rodo, kad vidutinė kvadratinė paklaida linkusi didėti esant didesniai atstumui, tai rodo šiluminio žemėlapio viršutinėje dalyje vyraujančios šiltesnės spalvos (geltona/oranžinė/raudona). Tai ypač pastebima ties 7 - 8 metrų riba, atitinkančia tolimąją rezervuaro sienelę.

Smailus kritimo kampa, <15°: mažais kritimo kampais beveik visais atstumais matoma ryški vertikali juosta, kurios vidutinė RMS vertė ženkliai didesnė už vidutinę. Tai patvirtina, kad matavimai tampa mažiau patikimi, kai lazeris į paviršių patenka labai mažu kampu.

Beveik statūs kampai, > 80°: šilumos žemėlapis rodo kintamumą šiame regione. Nors kai kuriuose didesni atstumą reprezentuojančiuose langeliuose stebimos palyginti mažos vidutinės - vidutinės kvadratinės vertės, artimesniu atstumu esančiuose šių stačių kampų langeliuose vidutinės - vidutinės kvadratinės verčių vertės yra didesnės.

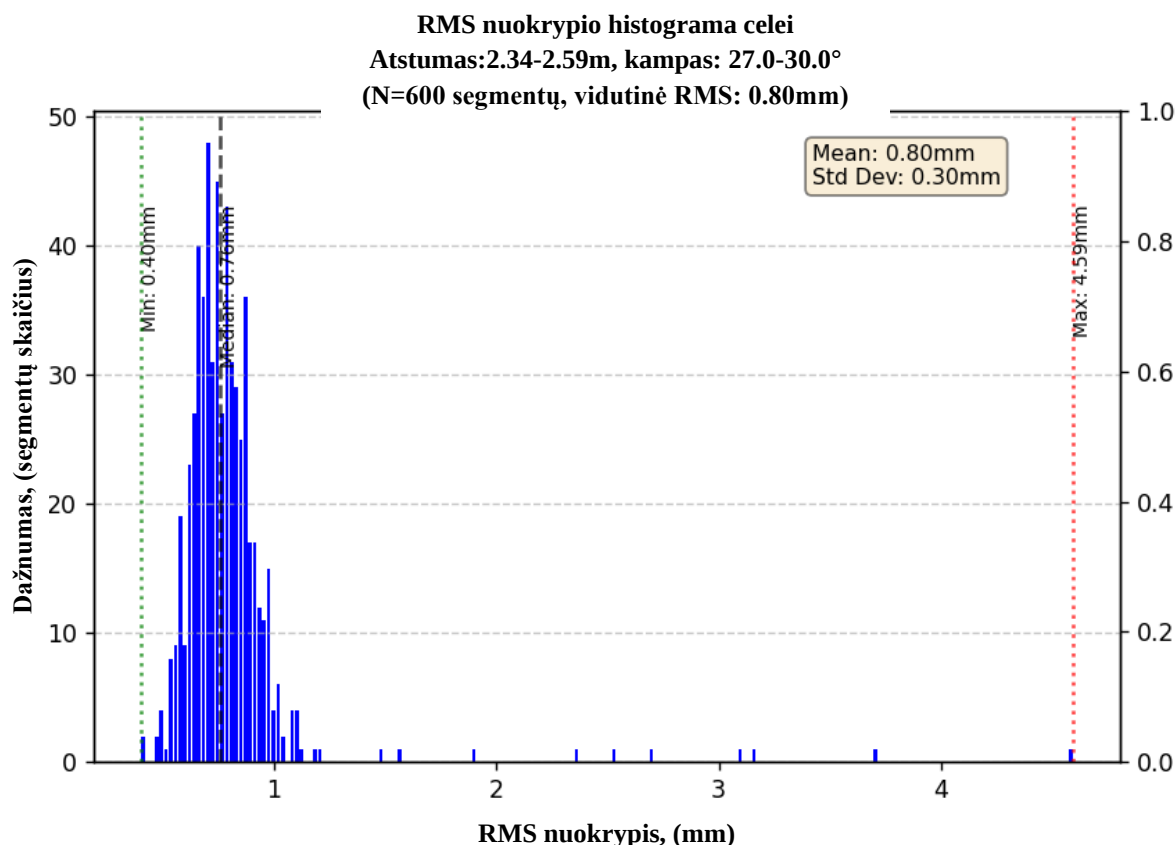
Vidinės struktūros poveikis: horizontalioje juostoje, atitinkančioje vidinės konstrukcijos elementą (maždaug 3,1-4,7 m atstumu), spalvos, palyginti su gretimais sienos segmentais, esančiais panašiu kampu, paprastai būna šiltesnės, o tai patvirtina, kad šis elementas lemia didesnę vidutinę RMS nuokrypį.

Vidutinės vertės skaičiavimo apribojimai: labai svarbu pripažinti, kad šiame šilumos žemėlapyje rodomas vidutinis - vidutinis kvadratinis nuokrypis viename langelyje. Toks vidutinės vertės apskaičiavimas gali paslėpti didelius skirtumus ląstelėje, kai dėl labai gero ir labai prasto segmento atitikimo gali susidaryti vidutinis nuokrypis.

Norint giliau išnagrinėti RMS verčių pasiskirstymą konkrečiose šilumos žemėlapyje nustatytose srityse, buvo sukurtos penkių tipinių ląstelių RMS histogramos. Šios ląstelės buvo pasirinktos siekiant parodyti našumą įvairiomis sąlygomis:

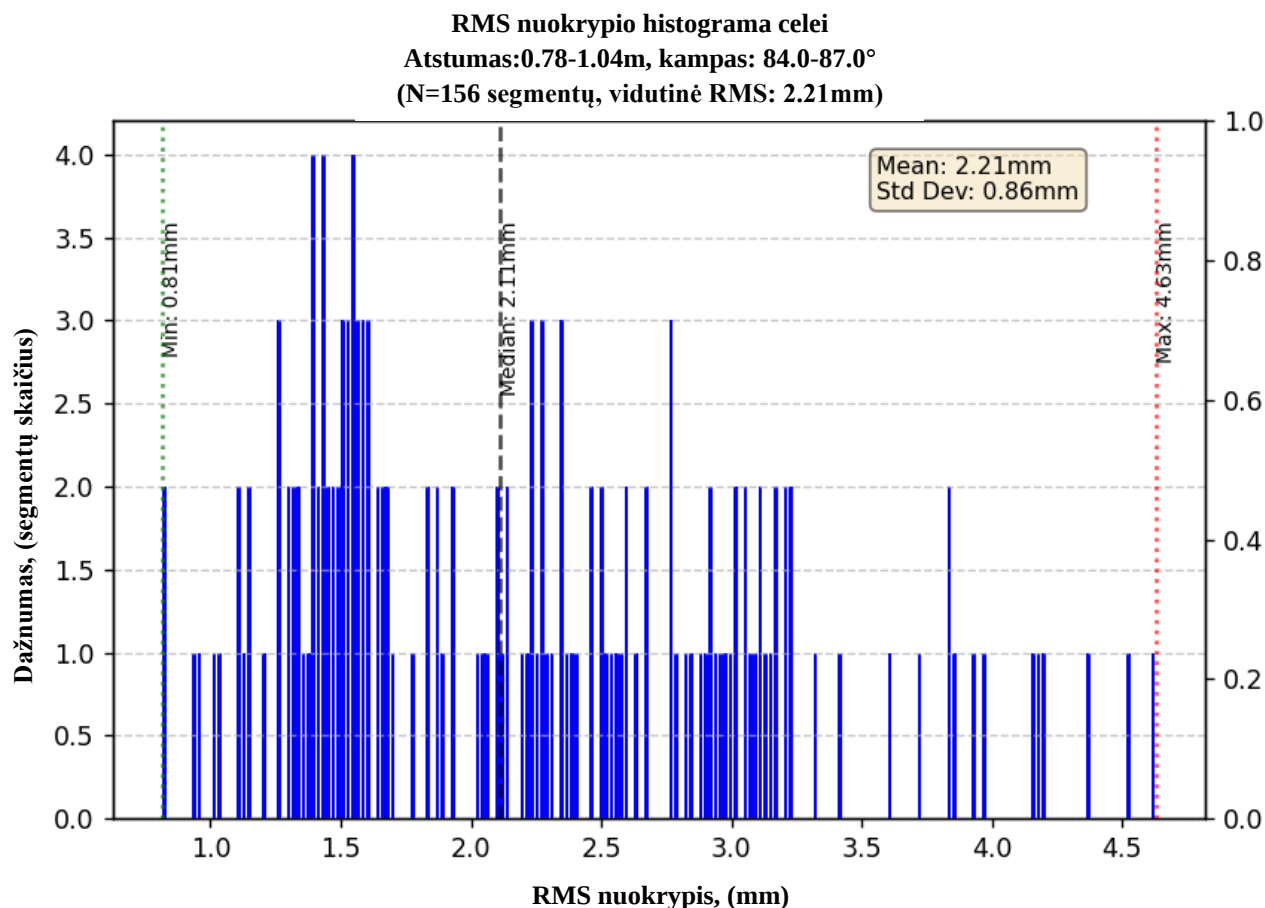
Optimali zona: (29 pav.) atstumas yra 2,34-2,59 m, kampas yra 27,0-30,0°, segmentų skaičius yra 600, vidutinė RMS vertė yra 0,80mm. Ši histograma pasižymi stipriai smailėjančiu pasiskirstymu, smarkiai pakreiptu į mažas vidutines kvadratinės vertes. Didžiosios daugumos segmentų vidutinė kvadratinė kvadratinė vertė yra mažesnė nei 1 mm. Nuokrypis (0,80 mm) ir mediana (0,76 mm) yra labai artimi ir maži, o standartinis nuokrypis yra nedidelis (0,30 mm).

