Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astrofizikos institutas

Vladas Šatas

ASTEROIDŲ FOTOGRAMETRINĖ REKONSTRUKCIJA: NUO SINTETINIŲ IKI OSIRIS-REX MISIJOS DUOMENŲ

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programa

Studentas	Vladas Šatas
Darbo vadovas	doc. Donatas Narbutis
Instituto direktorius	prof. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2026

Turinys

Žodynas **4**

Įvadas **5**

1 Teorinė apžvalga **6**

1.1 3D rekonstrukcijos pagrindai 6

1.2 Duomenų apdorojimo algoritmai ir programinė įranga 7

1.2.1 Vaizdų paruošimo metodai 8

1.2.2 Erdvinių duomenų struktūros ir paieškos algoritmai 9

1.2.3 Taškų debesų registravimo algoritmai 10

1.2.4 Geometrinio tikslumo vertinimas ir triukšmo šalinimas 11

1.3 Pritaikymas astrofizikoje 11

1.4 Fotogrametriniai iššūkiai kosminėje aplinkoje 12

1.4.1 Apšvietimo specifika 12

1.4.2 Radiometrinis nuoseklumas 13

1.4.3 Trajektorijos ir sukimosi inversija 13

2 Metodologijos validacija kuriant sintetinius modelius **14**

2.1 Sintetinių asteroidų modelių generavimas 14

2.2 Bazinės fotogrametrijos analizė 18

2.3 Rekonstrukcija imituojant kosmines sąlygas 21

2.4 3D rekonstrukcija 22

2.5 Rekonstrukcijos tikslumo vertinimas 23

2.5.1 Triukšmo šalinimas 23

2.5.2 Duomenų normalizavimas 23

2.5.3 Grubus lygiavimas 24

2.5.4 Tikslus lygiavimas 25

2.5.5 Kiekybinis palyginimas 25

2.6 Sintetinės rekonstrukcijos rezultatai ir diskusija 27

2.6.1 Fotogrametrijos taikymas idealiomis sąlygomis 27

2.6.2 Fotogrametrijos taikymas simuliuotomis kosmoso sąlygomis 33

2.6.3 Sintetinės rekonstrukcijos apibendrinimas 40

3 Fotogrametrinė analizė realiomis kosmoso sąlygomis **42**

3.1 Duomenų šaltiniai ir atrankos metodika 42

3.1.1 Duomenų archyvas 42

3.1.2 Misijos fazių ir instrumentų parinkimas 42

3.1.3 Etaloninio modelio duomenų šaltinis 43

3.1.4 Vaizdų atrinkimas 44

3.2 Vaizdų paruošimas 45

3.2.1 Formatų konversija . . . 45
3.2.2 Paviršiaus kontrasto stiprinimas . . . 46
3.2.3 Fono maskavimas . . . 46
3.3 Modulinės fotogrametrinės sistemos įgyvendinimas . . . 47
3.4 Kiekybinis palyginimas . . . 48
3.5 Rezultatai ir diskusija . . . 49
3.5.1 Duomenų filtravimo statistika . . . 49
3.5.2 Kameros parametrai . . . 50
3.5.3 Rekonstrukcijos stabilumas skirtinguose scenarijuose . . . 50
3.5.4 Kiekybinis tikslumo vertinimas . . . 52

4 Bendroji diskusija **56**
4.1 Metodologijos evoliucija nuo simuliacijų iki realių stebėjimų . . . 56
4.2 Fotogrametrijos apribojimai asteroidų tyrimuose . . . 56
4.3 Metodo pritaikomumas . . . 57

Išvados **58**

Literatūra **59**

Žodynas

Santrumpa	Reikšmė
2D	dvimatė erdvė
3D	trimatė erdvė
C2C	atstumas nuo taško iki taško (angl. *Cloud-to-Cloud*)
C2M	atstumas nuo taško iki tinklelio (angl. *Cloud-to-Mesh*)
CLAHE	adaptyvus histogramos išlyginimo su kontrasto ribojimu algoritmas (angl. *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*)
ESA	Europos kosmoso agentūra (angl. *European Space Agency*)
FITS	lanksti vaizdų perdavimo sistema (angl. *Flexible Image Transport System*)
FPFH	greitų taškų požymių histogramos algoritmas (angl. *Fast Point Feature Histogram*)
ICP	iteratyvusis artimiausio taško algoritmas (angl. *Iterative Closest Point*)
JAXA	Japonijos aerokosminių tyrimų agentūra (angl. *Japan Aerospace Exploration Agency*)
KDTree	K-dimensinio medžio duomenų struktūra (angl. *K-Dimensional Tree*)
L2	antrojo lygio duomenų produktai (angl. *Level 2*)
LiDAR	lazerinis aukščiamatis (angl. *Light Detection and Ranging*)
MVS	daugiavaizdžio stereo atkūrimo algoritmas (angl. *Multi-View Stereo*)
NASA	Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija (angl. *National Aeronautics and Space Administration*)
OLA	misijos lazerinis aukščiamatis (angl. *OSIRIS-REx Laser Altimeter*)
ORB	orientuota greita bei pasukta trumpa požymių atpažinimo metodika (angl. *Oriented FAST and Rotated BRIEF*)
OSIRIS-REx	NASA kosminė misija (angl. *Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security-Regolith Explorer*)
PDS	planetų duomenų sistema (angl. *Planetary Data System*)
PLY	daugiakampio failo formatas (angl. *Polygon File Format*)
PNG	perkeliamojo tinklo grafika (angl. *Portable Network Graphics*)
RANSAC	atsitiktinių imčių sutapimo metodas (angl. *Random Sample Consensus*)
RMSE	vidutinis kvadratinis nuokrypis (angl. *Root Mean Square Error*)
SfM	struktūros iš judesio algoritmas (angl. *Structure-from-Motion*)
SIFT	mastelio invariantinė požymių transformacija (angl. *Scale-Invariant Feature Transform*)
SOR	statistinių nukrypimų šalinimo filtras (angl. *Statistical Outlier Removal*)
SPICE	erdvėlaivio planetų instrumentų C-matricų įvykiai (angl. *Spacecraft Planet Instrument C-matrix Events*)