Tai patvirtina šilumos žemėlapyje nurodytą optimalią zoną. Dėl didelio segmentų skaičiaus ($N = 600$) ir gerai apibrėžtos geometrijos daugumoje segmentų gaunami nuoseklūs ir labai tikslūs plokštumos atitikimai su minimaliu nuokrypiu. Didžiausia reikšmė (4,59 mm) rodo, kad net ir čia yra keletas nukrypimų, tačiau jie nedominuoja vidurkyje.



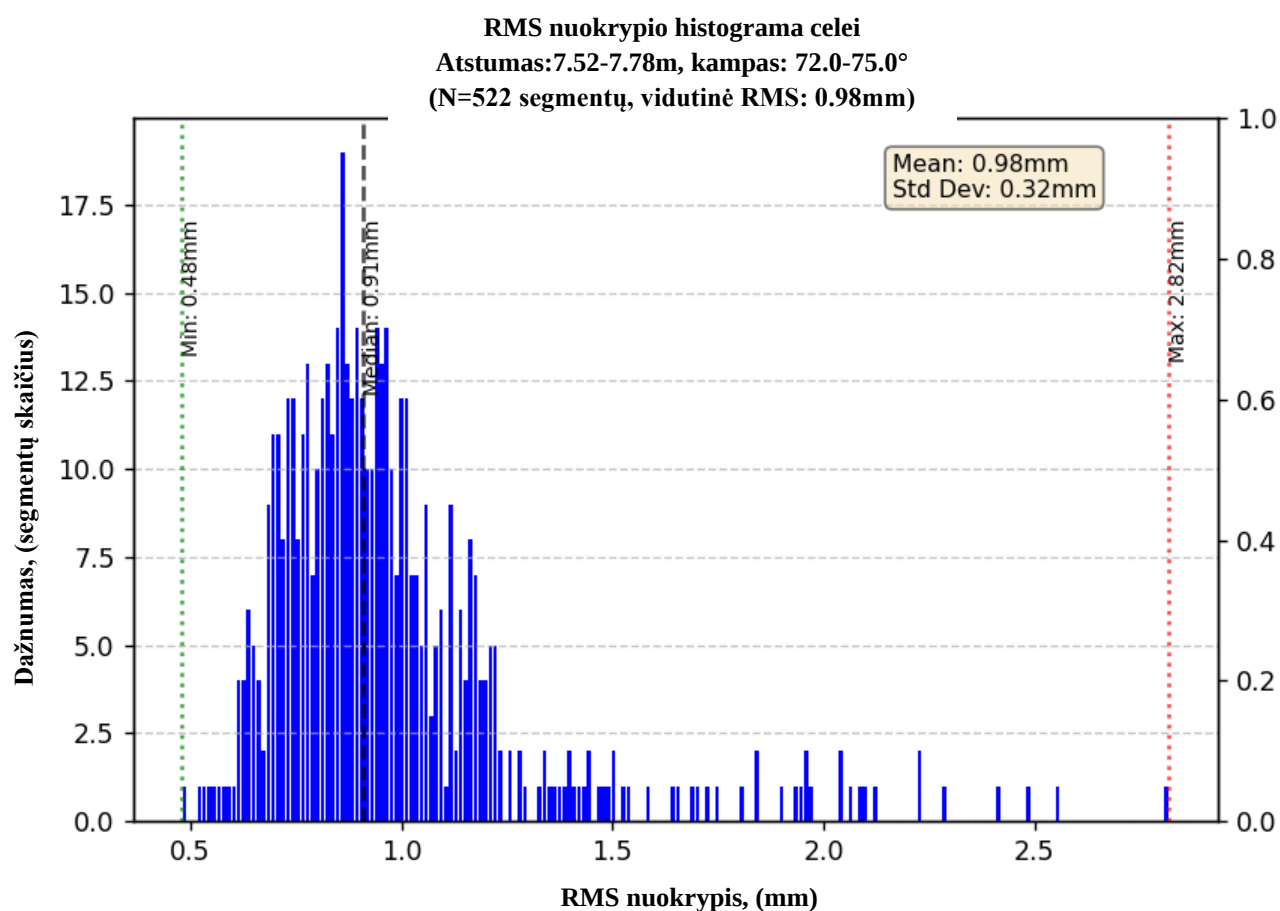
29 pav. Optimalios zonos histograma

Artimas atstumas, beveik status kampas: (30 pav.) atstumas yra 0,78-1,04 m, kampas yra 84,0-87,0°, segmentų skaičius yra 156 ir vidutinė RMS vertė lygi 2,21mm. Ši histograma rodo daug platesnį ir plokštesnį pasiskirstymą, palyginti su optimalia zona. Nėra stiprios centrinės viršūnės, o vidutinės kvadratinės vertės pasiskirsčiusios gana tolygiai nuo maždaug 1mm iki 4mm. Vidutinis nuokrypis (2,21 mm) ir mediana (2,11 mm) yra gerokai didesni, kaip ir standartinis nuokrypis (0,86 mm). Tai rodo didesnę paklaidą ir kintamumą, susijusį su beveik normaliu kritimo kampu labai artimu atstumu, atitinkantį šiltesnes spalvas, matomas šilumos žemėlapyje šiame regione.



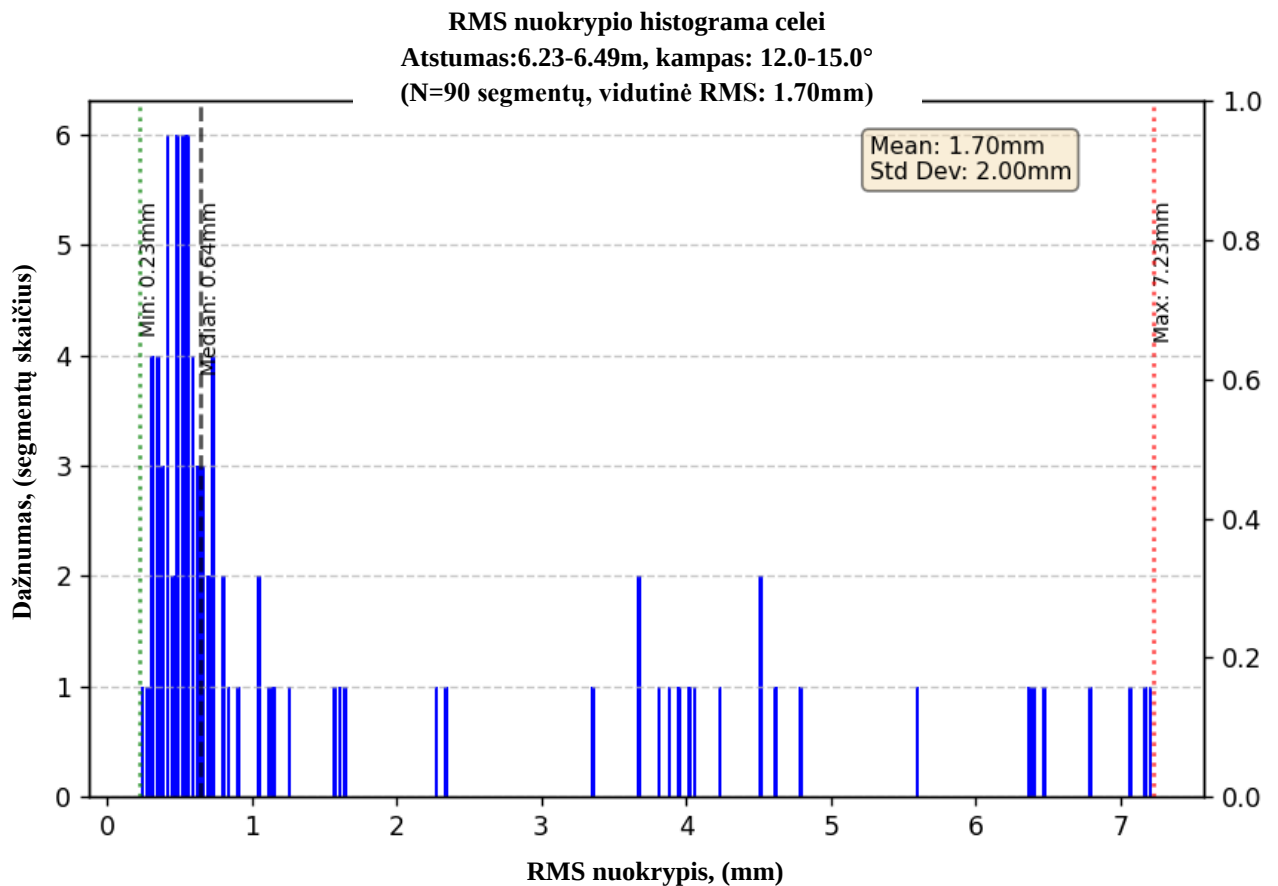
30 pav. Artimo atstumo ir beveik status kritimo kampo histograma

Tolimas atstumas, geras kampas: (31 pav.) atstumas yra 7,52 - 7,78 m, kampas yra 72,0 - 75,0°, segmentų skaičius yra 522, o vidutinė RMS vertė yra 0,98 mm. Nepaisant didelio atstumo, šioje histogramoje matomas gana aiškiai išreikštas maksimumas ties 0,9mm. Vidutinis nuokrypis (0,98mm) ir mediana (0,91mm) yra maži, o standartinis nuokrypis (0,32 mm) rodo palyginti nedidelį kintamumą. Didžiausias vidutinis kvadratinis nuokrypis (2,82 mm) yra ganėtinai izoliuotas. Tai rodo, kad gerą matavimo kokybę galima pasiekti net ir esant dideliems atstumams, jeigu kritimo kampas yra palankus ir kiekviename segmente užfiksuotas pakankamas kiekis taškų. Tai išryškina bendrą tendenciją, matomą šilumos žemėlapyje, pabrėžiant, kad vien atstumas nėra vienintelis vidutinės kvadratinės paklaidos veiksnys.



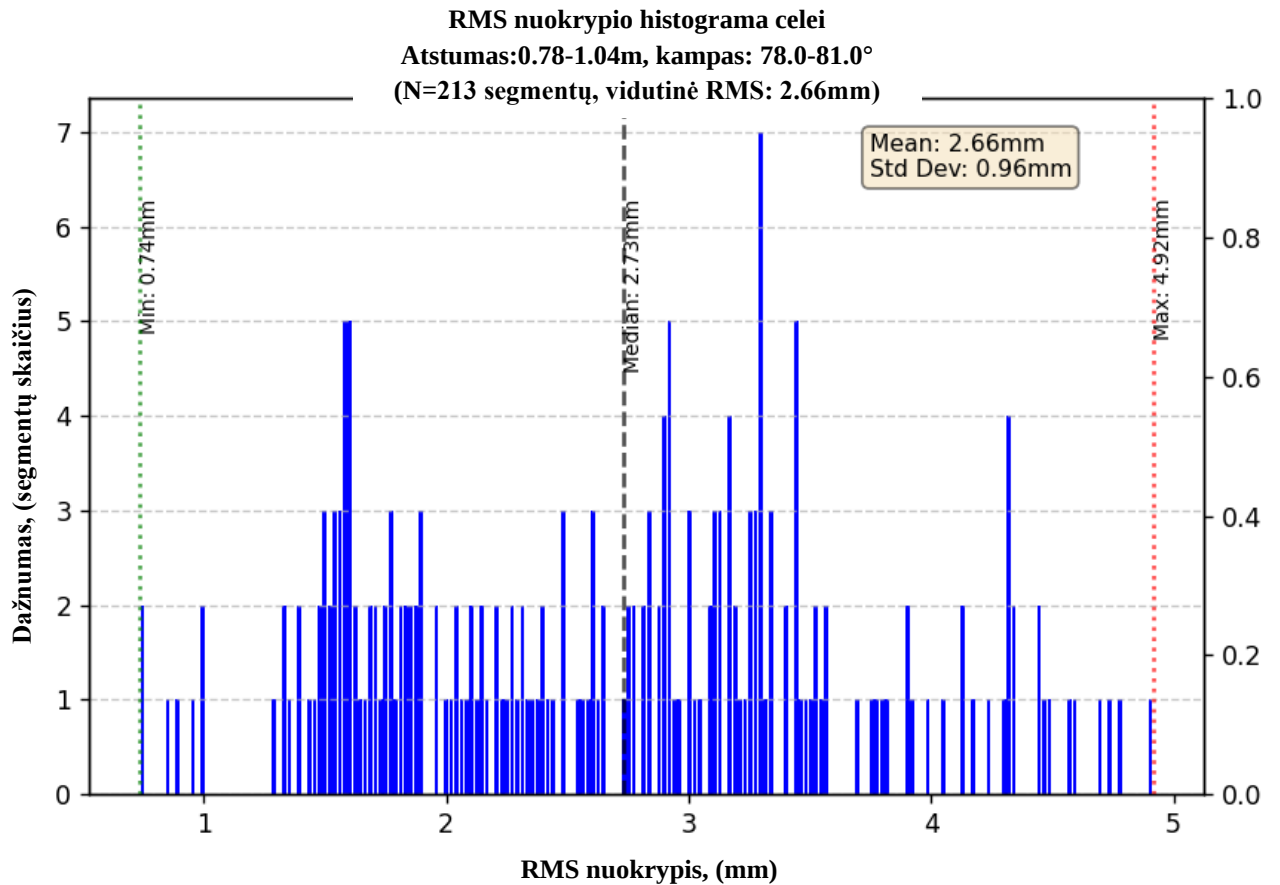
31 pav. Tolimo atstumo ir patogaus kritimo kampo histograma

Tolimas atstumas, smailus kritimo kampas: (32 pav.) atstumas yra 6,23 - 6,49m, kritimo kampas yra 12,0 - 15,0°, segmentų skaičius yra 90, o vidutinė RMS vertė yra 1,70mm. Ši histograma yra labai netanki, nes turi mažą segmentų skaičių (N = 90). Nors mediana (0,64 mm) yra maža, o tai rodo, kad kai kurie segmentai gerai tinka, pasiskirstymas turi labai ilgą „uodegą“ su dideliais nuokrypiais, kurių didžiausia vidutinė kvadratinė vertė siekia 7,23 mm. Vidutinę reikšmę (1,70 mm) šios išskirtys padidina, o standartinis nuokrypis (2,00 mm) yra labai didelis. Tai aiškiai apibrėžia sudėtingą skenavimo regioną. Dėl didelio atstumo ir smailaus kampo derinio viename segmente yra labai nedaug taškų, todėl plokštumos atitikimas yra labai nestabilus ir jautrus triukšmui, o tai lemia labai įvairias ir galimai labai dideles tūrio kalibravimo paklaidas.



32 pav. Tolimo atstumo ir smailaus kritimo kampo histograma

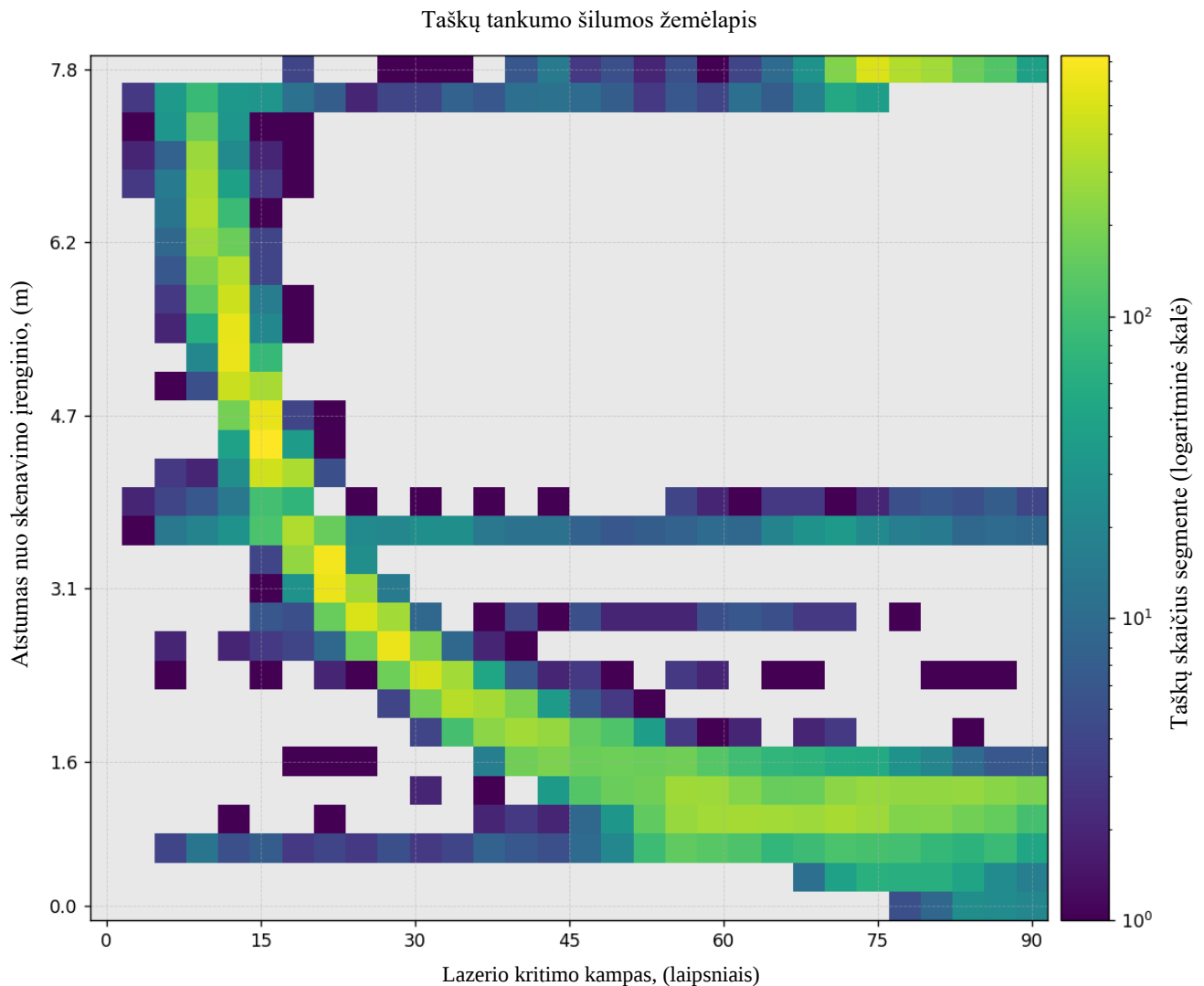
Artimas atstumas, smailus kritimo kampas: (33 pav.) atstumas yra 0,78-1,04 m, kritimo kampas yra 78,0-81,0°, segmentų skaičius yra 213, vidutinė RMS vertė yra 2,66mm. Panašiai kaip ir artimo atstumo ir beveik stataus kritimo kampo histogramoje, šioje histogramoje matomas platus pasiskirstymas be aiškios viršūnės, maždaug nuo 1mm iki 4,5mm. Vidutinis nuokrypis (2,66 mm), mediana (2,73 mm) ir standartinis nuokrypis (0,96 mm) yra gana dideli. Tai dar labiau sustiprina šio tyrimo pastebėjimą, kad dėl 90° kritimo kampų, ypač esančių artimu atstumu, vidutinės kvadratinės vertės paklaidos būna didesnės ir labiau kintančios, palyginti su optimaliais vidutinio nuotolio kampais.