Įvadas

Kosminių misijų ankstyvosiose fazėse optiniai jutikliai yra pirminis paviršiaus informacijos šaltinis. Aktyvūs instrumentai, tokie kaip lazeriniai aukščiamačiai (angl. *Light Detection and Ranging*, LiDAR), reikalauja mažo atstumo iki tiriamo objekto [1]. Dėl šios priežasties prieš erdvėlaiviui pasiekiant darbinį šių instrumentų atstumą, yra kliaunamasi optiniais vaizdais.

Optinė fotogrametrija, apimanti struktūros iš judesio (angl. *Structure-from-Motion*, SfM) ir daugiavaizdžio stereo atkūrimo (angl. *Multi-View Stereo*, MVS) algoritmus, siūlo perspektyvų sprendimą ankstyvam formos ir tūrio modeliavimui [2, 3]. Nepaisant šio potencialo, fotogrametrijos pritaikymą kosmoso aplinkoje riboja specifiniai radiometriniai ir kinematiniai iššūkiai. Šioje erdvėje algoritmai susiduria su didelio kontrasto šešėlius sukeliančiu vieninteliu šviesos šaltiniu bei nuolatiniu dangaus kūno sukimusi aplink savo ašį. Šie veiksniai dažnai pažeidžia bazines metodų prielaidas.

Norint sėkmingai išnaudoti misijų archyvus, tokius kaip OSIRIS-REx projekto duomenys [4], yra būtina ištirti fotogrametrinių algoritmų veikimo ribas. Šiam tikslui reikia sukurti patikimą duomenų apdorojimo sistemą, kuri sujungtų kontroliuojamose simuliacijose gautus rezultatus su realių stebėjimų aplinka. Tai leistų paversti archyvinius optinius vaizdus vertingais trimačiais (3D) modeliais, skirtais ankstyvajai dangaus kūnų charakterizacijai.

Darbo tikslas

Įvertinti SfM ir MVS algoritmų pritaikomumą bei tikslumą, rekonstruojant asteroidų 3D modelius iš sintetinių simuliacijų ir realių kosminių misijų optinių duomenų.

Pagrindiniai uždaviniai

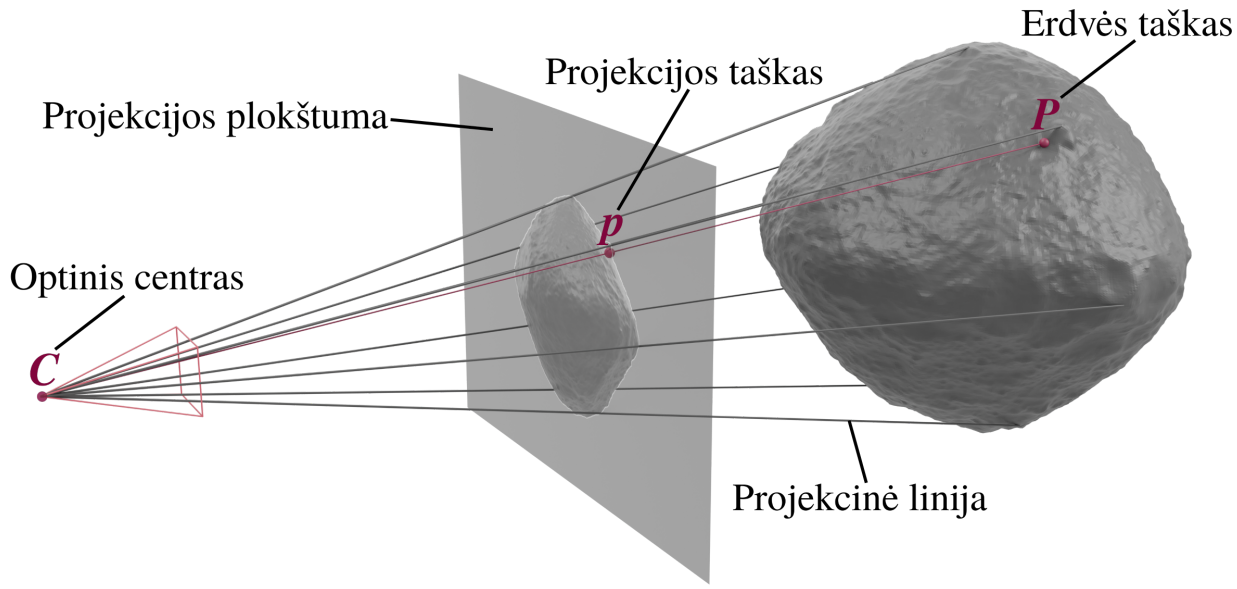
1. Sukurti procedūriškai generuojamus sintetinius asteroidų modelius ir atlikti bazinę fotogrametrinių algoritmų validaciją.
2. Ištirti algoritmų veikimo ribas, simuliuojant atšiaurias kosmoso apšvietimo sąlygas bei specifines praskriejimo trajektorijas.
3. Sukurti daugiapakopę archyvinių duomenų filtravimo ir vaizdų apdorojimo metodiką, pritaikytą realiems OSIRIS-REx misijos duomenims.
4. Atlikti asteroido Bennu 3D rekonstrukciją, pritaikant modulinę parametrų valdymo sistemą.
5. Įvertinti atkurto fotogrametrinio modelio lokalų geometrinį tikslumą ir globalų paviršiaus padengimą, lyginant jį su etaloniniais lazerinio aukščiamačio matavimais.