33 pav. Artimo atstumo ir smailaus kritimo kampo histograma

Sujungus šilumos žemėlapio ir histogramos analizę, galima gauti veiksmingą daugialypės skiriamosios gebos skenavimo įrenginio savybių įvertinimą. Šilumos žemėlapyje nustatomos plačios tendencijos ir optimalios/probleminės zonos pagal vidutinį elgesį, o histogramos atskleidžia pagrindinį pasiskirstymą ir kintamumą konkrečiuose regionuose. Tai patvirtina, kad egzistuoja optimali nuskaitymo geometrija, vidutiniai atstumai ir kampai apie 15-55°, ir išryškina iššūkius, kylančius dėl arti esančių smailių kritimo kampų, tolimų atstumų, ypač esant mažam taškų skaičiui, beveik stačių kampų esančių artimu atstumu ir sudėtingų vidinių struktūrų. Svarbiausia, kad analizė pabrėžia pakankamo taškų tankio kiekviename segmente svarbą siekiant stabilų ir mažų vidutinių kvadratinų nuokrypių.

Papildomai prie vidutinio kvadratinio nuokrypio šilumos žemėlapiu buvo sudarytas taškų skaičiaus šilumos žemėlapis, tam kad būtų galima vizualizuoti užfiksuotų duomenų taškų tankį skirtingose skenavimo regionuose. Šiame šilumos žemėlapyje (**34 pav.**) naudojama ta pati atstumo ir kampo langelių struktūra kaip ir anksčiau, tačiau dabar kiekvienos ląstelės spalvos intensyvumas rodo atskirų taškų, esančių visuose 50x50 mm segmentuose, kurių centras patenka į tą ląstelę, skaičių. Spalvų juosta rodo šį taškų skaičių, naudojant logaritminę skalę, kuri veiksmingai išryškina skirtumus net tada, kai taškų skaičius skiriasi keliomis eilėmis. Labai svarbu suprasti taškų tankio pasiskirstymą, nes nuo jo tiesiogiai priklauso vietinių geometrinių analizių, tokių kaip plokštumos priderinimas ir vidutinės kvadratinės paklaidos skaičiavimas, stabilumas ir patikimumas.



34 pav. Taškų tankumo pasiskirstymo šilumos žemėlapis

Akivaizdžiausia tendencija - stipri taškų skaičiaus priklausomybė nuo atstumo iki skenavimo įrenginio. Kaip ir tikėtasi, arčiausiai skenavimo įrenginio ($\sim 0-1,6$ m) esantys segmentai gauna didžiausią lazerinių taškų koncentraciją ploto vienetui. Priešingai, tolimiausią sieną žyminčioje juostoje ($\sim 7-8$ m) taškų tankis yra gerokai mažesnis, tai rodo vyraujančios tamsiai mėlynos ir violetinės spalvos. Tai atitinka fizikinį lazerio spindulio sklaidos principą, kai dėl fiksuoto skenavimo įrenginio kampinio žingsnio taškai didesniu atstumu pasiskirsto didesniame plote.

Apibendrinant, taškų skaičiaus šilumos žemėlapis veiksmingai vizualizuoja erdvinį duomenų tankio pasiskirstymą nuskaitytoje talpoje. Jis patvirtina, kad atstumas nuo skenavimo įrenginio yra pagrindinis veiksnys, lemiantis viename segmente užfiksuotų taškų skaičių, o esant didesniai atstumui tankis gerokai sumažėja. Nors kritimo kampas vaidina ne tokį svarbų vaidmenį nustatant taškų skaičių, palyginti su jo galimu poveikiu vidutinei kvadratinei paklaidai, šilumos žemėlapis aiškiai parodo, kad pakankamas taškų tankis yra būtina patikimos vietinės geometrinės analizės sąlyga. Pastebėti dėsningumai stipriai koreliuoja su fiziniu rezervuaro išdėstymu ir suteikia svarbų kontekstą aiškinant vidutinės kvadratinės nuokrypos rezultatus, pabrėždami, kad srityse, kuriose yra nedaug duomenų, iš prigimties yra didesnė matavimo neapibrėžtis.

5.4.5. Vertikalių pjūvių analizė

Papildant horizontalaus skerspjūvio ir bendrą 3D paviršiaus analizę, buvo atlikta vertikalaus pjūvio analizė, kurios tikslas – ištirti, kaip talpos geometrija kinta išilgai jos pagrindinės ašies. Ši perspektyva yra itin svarbi vertinant tokias savybes kaip galinių dangčių forma, vidinių atramų ar pertvarų padėtis, prieigos liukų sritis ir galimas bendras rezervuaro pasvirimas. Šie aspektai gali būti nevysiškai akivaizdūs arba sunkiau tiksliai įvertinami remiantis tik horizontalaus skerspjūvio duomenimis. Norint atlikti išsamų kalibravimą ir vientisumo vertinimą, labai svarbu turėti išsamų talpos profilį išilgine kryptimi.

Analizė buvo atlikta konceptualiai skaidant 3D taškų debesies duomenis į plonus, statmenai pagrindinei talpyklos ašiai esančius pjūvius. Pirmiausia, nustatyta taškų debesies pagrindinė ašis – kryptis, išilgai kurios talpykla yra ilgiausia. Tada, išilgai šios pagrindinės ašies taškų debesis buvo supjaustytas į plonas cilindrinės atkarpos, kurių storis nustatytas 50 mm. Šis storis pasirinktas kaip kompromisas, užtikrinantis pakankamą taškų kiekį kiekviename pjūvyje, bet kartu leidžiantis fiksuoti lokalius geometrijos pokyčius.

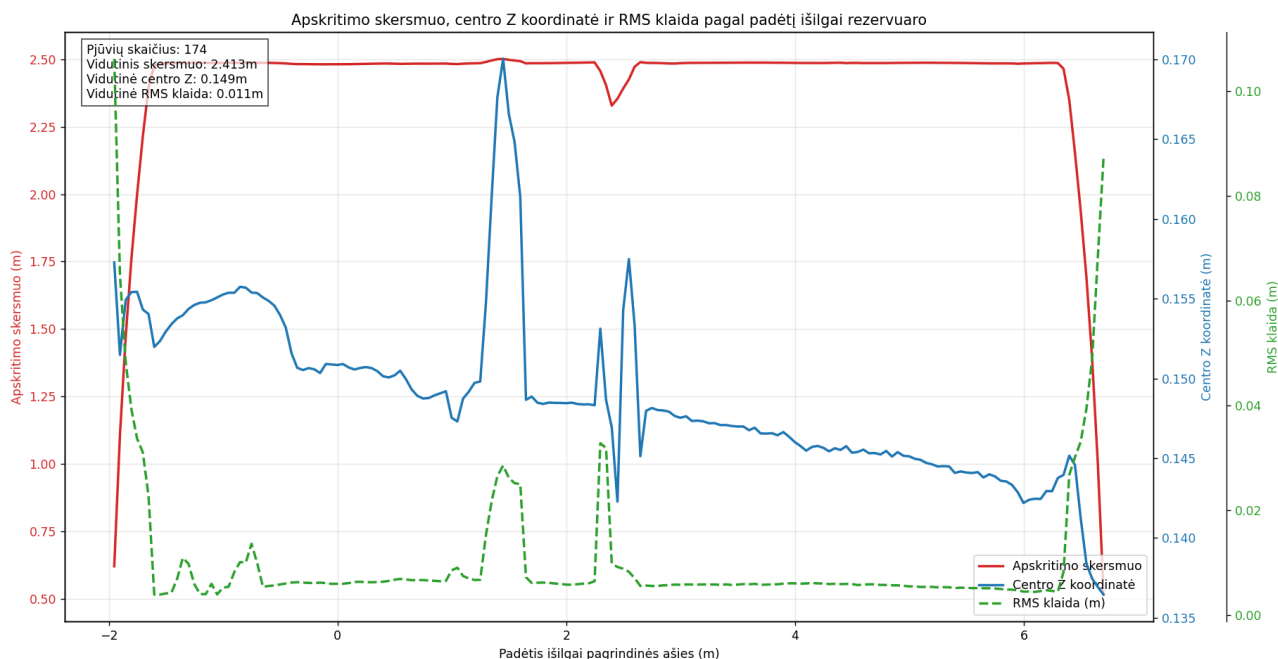
Kiekvienam gautam pjūviui, t. y., 50 mm storio taškų poaibiui, toliau buvo atliekama analizė, kiekviename pjūvyje, naudojant mažiausių kvadratų metodą buvo pritaikytas optimaliausias apskritimas, geriausiai tinkantis šiame pjūvyje esantiems taškams. Pagal kiekvieną šitaip pritaikytą apskritimą buvo apskaičiuoti trys pagrindiniai parametrai:

Apskritimo skersmuo: apskaičiuotas pritaikyto apskritimo spindulys, dvigubinant jį gaunamas lokalaus pjūvio skersmuo. Šis parametras atspindi talpyklos diametrą konkrečioje vietoje išilgai ašies.

Centro Z koordinatė: apskaičiuoto pritaikyto apskritimo centro Z koordinatė (atspindi aukštį). Šis parametras rodo lokalaus talpyklos centro poslinkį nuo idealios išilginės ašies, kas gali indikuoti apie pasvirimą ar kitas deformacijas.

Vidutinė kvadratinė apskritimo atitikimo paklaida (RMS): apskaičiuota, kaip gerai pjūvio taškai atitinka pritaikytą apskritimą. Šis rodiklis rodo lokalią taškų sklaidą, triukšmo lygį ar deformacijas konkrečiame pjūvyje.

Šie trys parametrai – skersmuo, centro Z koordinatė ir RMS paklaida – buvo nubraižyti pagal pjūvio padėtį išilgai pirminės ašies (**35 pav.**), siekiant vizualizuoti ir analizuoti jų pokyčius per visą talpyklos ilgį. Svarbu paminėti, kad šie trys parametrai nubraižyti pagal skirtingus Y ašies mastelius, kad būtų galima geriau matyti atitinkamus jų pokyčius. Statistika, pagrįsta 174 analizuotais pjūviais, rodo, kad vidutinis skersmuo yra 2,413 m, vidutinė centro Z koordinatė - 0,149 m, o vidutinė kvadratinė paklaida – 11 mm.



35 pav. Vertikalaus pjūvio pritaikytų apskritimų centro, skersmens ir RMS paklaidos grafikas

Raudona linija grafike (**35 pav.**) pažymėtas skersmuo išlieka gana pastovus - maždaug 2,41 m visoje centrinėje talpos dalyje, o tai aiškiai atitinka cilindro formos kūną. Abiejuose galuose pastebimas žymus skersmens sumažėjimas, aiškiai rodantis perėjimą prie išlenktų arba išgaubtų cisternos galinių dangčių. Be to, ties maždaug 2,5 m padėtimi išilgai pirminės ašies pastebimas ryškus, staigus skersmens kritimas, kuris tiksliai atspindi anksčiau minėtą vidinę atraminę konstrukciją (kaip pavaizduotą **24 pav.**), kuri fiziškai susiaurina vidinę erdvę ir taip daro įtaką vietiniam pritaikytam skersmeniui.

Mėlyna linija (**35 pav.**) pažymėta centro Z ašies koordinatės ryškiausias požymis - didelis, staigus Z koordinatės šuolis aukštyn, pasiekęs maksimumą ties 1,5m padėtimi, kai vertė akimirksniu viršija 0,17 m, palyginti su bazine verte apie 0,15 m. Šis reiškinys tiesiogiai atitinka rezervuaro dangčio arba įėjimo liuko vietą (kaip pavaizduota **19 pav.**). Kadangi šis elementas fiziškai yra aukščiau už pagrindinį cisternos cilindrą ir nėra tobulo apskritimo formos, bandymas pritaikyti apskritimą taškams, įskaitant dangčio konstrukciją, dirbtinai "išpučia" apskaičiuotą vertikalią centro padėtį pjūviams šioje srityje. Be to, pastebima nežymi, bet nuosekli bendra Z koordinatės mažėjimo tendencija nuo kairiojo galo iki dešiniojo galo. Tai rodo nedidelį viso rezervuaro pasvirimą išilgai pagrindinės ašies nustatytos koordinačių sistemos atžvilgiu. Net ir nedidelis pasvirimas gali būti labai svarbus tiksliam tūrio kalibravimui, ypač matuojant lygio matuoklio rodmenis, kurie priklauso nuo vertikalaus talpos lygio.

Žalia punktyrine linija (**35 pav.**) pažymėta vidutinė kvadratinė paklaida yra sąlyginai maža išilgai centrinės cilindrinės dalies. Tačiau abiejuose talpos galuose pastebimas staigus padidėjimas, sutampantis su skersmens mažėjimu. Labai didelis vidutinės kvadratinės paklaidos šuolis, viršijantis 30mm, atsiranda būtent 1,5 m padėtyje, puikiai sutampantis su centro Z koordinatės šuoliu. Mažesnė, bet ryški vidutinės kvadratinės vertės viršūnė taip pat matoma ties 2,5 m padėtimi, kuri sutampa su skersmens diagramos kritimu. Mažos RMS vertės išilgai pagrindinio cilindro rodo, kad apskritimo priderinimo modelis yra tinkamas ir tiksliai atspindi šių atkarpų geometriją. Reikšmingas vidutinės kvadratinės vertės padidėjimas galuose patvirtina, kad paprastas

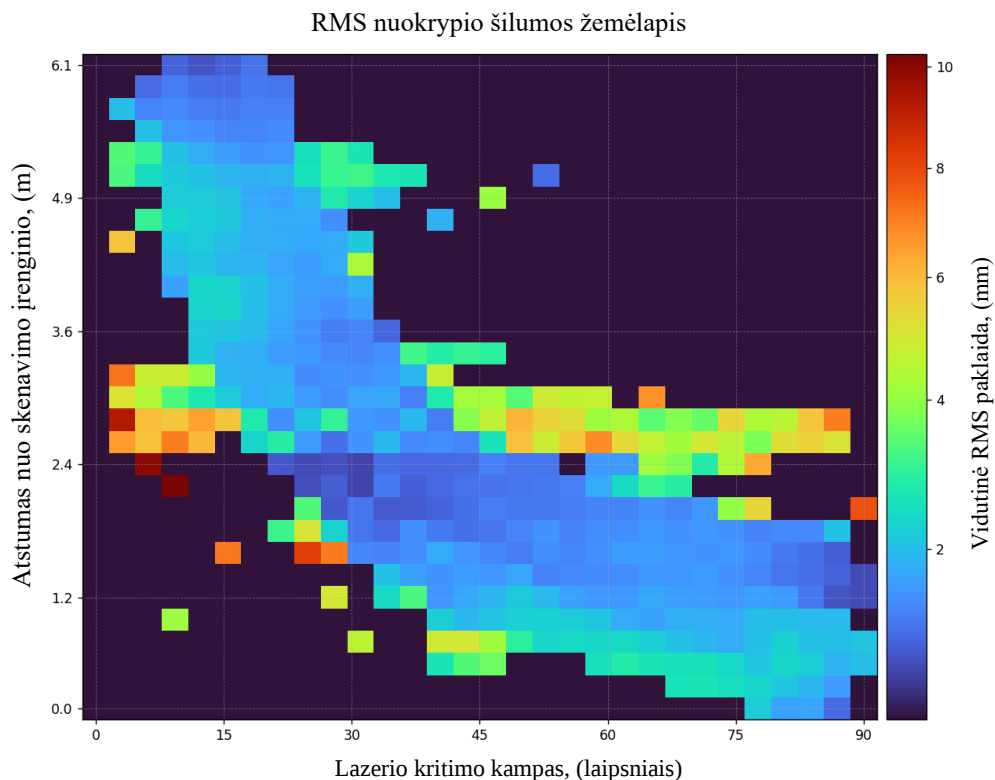
apskritiminis priderinimas tampa mažiau tikslus, kai geometrija pereina į išlenktas galines sienas. Itin didelis vidutinės kvadratinės vertės šuolis dangčio vietoje rodo, kad bandant taikyti apskritimo modelį šiam necilindriniam, iškilesniam elementui prasta atitikimo kokybė. Taigi vidutinė kvadratinė paklaida veiksmingai veikia kaip kokybės rodiklis, žymintis atkarpas, kuriose rezervuaras smarkiai nukrypsta nuo tobulo cilindro arba kuriose yra tokių požymių kaip liukai.