1 Teorinė apžvalga

Trimatė (3D) rekonstrukcija yra skaičiavimo procedūra, skirta objekto ar scenos reprezentacijos generavimui iš dvimačių (2D) vaizdų. Šis procesas, pagrįstas geometrija, optika ir kompiuterine rega, išgauna gylio ir erdvinę informaciją iš kelių skirtingų požiūrio taškų, paversdamas vaizdų projekcijas į erdvinius modelius. Ši technologija yra taikoma įvairiose srityse, įskaitant kompiuterinę grafiką, robotiką ir mokslinius tyrimus, ir suteikia tikslius erdvinius duomenis, reikalingus analizei, modeliavimui bei sprendimų priėmimui.

1.1 3D rekonstrukcijos pagrindai

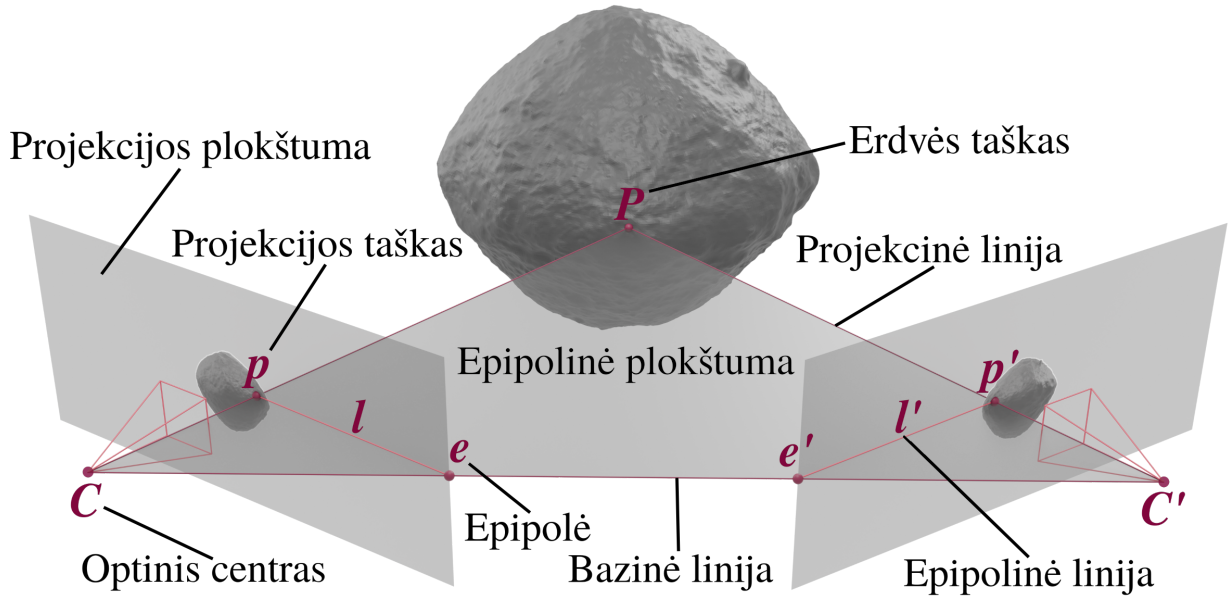
Matematinis 3D rekonstrukcijos pagrindas remiasi projekcijos modeliu, kuris nusako, kaip erdvės taškai yra atvaizduojami ant 2D plokštumų. Daugumoje rekonstrukcijos procesų yra naudojama perspektyvinė projekcija, atsižvelgianti į gylį ir imituojanti, kaip kameros fiksuoja realaus pasaulio vaizdus [5]. Matematiškai šis procesas (žr. 1 pav.) apibrėžiamas, susiejant trimatės erdvės tašką P su jo atitikmeniu dvimatėje projekcijos plokštumoje esančiu tašku p. Geometrinis atvaizdavimas yra formuojamas projekcinėmis linijomis, sklindančiomis iš optinio centro C link tiriamojo objekto paviršiaus. Sujungus vaizdus, užfiksuotus iš skirtingų požiūrio taškų, šie projekcijos modeliai gali būti invertuojami, siekiant rekonstruoti 3D objektus.



1 pav. Perspektyvinės projekcijos schema, kurioje trimatės erdvės taškas $\boldsymbol{P}$ projektuojamas į dvimatę projekcijos plokštumą, gaunant projekcijos tašką $\boldsymbol{p}$. Šis ryšys pavaizduotas, projekcinėms linijoms sklindant iš optinio centro $\boldsymbol{C}$ link objekto paviršiaus. Visi pažymėti taškai matematiškai apibrėžiami kaip padėties vektoriai. Schema parengta remiantis [5] teoriniu modeliu.

Epipolinė geometrija (žr. 2 pav.) praplečia perspektyvinės projekcijos modelį ir apibrėžia dviejų kamerų sistemą. Šioje sistemoje trimatės erdvės taškas P bei abiejų kamerų optiniai centrai C ir C' sudaro bendrą epipolinę plokštumą. Linija, jungianti abu optinius centrus, kerta kamerų projekcijų plokštumas epipoliuose e ir e'. Epipolinės plokštumos ir projekcijų plokštumų sankirtos suformuoja epipolines linijas l ir l'. Šios linijos atlieka pagrindinį vaidmenį atitikmenų paieškoje, nes taško

projekcija viename vaizde apriboja jo atitikmens paiešką tik išilgai atitinkamos epipolinės linijos antrame vaizde. Toks geometrinis suvaržymas leidžia tiksliai įvertinti gylį ir užtikrina erdvinį nuoseklumą fotogrametrinėje rekonstrukcijoje [2, 6].



2 pav. Epipolinės geometrijos schema dviejų kamerų sistemoje. Trimatės erdvės taškas ***P*** ir optiniai centrai ***C*** bei ***C'*** apibrėžia epipolinę plokštumą. Epipolinės linijos ***l*** ir ***l'*** susidaro, epipolinei plokštumai kertant projekcijos plokštumas, o bazinės linijos susikirtimai su jomis sukuria epipoles ***e*** ir ***e'***. Visi pažymėti taškai matematiškai apibrėžiami kaip padėties vektoriai. Schema parengta remiantis [6] teoriniu modeliu.

Esminis šio proceso žingsnis yra vizualinių elementų aptikimas ir palyginimas tarp vaizdų. Tokie metodai kaip mastelio invariantinė požymių transformacija (angl. *Scale-Invariant Feature Transform*, SIFT) ir orientuota greita bei pasukta trumpa požymių atpažinimo metodika (angl. *Oriented FAST and Rotated BRIEF*, ORB) yra sukurti aptikti ir suderinti pagrindinius taškus esant mastelio ir pasukimo pokyčiams [7]. Po elementų suderinimo struktūros iš judesio atkūrimo (angl. *Structure-from-Motio*n, SfM) metodas rekonstruoja pradinį retą 3D taškų debesį, nustatydamas kamerų padėtis ir scenos geometriją pagal santykinį judėjimą tarp vaizdų. Retos rekonstrukcijos dažnai tikslinamos, naudojant daugiavaizdį stereo (angl. *Multi-View Stereo*, MVS), kuris tankina taškų debesį, trianguliuojant papildomus taškus, leidžiančius kurti detalius paviršiaus modelius [2, 3]. Šie metodai, pagrįsti geometriniais principais, priklauso nuo aukštos kokybės ir daug vizualinių elementų turinčių duomenų rinkinių. Iššūkių kyla, kai duomenų rinkiniuose yra tekstūros neturinčių paviršių, apšvietimo nenuoseklumų arba užsklandų, kurios gali sutrikdyti elementų suderinimą ir apriboti rekonstrukcijos tikslumą.

1.2 Duomenų apdorojimo algoritmai ir programinė įranga

COLMAP [8] yra atvirojo kodo fotogrametrinė sistema, integruojanti struktūros iš judesio bei daugiavaizdžio stereo atkūrimo algoritmus. Pagrindinė šios programinės įrangos paskirtis apima 3D geometrinių struktūrų atkūrimą analizuojant 2D nuotraukų sekas.

Standartinėje šios programinės įrangos konfigūracijoje yra integruota automatinės rekonstrukcijos eiga, leidžianti atlikti visą modeliavimo ciklą be papildomo vartotojo įsikišimo. Šio proceso metu algoritmas savarankiškai analizuoja pateiktų vaizdų sekas ir kiekvienoje nuotraukoje identifikuoja unikalius vizualinius orientyrus. Nustačius charakteringas savybes, programa atlieka jų matematinį derinimą persidengiančiuose kadruose. Remiantis surastais atitikmenimis, sistema apskaičiuoja erdvines kamerų padėtis ir suformuoja pirminę geometriją reprezentuojantį retą taškų debesį. Galutiniame etape programa pritaiko daugiavaizdžio stereo atkūrimo metodus ir sugeneruoja detalų tankų 3D paviršiaus modelį.

Nors automatinė funkcija yra naudinga standartiniams uždaviniams spręsti, ši programinė įranga pasižymi savo moduline architektūra ir valdymo per komandinę eilutę galimybėmis. Šis funkcionalumas yra svarbus, analizuojant netipinius duomenų rinkinius. Komandinė eilutė leidžia visą automatizuotą fotogrametrijos procesą išskaidyti į atskirus ir nepriklausomus skaičiavimo blokus. Toks struktūrinis skaidymas suteikia tyrėjui galimybę individualiai konfigūruoti bei optimizuoti kiekvieno atskiro etapo matematinius parametrus. Šis lankstumas apima galimybę detaliai valdyti vizualinių savybių išgavimo jautrumo slenksčius ir tiksliai apibrėžti atitikmenų paieškos geometrinius nuokrypius. Galimybė tiesiogiai kontroliuoti šiuos kintamuosius yra būtina sąlyga, siekiant pritaikyti algoritmus prie sudėtingų apšvietimo sąlygų ar specifinių stebėjimo geometrijų.