Ši išilginio pjūvio ir apskritimo parinkimo analizė suteikia vertingos papildomos informacijos, papildančios skerspjūvio tyrimus. Ji sėkmingai sudaro viso išilginio profilio vaizdą, aiškiai identifikuoja pagrindinį cilindrinį korpusą, galines sienas ir tikslią vidinių elementų, tokių kaip atraminė konstrukcija ir prieigos dangtis, vietą. Svarbiausia, kad galima nustatyti ir kiekybiškai įvertinti bendrą rezervuaro pasvirimą išilgai pagrindinės ašies - parametą, kuris yra labai svarbus koreguojant lygio matavimus ir užtikrinant tikslų tūrio kalibravimą.

5.4.6. Skirtingų talpų analizės rezultatų palyginimas

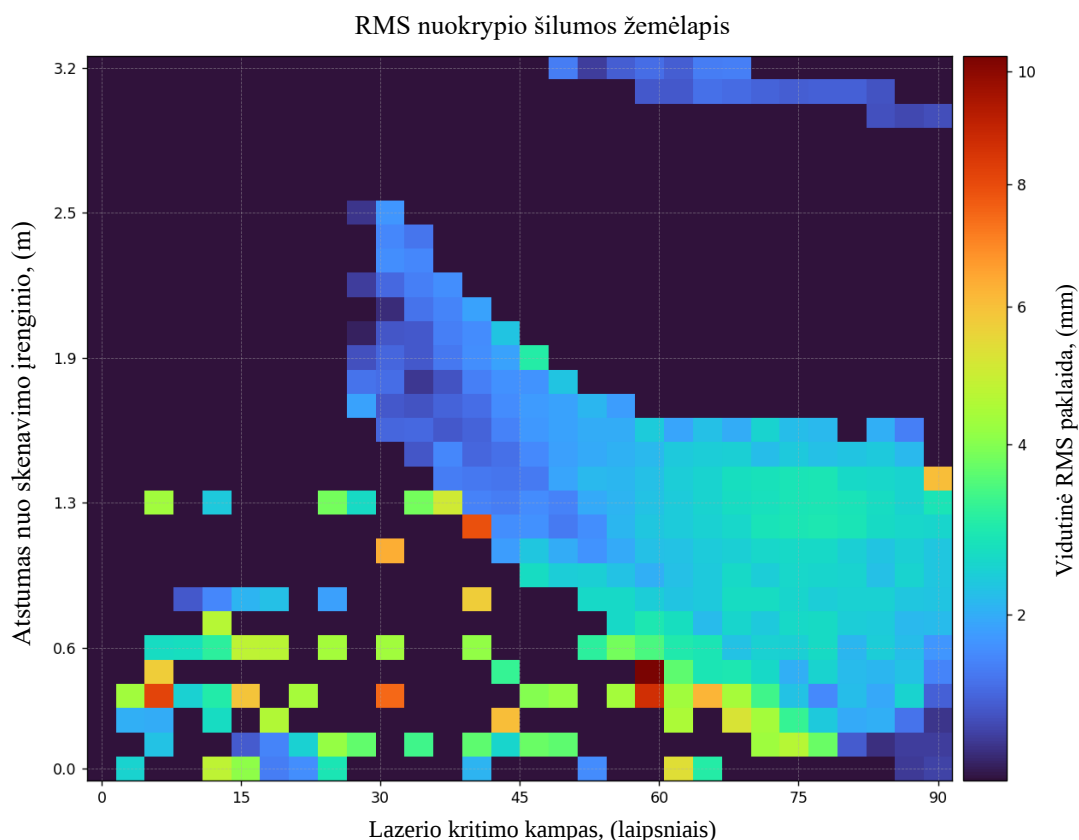
Siekiant dar kartą patvirtinti pastebėtas analizės charakteristikas ir įvertinti jų universalumą, identiška 3D paviršiaus segmentavimo ir analizės procedūra buvo pritaikyta dar dviem neapdorotų taškų debesų duomenų rinkiniams. Šie duomenų rinkiniai buvo gauti iš skirtingų talpų, kurių ilgis, palyginti su anksčiau analizuotu pagrindiniu rezervuaru, gerokai skiriasi: vienas jų buvo pastebimai ilgesnis, o kitas - gerokai trumpesnis.

Ilgesnės (12 m) talpos šilumos žemėlapis (**36 pav.**) iš esmės atspindi pirminės analizės metu pastebėtus dėsningumus. Optimali nuskaitymo zona su mažesnėmis vidutinėmis - vidutinėmis kvadratinėmis reikšmėmis matoma vidutiniu atstumu ir kritimo kampu (maždaug 15-60°). Be to, panašiai kaip ir pirminėje talpykloje, ties vidutiniu atstumu matoma aiški didesnio vidutinio - vidutinio kvadratinio vidurkio juosta, atitinkanti šiame ilgesniame rezervuare esantį vidinį konstrukcinį elementą, išryškinantį jo poveikį vietos matavimo kokybei.



36 pav. Ilgesnės talpos vidutinio kvadratinio nuokrypio šilumos žemėlapis

Trumpesnės (4 m) talpos šilumos žemėlapyje (37 pav.) taip pat matomos anksčiau aprašytos savybės, pavyzdžiui, padidėjusi vidutinė kvadratinė - kvadratinė vertė esant didesniems kritimo kampams. Tačiau jis taip pat pasižymi kai kuriomis unikaliomis savybėmis. Išsibarsčiusios ląstelės su padidėjusiomis vidutinėmis kvadratinėmis vertėmis atrodo šiek tiek atsitiktinai pasiskirsčiusios, o tai gali reikšti, kad šiame konkrečiame neapdorotame duomenų rinkinyje yra triukšmo artefaktų, kurie nebuvo iki galo pašalinti vidutiniškai apskaičiuojant šilumos žemėlapio ląstelėse. Pažymėtina, kad dėl trumpesnio ilgio ir skersmens santykio šios talpos geometrija, palyginti su ilgesnėmis talpomis, iš esmės suteikia mažiau galimybių lazeriui pataikyti į paviršių itin smaliais kampais. Ši geometrija yra palankesnę surinktų duomenų atžvilgiu.



37 pav. Trumpesnės talpos vidutinio kvadratinio nuokrypio šilumos žemėlapis

Nepaisant rezervuarų matmenų skirtumų ir specifinių savybių, tokių kaip vidinės konstrukcijos arba ovalesnė forma, pagrindinės rezultatų efektyvumo tendencijos išlieka vienodos visuose trijuose pirminiuose duomenų rinkiniuose. Optimalios zonos, apibrėžtos atstumu ir vidutiniu kritimo kampais, egzistavimas, kartu su prastėjančia vidutine – vidutine kvadratine verte esant smallesniems ar beveik statiesiems kampams, yra būdingas skenavimo procesui naudojant šio tipo prietaisus. Šis kryžminis geometrijos patvirtinimas sustiprina išvadas dėl lemiamos atstumo, kampo ir vietinio paviršiaus sudėtingumo įtakos neapdorotų taškų debesų duomenų, gautų kalibruojant rezervuarą, kokybei.