Vienas iš svarbesnių COLMAP privalumų yra integruota kameros parametrų savikalibracijos funkcija (angl. *self-calibration*). Ši savybė įgalina algoritmą matematiškai optimizuoti vidinius optinės sistemos parametrus pačios rekonstrukcijos eigoje. Skaičiavimų metu programa automatiškai koreguoja kameros židinio nuotolį ir lęšio iškraipymo koeficientus. Šis dinaminis parametrų derinimas yra svarbus veiksnys, analizuojant duomenis ne papildomų pozicijos duomenų. Savikalibracija leidžia sistemai kompensuoti fizinius optikos iškraipymus ir užtikrina stabilaus matematinio sprendinio konvergavimą sudėtingose situacijose.

1.2.1 Vaizdų paruošimo metodai

Skaitmeninio vaizdo apdorojimo sistemose dažnai susiduriama su matematiniu poreikiu konvertuoti didelio bitų gylio informaciją į žemesnio bitų gylio formatus. Tiesioginis duomenų transformavimas, taikant tiesinio suspaudimo algoritmus, lemia naudingos vaizdinės informacijos praradimą, analizuojant scenas, pasižyminčias dideliais ryškumo kontrastais. Siekiant išvengti šios problemos yra taikomas logaritminio tonų atvaizdavimo metodas (angl. *logarithmic tone mapping*). Šis netiesinis matematinis modelis remiasi logaritminės funkcijos savybėmis, siekiant efektyviai ir tolygiai paskirstyti platų verčių diapazoną naujoje skaičių erdvėje. Algoritmo pritaikymas užtikrina smulkių tekstūros detalių išsaugojimą tiek gilių šešėlių, tiek ir stipraus apšvietimo zonose. Toks adaptyvus šviesumo verčių perskaičiavimas užkerta kelią tamsių regionų užtemdymui bei šviesių sričių peršvietimui ir taip užtikrina stabilią informacinę bazę tolesniems kompiuterinės regos algoritmams.

Adaptyvus histogramos išlyginimo algoritmas su kontrasto ribojimu (angl. *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*, CLAHE) [9] yra taikomas lokalaus vaizdo kontrasto optimizavimui. Skirtingai nuo globalių histogramos transformacijos metodų, šis algoritmas skaitmeninį vaizdą suskaido į mažesnius, nepriklausomus stačiakampius regionus. Kiekvienam iš šių regionų yra at-

skirai apskaičiuojama ir išlyginama šviesumo verčių histograma, o tai leidžia efektyviai išryškinti smulkias lokalios tekstūros detales. Siekiant išvengti nepageidaujamo triukšmo sustiprinimo tolygiuose regionuose, algoritme yra integruotas matematinis kontrasto ribojimo mechanizmas. Šis mechanizmas nukerta histogramos aukštas viršūnes virš nustatyto slenksčio ir perteklinę reikšmių dalį tolygiai paskirsto visame intensyvumo diapazone. Galutinis vaizdas suformuojamas pritaikant bilinearinę interpoliaciją tarp gretimų regionų ribų, o tai pašalina matomus blokinius artefaktus ir užtikrina sklandžius šviesumo gradientus visame modifikuotame vaizdo plote.

Binarinis maskavimas (angl. *binary masking*) taikant morfologines operacijas yra naudojamas skaitmeninio vaizdo segmentavimo bei fono izoliavimo uždaviniuose. Šis procesas remiasi matematinės morfologijos principais, kur vaizdo elementai yra modifikuojami naudojant apibrėžtą struktūrinį elementą. Atidarymo operacija (angl. *morphological opening*) yra procesas, susidedantis iš erozijos ir išplėtimo žingsnių. Šis derinys efektyviai eliminuoja smulkius pavienius triukšmo taškus bei plonas jungtis binarinėje kaukėje, nepažeisdamas pagrindinių objekto struktūrų. Savo ruožtu morfologinio išplėtimo operacija (angl. *morphological dilation*) atskirai naudojama siekiant tolygiai išplėsti suformuoto objekto kontūro ribas erdvėje. Tai leidžia sukurti apsauginę zoną aplink segmentuotą elementą ir užtikrina, kad visi kraštiniai objekto pikseliai bus įtraukti į galutinę kaukę, išvengiant kraštinės geometrijos informacijos praradimo.

1.2.2 Erdvinių duomenų struktūros ir paieškos algoritmai

Skaitmeninėje geometrijoje elementų atitikmenų paieška dažnai formuluojama kaip pagrindinė kombinatorikos problema. Standartinis nuoseklus gretimų aibės elementų derinimas lygina tik lokalius, greta esančius narius. Toks metodas yra nepakankamas, tiriant kompleksinius ir nenuoseklius erdvinius ryšius. Šiai problemai spręsti taikoma išsamios paieškos strategija (angl. *exhaustive matching*), reikalaujanti pilno derinimo tinklo sudarymo. Taikant šį matematinį metodą, kiekvienas nagrinėjamos aibės narys yra sistemiškai lyginamas su visais kitais sistemos nariais. Nors toks kombinatorinis metodas padidina skaičiavimo sudėtingumą ir reikalauja daugiau resursų, jis užtikrina aukštą matematinį patikimumą. Visų įmanomų porų susiejimas leidžia algoritmams patikimai identifikuoti erdvinius ryšius tarp nutolusių aibės elementų ir suformuoti topologinį tinklą, nepriklausomą nuo pradinės duomenų pateikimo sekos.

3D geometrinių duomenų analizė reikalauja optimizuotų erdvinių struktūrų, leidžiančių efektyviai valdyti didelius taškų masyvus. K dimensinio medžio algoritmas (angl. *K-Dimensional Tree*, KDTree) [10] yra hierarchinė duomenų struktūra, skirta n matmenų erdvės skaidymui. Šis metodas veikia rekursyviai dalydamas koordinačių erdvę hiperplokštumomis į vis mažesnius blokus pagal kintamąsias koordinačių ašis. Toks struktūrinis organizavimas leidžia suformuoti subalansuotą paieškos medį, kuriame kiekvienas mazgas reprezentuoja tam tikrą erdvės sritį. Šios struktūros pritaikymas užtikrina logaritminį laiko sudėtingumą, vykdant artimiausio kaimyno paieškos užklausas nurodytu spinduliu. Tai yra matematiškai efektyvesnis sprendimas, palyginti su standartine linijine masyvų paieška, nes algoritmas eliminuoja poreikį tikrinti erdvėje nutolusius taškus. Dėl šių savybių minėtas erdvinio skaidymo metodas išlieka svarbiu įrankiu optimizuojant geometrinių duomenų apdorojimo procesus.

Procedūriniam erdvinių laukų ir tekstūrų generavimui plačiai taikomas gradientinio triukšmo algoritmas, literatūroje dažniausiai apibrėžiamas kaip Perlino triukšmas [11]. Šis matematinis metodas įgalina pseudoatsitiktinių, tačiau erdvėje tolydžiai kintančių, daugiamačių funkcijų formavimą. Teorinis algoritmo mechanizmas remiasi koordinačių tinkleliu, kurio viršūnėms priskiriami atsitiktinės krypties gradiento vektoriai. Tiksli skaliarinė reikšmė bet kuriame erdvės taške nustatoma, skaičiuojant sandaugas tarp šių gradientų ir poslinkio vektorių, o galutinis rezultatas gaunamas, pritaikius glodžią netiesinę interpoliaciją.

Siekiant sugeneruoti kompleksines heterogenines struktūras ir išvengti dirbtinai atrodančių, pasikartojančių raštų, bazinis algoritmas yra išplečiamas, pritaikant fraktalinio sluoksniavimo principą. Šio matematinio proceso metu apjungiamos kelios nepriklausomos triukšmo funkcijos, vadinamos oktavomis. Kiekviena sekanti oktava pasižymi sistemingai didinamu erdviniu dažniu ir proporcingai mažinama amplitude. Toks kontroliuojamas skirtingų mastelių kombinavimas leidžia sukurti detalius erdvinius darinius, kur žemo dažnio dedamosios suformuoja stambias makroskopines struktūras, o aukšto dažnio komponentės integruoja mikroskopinį paviršiaus nelygumą.

1.2.3 Taškų debesų registravimo algoritmai

3D taškų debesų lygiavimo procesas pradedamas nuo lokalios geometrijos analizės, taikant greitų taškų požymių histogramų algoritmą (angl. Fast Point Feature Histogram, FPFH) [12]. Šis matematinis metodas veikia kaip universalus įrankis, apskaičiuojantis kiekvieno erdvės taško ir jo artimiausių kaimynų geometrinius ryšius. Algoritmo pagrindą sudaro paviršiaus normalių vektorių ir kampų, tarp nagrinėjamo taško bei jo kaimynų, įvertinimas apibrėžtoje sferinėje aplinkoje. Gautos reikšmės yra sugrupuojamos į daugiamates statistines histogramas suformuojant unikalų skaitmeninį deskriptorių kiekvienai viršūnei. Šio deskriptoriaus privalumas yra jo nepriklausomybė nuo globalios objekto orientacijos ir padėties erdvėje. Tokia invariantiškumo savybė užtikrina galimybę patikimai identifikuoti ir susieti identiškas paviršiaus struktūras skirtinguose duomenų rinkiniuose, neatsižvelgiant į pirminę koordinačių sistemą.

Kitas žingsnis po lokalios geometrijos analizės, yra grubus taškų debesų lygiavimas taikant atsitiktinių imčių sutapimo metodą (angl. Random Sample Consensus, RANSAC) [13]. Šis stochastinis optimizavimo algoritmas yra skirtas atspariam matematinių modelių parametrų įvertinimui esant dideliam triukšmo kiekiui. Teorinis algoritmo mechanizmas remiasi iteratyvia atsitiktinių duomenų pogrupių atranka iš viso turimo FPFH atitikmenų masyvo. Kiekvienos iteracijos metu, naudojant minimalų būtiną geometrinių savybių skaičių, yra apskaičiuojama hipotetinė erdvinės transformacijos matrica. Vėliau ši matrica testuojama su likusiais duomenimis, siekiant įvertinti modelio tikslumą ir matematiškai atskirti teisingus geometrinius sutapimus nuo klaidingų atitikmenų. Procesas kartojamas iš anksto apibrėžtą skaičių kartų ir galiausiai pasirenkama transformacijos matrica, turinti didžiausią patvirtintų teisingų taškų porų skaičių.