Išvados

Šiame baigiamajame magistro projekte buvo ištirta informacinių parametų – lazerio kritimo kampo, atstumo iki paviršiaus ir taškų tankio – įtaka trimačio lazerinio skenavimo rezultatų kokybei ir patikimumui uždaroje erdvėje, konkrečiai – horizontaliose kuro talpose. Remiantis atlikta literatūros analize, taškų debesies apdorojimo algoritmų kūrimu bei taikymu, ir detalio eksperimentinių duomenų statistine analize, suformuluotos šios pagrindinės išvados, atsakantys į iškeltus darbo tikslus ir uždavinius:

1. Sėkmingai įvertintas horizontalios kuro talpos trimačio lazerinio skenavimo rezultato (taškų debesies) nuokrypių erdvinis pasiskirstymas. Atlikta detali pagrindinių informacinių parametų – lazerio kritimo kampo, atstumo iki paviršiaus ir taškų tankio – įtakos matavimų kokybei, vertinamai lokalaus paviršiaus aproksimavimo RMS paklaida, analizė parodė, kad šie parametrai turi statistiškai reikšmingą įtaką matavimų patikimumui ir galutinio tūrio neapibrėžčiai.
2. Atlikta išsami mokslinės ir techninės literatūros apžvalga leido susisteminti esamus kuro talpų kalibravimo metodus (tradicinius tūrinius ir geometrinius, modernius 3D skenavimo metodus), apžvelgti lazerinio skenavimo įrenginių technologijas, jų parametrus, taškų debesies apdorojimo būdus ir identifikuoti pagrindinius technologinius bei metodologinius iššūkius, kylančius taikant šias technologijas uždarų erdvių kalibravimui.
3. Eksperimentiškai tiriant dvimačio skenavimo rezultatus, gautus lazeriniu metodu, nustatyti dinaminiai matavimų nuokrypiai ties staigiais geometriniiais perėjimais bei kampinio matavimo nestabilumo priklausomybė nuo skenuojamo paviršiaus kampo ir atstumo. Artimose distancijose stačiais kritimo kampais į blizgų paviršių stebėtas kampinio matavimo nestabilumas siekė iki 0,6 laipsnio, kas parodė bazinius lazerinio atstumo ir kampo matavimo įrangos apribojimus.
4. Tyrimo metu sukurti ir pritaikyti programiniai algoritmai bei įrankiai, skirti 3D taškų debesies importavimui, skenavimo įrenginio pozicijos nustatymui erdvėje, horizontalių ir vertikalų pjūvių perimetrų radimui ir segmentavimui, lokalaus paviršiaus orientacijos (normalės), lazerio kritimo kampo bei lokalaus paviršiaus aproksimavimo RMS paklaidos skaičiavimui ir rezultatų vizualizavimui. Šie įrankiai sudarė būtinas prielaidas detaliai taškų debesies analizei.
5. Eksperimentiškai išmatuoto trimačio taškų debesies erdvinis duomenų išsibarstymas ištirtas taikant aproksimavimo plokštumomis metodą 50x50 mm segmentuose ir skaičiuojant statistinius kokybės įverčius (RMS paklaidą). Nustatyta, kad RMS paklaidos vertės ženkliai kinta priklausomai nuo segmento padėties ir geometrijos, svyruojant nuo mažų reikšmių (pvz., vidutiniškai 0.80 mm optimalioje zonoje) iki žymiai didesnių (viršijančių 30 mm ties specifinėmis vidinėmis struktūromis ar prieigos liuku).
6. Atlikta erdvinio duomenų išsibarstymo statistinių įverčių (RMS paklaidos ir taškų tankio) pasiskirstymo analizė visoje talpos erdvėje ir vizualizuotos jų sąsajos su informaciniais parametrais (atstumu, kritimo kampu) iš lazerinio skenavimo įrenginio perspektyvos. Nustatyti dėsningi ryšiai: mažiausia RMS paklaida (mažiau nei 1.5 mm) stebima esant optimaliam kritimo kampui (apytiksliai 15°–60°) ir atstumo (apytiksliai 1.6–4.7 m) deriniui, o didėjant atstumui ir esant kraštutiniams kritimo kampams (<15° ir >80°), ypač mažo taškų tankio zonose, RMS paklaida reikšmingai didėja (pasiekiant net 7 mm ir daugiau vidutinę reikšmę kai kuriuose segmentuose, o maksimalios vertės viršija 30 mm).

Literatūros sąrašas

- [1] A. Petroleum Institute, „By Authority Of THE UNITED STATES OF AMERICA Legally Binding Document“.
- [2] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, „2019 ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code Rules for Construction of Power Boilers SECTION I“, 2019. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation>.
- [3] C. Ren, „Fuel Loss Analysis and Compliance Management in Gas Stations“, *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, t. 5, p. 1–6, doi: 10.25236/AJETS.2022.050601.
- [4] C. Gao, M. Guo, G. Wang, K. Guo, ir Y. Zhao, „3D Change Detection Method for Exterior Wall of LNG Storage Tank Supported by Multi-Source Spatial Data“, *Adv Theory Simul*, t. 7, nr. 4, bal. 2024, doi: 10.1002/adts.202300941.
- [5] S. Pallas Enguita, C. H. Chen, ir S. Kovacic, „A Review of Emerging Sensor Technologies for Tank Inspection: A Focus on LiDAR and Hyperspectral Imaging and Their Automation and Deployment“, *Electronics 2024, Vol. 13, Page 4850*, t. 13, nr. 23, p. 4850, gruodž. 2024, doi: 10.3390/ELECTRONICS13234850.
- [6] „Petroleum and liquid petroleum products-Calibration of vertical cylindrical tanks-Part 2: ISO 7507-2:2022(E) COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT“, 2022, Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: www.iso.org
- [7] O. Samoilenko ir V. Zaets, „Calibration of Tanks and Ships' Tanks for Storage and Transportation of Liquids by Laser Scanning“. [Interaktyvus]. Adresas: www.intechopen.com
- [8] M. R. Islam, „Storage of petroleum fluids“, *Pipelines*, p. 497–551, saus. 2023, doi: 10.1016/B978-0-12-820600-3.00008-1.
- [9] „Leica Cyclone 3DR | Leica Geosystems“. Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/>
- [10] „Artec Studio 19 | Professional 3D scanning solutions | Artec 3D“. Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.artec3d.com/3d-software/artec-studio>
- [11] „Software | Products | FARO“. Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.faro.com/en/Products/Software>
- [12] M. A-B Ebrahim ir M. Abdel-Bary EBRAHIM, „3D Laser Scanners' Techniques Overview“, 2015. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.researchgate.net/publication/282753883>
- [13] Z. Zhang, „A new measurement method of three-dimensional laser scanning for the volume of railway tank car (container)“, *Measurement (Lond)*, t. 170, nr. May 2017, p. 108454, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108454.
- [14] V. Knyva ir M. Knyva, „New Method for calibration of horizontal fuel tanks“, *Elektronika ir Elektrotechnika*, t. 18, nr. 9, p. 91–94, 2012, doi: 10.5755/j01.eee.18.9.2816.
- [15] L. Truong-Hong, N. Nguyen, R. Lindenbergh, P. Fisk, ir T. Huynh, „TOWARDS A DIGITAL TWIN of A STORAGE TANK USING LASER SCAN DATA“, *Volume 46, Issue 4/W4-2021, Pages 119 - 124*, t. 46, nr. 4/W4-2021, p. City, doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W4-2021-119-2021.
- [16] B. S. Marció, P. Nienhaysen, D. Habor, ir R. C. C. Flesch, „Quality assessment and deviation analysis of three-dimensional geometrical characterization of a metal pipeline by pulse-echo

- ultrasonic and laser scanning techniques“, *Measurement (Lond)*, t. 145, p. 30–37, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.05.084.
- [17] „(PDF) The New ISO 17025:2017 Requirement.“ Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: https://www.researchgate.net/publication/341099567_The_New_ISO_170252017_Requirement
- [18] S. Loreface, „Traceability and uncertainty analysis in volume measurements“, *Measurement (Lond)*, t. 42, nr. 10, p. 1510–1515, 2009, doi: 10.1016/j.measurement.2009.07.016.
- [19] „Petroleum and liquid petroleum products-Tank calibration by liquid measurement-Incremental method using volumetric meters“, 2001.
- [20] „Petroleum and liquid petroleum products-Calibration of horizontal cylindrical tanks-Part 1: Manual methods“, 2017, Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: www.iso.org
- [21] „BPM8871101-96/1:2005, Liquid tank calibration methodic (3–200m3),Lithuania:KTUMetrologyinstitute(2005).“
- [22] „ISO 7507-4 2010 (En) | PDF | Calibration | International Organization For Standardization“. Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.scribd.com/document/436067715/ISO-7507-4-2010-en>
- [23] „BPM300637345-01:2013Calibrationofliquidproduct tanksof 3Dlaser scanningmethod,Lithuania:KTUMetrologyinstitute (2013).“
- [24] Z. Yao, Q. Zhao, X. Li, ir Q. Bi, „Point cloud registration algorithm based on curvature feature similarity“, *Measurement (Lond)*, t. 177, nr. December 2020, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109274.
- [25] A. Nurunnabi, Y. Sadahiro, R. Lindenbergh, ir D. Belton, „Robust cylinder fitting in laser scanning point cloud data“, *Measurement (Lond)*, t. 138, p. 632–651, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.01.095.
- [26] J. Wang, K. Wei, J. Zhang, L. Tong, ir X. Bao, „Measurement method for vertical tank deformation based on laser scanning principle“, *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2016*, nr. Icsai, p. 583–587, 2017, doi: 10.1109/ICSAI.2016.7811021.
- [27] A. Israel Adekitan ir O. Omoruyi, „Stock keeping accuracy: A data based investigation of storage tank calibration challenges“, *Data Brief*, t. 19, p. 2155–2162, rugpj. 2018, doi: 10.1016/J.DIB.2018.06.122.
- [28] „SLAMTEC-Robot Autonomous Localization and Navigation Solution Supplier (Lidar, SLAM, Robot Platform)“. Žiūrėta: 2025 m. vasario 9 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.slamtec.com/en>
- [29] „FARO ® Focus Laser Scanner“, 2021, Žiūrėta: 2025 m. balandžio 6 d. [Interaktyvus]. Adresas: www.faro.com
- [30] „minimize(method='L-BFGS-B') — SciPy v1.15.2 Manual“. Žiūrėta: 2025 m. balandžio 28 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.minimize-lbfgsb.html>
- [31] „ConvexHull — SciPy v1.15.2 Manual“. Žiūrėta: 2025 m. balandžio 29 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.ConvexHull.html>
- [32] P. Salamitou, A. Dabas, ir P. H. Flamant, „Characterization of pulsed coherent Doppler LIDAR with the speckle effect“, *Applied Optics, Vol. 33, Issue 27*, pp. 6524–6532, t. 33, nr. 27, p. 6524–6532, rugs. 1994, doi: 10.1364/AO.33.006524.