Po pradinio grubaus lygiavimo, taikant stochastinius metodus, seka tikslus erdvinių duomenų registravimas naudojant iteratyvųjį artimiausio taško algoritmą (angl. Iterative Closest Point, ICP) [14]. Šis matematinis metodas veikia kaip baigiamojo geometrinio lygiavimo standartas, leidžiantis sumažinti likusius erdvinius nuokrypius tarp dviejų taškų debesų. Algoritmas remiasi kiekvieno

taško iš pirmojo debesies susiejimu su atitinkamu artimiausiu kaimyniniu tašku antrajame debesyje. Sudarius šias taškų poras optimizavimo tikslo funkcija iteratyviai apskaičiuoja erdvinės transformacijos matricą, minimizuojančią atstumų kvadratus tarp visų susietų elementų. Pritaikius naujai apskaičiuotą koordinačių transformaciją, taškų poros yra nustatomos iš naujo. Šis ciklinis procesas kartojamas tol, kol pasiekiama matematinė sprendinio konvergencija ir atstumų pokytis tarp iteracijų tampa minimalus.

1.2.4 Geometrinio tikslumo vertinimas ir triukšmo šalinimas

3D taškų debesų rekonstrukcijos eigoje atsiranda pavienių klaidingų taškų, reikalaujančių matematinio filtravimo. Šiam tikslui pasiekti taikomas statistinio triukšmo šalinimo algoritmas (angl. Statistical Outlier Removal, SOR) [15]. Jo teorinė bazė remiasi kiekvieno taško vietinio tankio erdvinėje struktūroje įvertinimu. Skaičiavimų metu sistema nustato vidutinį atstumą nuo analizuojamo taško iki iš anksto apibrėžto skaičiaus artimiausių kaimynų. Apskaičiavus šias reikšmes visiems taškų debesies elementams yra nustatomas bendras atstumų vidurkis ir standartinis nuokrypis. Remiantis šiais statistiniais para metrais suformuojamas maksimalaus leistino atstumo slenkstis. Visi erdvės taškai, kurių vidutinis atstumas iki kaimyninių viršūnių viršija šią ribą, yra matematiškai identifikuojami, kaip erdvinės išskirtys, ir pašalinami iš modelio. Šis statistinis filtras leidžia efektyviai eliminuoti geometrinį triukšmą išsaugant pradinę topografinę paviršiaus informaciją.

Geometrinio tikslumo vertinimui atlikti plačiai taikoma taškas į tašką atstumo skaičiavimo metodika (angl. Cloud-to-Cloud, C2C). Šis matematinis algoritmas matuoja euklidinį atstumą tarp kiekvieno tiriamojo taškų debesies elemento ir jam artimiausio kaimyninio taško lyginamajame debesyje. Pagrindinis šios metrikos privalumas yra didelis skaičiavimo greitis, leidžiantis greitai įvertinti didelių erdvinių duomenų rinkinių panašumą. Visgi, šiame metode skaičiavimai atliekami vertinant skirtumus tik tarp diskrečių viršūnių, be lokalaus paviršiaus interpoliacijos. Dėl šios priežasties atstumo įvertinimas yra priklausomas nuo erdvinių duomenų tankio ir gali iškraipyti rezultatus lyginant skirtingos raiškos modelius.

Siekiant išvengti diskrečiųjų atstumo skaičiavimo metodų trūkumų, yra taikoma taškas į tinklelį atstumo vertinimo metodika (angl. Cloud-to-Mesh, C2M). Šis algoritmas apskaičiuoja trumpiausią euklidinį atstumą nuo kiekvieno tiriamojo taškų debesies elemento iki artimiausio geometrinės plokštumos fragmento lyginamajame modelyje. Šio metodo matematinis pranašumas yra nepertraukiamo tinklelio paviršiaus interpoliacija tarp erdvinių viršūnių. Toks skaičiavimo principas leidžia įvertinti tikslius geometrinius nuokrypius, nepriklausomai nuo lyginamų modelių erdvinių duomenų tankio ar lokalių struktūrų raiškos skirtumų. Dėl šios savybės, metodika suteikia patikimus ir stabilius matavimo rezultatus analizuojant sudėtingas topografines anomalijas bei smulkias reljefo detales.

1.3 Pritaikymas astrofizikoje

3D rekonstrukcija tapo svarbiu įrankiu astrofizikoje, leidžiančiu tirti ir modeliuoti dangaus kūnus ir paviršius dideliu tikslumu. Transformuojant stebėjimo duomenis į 3D reprezentacija gaunamos

vertingos įžvalgos apie kosminių objektų struktūrą, dinamiką ir evoliuciją, palengvinamas misijų planavimas bei mokslinius atradimus [16].