1 priedas. Vizualizacijos kodas Python kalba

```
import numpy as np
import open3d as o3d
import time
from scipy.io import savemat, loadmat
import os

def export_to_mat(data, filename):
    """Export point cloud data (first 3 columns) to a .mat file."""
    mat_data = {'point_cloud_xyz': data[:, :3]}
    savemat(filename, mat_data)
    print(f"Data exported to {filename}")

def visualize_point_cloud(filename, output_filename=None):
    """Loads, processes, and visualizes the point cloud from an XYZ file."""
    start_time = time.time()
    print(f"Loading file: {filename}")

    data = None
    try:
        file_ext = os.path.splitext(filename)[1].lower()

        if file_ext == '.mat':
            print("Detected .mat file. Loading with scipy.io.loadmat...")
            mat_contents = loadmat(filename)
            possible_keys = ['point_cloud_xyz', 'data', 'points', 'cloud']
            found_key = None
            for key in possible_keys:
                if key in mat_contents and isinstance(mat_contents[key], np.ndarray):
                    data = mat_contents[key]
                    print(f"Found data under key: '{key}'")
                    found_key = key
                    break

            if data is None:
                print(f"Could not find data under common keys: {possible_keys}. Searching for suitable array...")
                for key, value in mat_contents.items():
                    if isinstance(value, np.ndarray) and value.ndim >= 1 and value.shape[-1] >= 3:
                        data = value
                        print(f"Found potential data under key: '{key}'")
                        found_key = key
                        break

            if data is None:
                raise ValueError(f"Could not find a suitable NumPy array with >= 3 columns in {filename}")

        else:
            print("Detected text file. Loading with np.loadtxt...")
            data = np.loadtxt(filename)
            if data.ndim == 1:
                data = data.reshape(1, -1)

        print(f"Data loaded. Shape: {data.shape}")

    except FileNotFoundError:
        print(f"Error: File not found at {filename}")
        return False
    except Exception as e:
        print(f"Error loading or processing file {filename}: {e}")
        return False
```

```

if data.shape[1] < 3:
    print(f"Error: Data has only {data.shape[1]} columns. Need at least 3 (X, Y, Z).")
    return False
elif data.shape[1] > 3:
    print(f"Warning: Input data has {data.shape[1]} columns. Using only the first 3 for XYZ coordinates.")
    points_xyz = data[:, :3]
    pcd = o3d.geometry.PointCloud()
    pcd.points = o3d.utility.Vector3dVector(points_xyz)
    if len(points_xyz) > 0:
        z_values = points_xyz[:, 2]
        z_min, z_max = z_values.min(), z_values.max()
        if z_max > z_min:
            normalized_z = (z_values - z_min) / (z_max - z_min)
        else:
            normalized_z = np.zeros_like(z_values)
        colors = np.zeros((len(z_values), 3))
        colors[:, 0] = normalized_z
        colors[:, 1] = 0.2
        colors[:, 2] = 1 - normalized_z
        pcd.colors = o3d.utility.Vector3dVector(colors)
    else:
        print("Warning: No points found in the data.")
        return False

print(f"Number of points: {len(points_xyz)}")
print(f>Data processing time: {time.time() - start_time:.2f} seconds")
vis = o3d.visualization.Visualizer()
vis.create_window(window_name=f"Point Cloud: {os.path.basename(filename)}",
width=1600, height=900)

vis.add_geometry(pcd)
try:
    bbox = pcd.get_axis_aligned_bounding_box()
    extent = bbox.get_extent()
    diagonal = np.linalg.norm(extent)
    frame_size = max(diagonal * 0.1, 0.1)
except Exception:
    frame_size = 0.5
coordinate_frame = o3d.geometry.TriangleMesh.create_coordinate_frame(size=frame_size,
origin=[0, 0, 0])
vis.add_geometry(coordinate_frame)
opt = vis.get_render_option()
opt.background_color = np.asarray([0.1, 0.1, 0.1])
opt.point_size = 1.5
opt.show_coordinate_frame = False
try:
    view_ctl = vis.get_view_control()
    center = pcd.get_center()
    camera_pos_offset = frame_size * 0.1
    camera_position_approx = [0, -camera_pos_offset, 0]
    front_vector = center - camera_position_approx

    view_ctl.set_front(front_vector)
    view_ctl.set_lookat(center)
    view_ctl.set_up([0, 0, 1])
    distance_to_center = np.linalg.norm(center - camera_position_approx)
    initial_zoom = distance_to_center * 0.1
    view_ctl.set_zoom(initial_zoom)

except Exception as e:
    print(f"Warning: Could not set initial camera perspective: {e}")
print("Starting visualization window. Close the window to continue.")
vis.run()

```

```

vis.destroy_window()
print("Visualization window closed.")
if output_filename:
    try:
        export_to_mat(points_xyz, output_filename)
        return True
    except Exception as e:
        print(f"Error exporting data to {output_filename}: {e}")
        return False
else:
    print("Visualization completed without saving data.")
    return True

def list_files(directory='.', extensions=('.xyz', '.xyz.asc', '.asc', '.mat')):
    """Lists files with specified extensions in the directory and subdirectories."""
    found_files = []
    for root, _, files in os.walk(directory):
        for file in files:
            if file.lower().endswith(extensions):
                rel_path = os.path.relpath(os.path.join(root, file), directory)
                found_files.append(rel_path)
    return sorted(found_files)

def ask_save_option():
    """Asks the user if they want to save the data and gets the output filename."""
    while True:
        save_choice = input("Save the loaded XYZ data to a .mat file? (y/n): ").strip().lower()
        if save_choice == 'y':
            default_output = 'point_cloud_output.mat'
            custom_output = input(f"Enter output .mat filename (or press Enter for '{default_output}'): ").strip()
            output_file = custom_output if custom_output else default_output
            if not output_file.lower().endswith('.mat'):
                output_file += '.mat'
            return output_file
        elif save_choice == 'n':
            return None
        else:
            print("Invalid input. Please enter 'y' or 'n'.")

def interactive_file_selection():
    print("\n" + "="*60)
    print(" Open3D Point Cloud Visualizer")
    print("="*60)

    xyz_files = list_files()

    if not xyz_files:
        print("\nNo compatible files (.xyz, .xyz.asc, .asc, .mat) found in the current directory or subdirectories.")
        while True:
            custom_path = input("Enter the full path to your point cloud file: ").strip()
            if os.path.isfile(custom_path):
                return custom_path
            else:
                print(f"Error: File not found at '{custom_path}'. Please try again.")
                if input("Try again? (y/n): ").strip().lower() != 'y':
                    return None
    else:
        print("\nAvailable files found:")
        for i, file in enumerate(xyz_files, 1):
            print(f"{i}. {file}")
        print(f"{len(xyz_files) + 1}. Enter a different file path manually")

        while True:
            try:
                choice_str = input("\nSelect a file by number or choose option {}: ")

```

```

".format(len(xyz_files) + 1)).strip()
    choice = int(choice_str)

    if 1 <= choice <= len(xyz_files):
        return xyz_files[choice - 1]
    elif choice == len(xyz_files) + 1:
        while True:
            custom_path = input("Enter the full path to your point cloud
file: ").strip()
            if os.path.isfile(custom_path):
                return custom_path
            else:
                print(f"Error: File not found at '{custom_path}'.")
                if input("Try again? (y/n): ").strip().lower() != 'y':
                    return None
        else:
            print(f"Invalid choice. Please enter a number between 1 and
{len(xyz_files) + 1}.")

    except ValueError:
        print("Invalid input. Please enter a number.")
    except KeyboardInterrupt:
        print("\nOperation cancelled by user.")
        return None

if __name__ == "__main__":
    selected_input_file = interactive_file_selection()

    if selected_input_file:
        print(f"\nSelected input file: {selected_input_file}")
        selected_output_file = ask_save_option()

        if selected_output_file:
            print(f"Data will be saved to: {selected_output_file}")
        else:
            print("Data will not be saved.")

        print("\nStarting visualization...")
        success = visualize_point_cloud(selected_input_file, selected_output_file)

        if success:
            print("\nProcess finished successfully.")
        else:
            print("\nProcess finished with errors.")
    else:
        print("\nNo file selected. Exiting.")

```