Asteroidų, kometų ir planetų paviršių 3D modeliai yra svarbūs jų fizinių ir dinaminių savybių tyrimui [17, 18]. Šios rekonstrukcijos suteikia pagrindinius parametrus, tokius kaip dydis, forma ir sukimosi būsenos, kurie yra reikalingi, vertinant šių objektų trajektorijas ir elgesį. Be to, geologinių darinių, tokių kaip krateriai ir kalvagūbriai, rekonstrukcijos suteikia informacijos apie formavimosi procesus, tektoninį aktyvumą ir erozijos istoriją ir praplečia žinias apie planetų evoliuciją.

Remiantis šiais rezultatais, 3D rekonstrukcija tapo svarbia daugelio kosmoso misijų dalimi ir suteikė naudingų duomenų tyrimams bei analizei atskiruose projektuose:

- OSIRIS-REx (NASA) projekte išsamūs asteroido Bennu paviršiaus 3D modeliai leido nustatyti saugias mėginių ėmimo vietas ir prisidėjo prie misijos sėkmės [4].
- Hayabusa2 (JAXA) misijoje asteroido Ryugu paviršiaus modeliai atskleidė jo struktūrą, palengvino mėginių paėmimo operacijas ir praplėtė asteroido sudėties supratimą [19].
- Rosetta (ESA) atveju kometos 67P/Churyumov-Gerasimenko rekonstrukcija atskleidė jos sudėtingą dvilypę formą ir paviršiaus aktyvumą bei suteikė informacijos apie kometų evoliuciją [20].
- Mars Rovers (NASA) programoje Perseverance ir Curiosity naudojo 3D rekonstrukcijas, kad naviguotų Marso reljefu ir identifikuotų geologines struktūras, skirtas tyrinėti Marso paviršių bei geologinę istoriją [21].

Galimybė kurti tikslius 3D modelius papildė astrofizikos ir planetų mokslo metodiką bei suteikė naują būdą tyrinėti tolimus objektus. Šios rekonstrukcijos patvirtina teorinius modelius, praturtina supratimą apie kosminių kūnų dinamiką ir optimizuoja tyrimų misijų planavimą. Tobulėjant skaičiavimo technikoms 3D rekonstrukcija gali atlikti vis svarbesnį vaidmenį, plėtojant astrofizikos tyrimus ir žvalgybą bei sujungiant stebėjimo duomenis su atradimais.

1.4 Fotogrametriniai iššūkiai kosminėje aplinkoje

Fotogrametrijos algoritmų taikymas kosminių misijų duomenims skiriasi nuo žemiškųjų sąlygų dėl specifinių apšvietimo, radiometrijos ir kinematikos sąlygų. Norint rekonstruoti objektą būtina atsižvelgti į šiuos fizikinius apribojimus.

1.4.1 Apšvietimo specifika

Žemiškojoje fotogrametrijoje dažniausiai vyrauja difuzinis apšvietimas dėl atmosferos sklaidos, kuris sušvelnina šešėlius ir užtikrina tolygų objektų matomumą. Tuo tarpu kosminėje erdvėje dominuoja vienas taškinis ir kolimuotas šviesos šaltinis Saulė. Tai lemia didelio kontrasto aplinką su aštriais šešėliais.

Dauguma vaizdų savybių derinimo algoritmų remiasi šviesio pastovumo prielaida (angl. *brightness constancy constraint*). Ši prielaida teigia, kad to paties paviršiaus taško intensyvumas nesikeičia tarp kadrų, net jei taškas juda erdvėje per laiką [2,22]. Besisukančių asteroidų atveju šešėliai juda paviršiumi. Dėl to tas pats krateris viename kadre gali būti apšviestas, o kitame būti šešėlyje. Tai pažeidžia šią prielaidą ir sukelia klaidų savybių aptikimo etape, nes algoritmai negali identifikuoti to paties geometrinio taško pakitusiomis apšvietimo sąlygomis [1].

1.4.2 Radiometrinis nuoseklumas

Standartinės kameros fiksuoja šviesos intensyvumą, kuris priklauso nuo atstumo iki šviesos šaltinio ir stebėjimo geometrijos. Kosminėse misijose erdvėlaiviui artėjant prie objekto atstumas sparčiai kinta, todėl kinta ir matuojamas spinduliuotės srautas (angl. *radiance*).

Naudojant neapdorotus srauto duomenis tas pats paviršiaus elementas skirtinguose kadruose turės skirtingas pikselių vertes, o tai apsunkina automatizuotą atpažintų savybių suderinimą. Siekiant radiometrinio nuoseklumo būtina naudoti atspindžio koeficientą (angl. *reflectance* arba *I/F factor*). Šis dydis normalizuoja duomenis pagal krintantį saulės srautą ir geometriją, išskirdamas paviršiaus albedo, kuris yra būdingas pačiai medžiagai ir nepriklauso nuo stebėjimo atstumo.

1.4.3 Trajektorijos ir sukimosi inversija

SfM metodas reikalauja paralakso, stebėjimo taško poslinkio, sudarančio bazinę liniją (angl. *baseline*), reikalingą gylio trianguliacijai [2].

Artėjimo fazėje erdvėlaivis juda tiesia linija link objekto, o tai nesukuria pakankamo šoninio paralakso. Tačiau asteroido sukimasis aplink savo ašį leidžia taikyti kinematinę inversiją [23, 24]. Fotogrametrinėje analizėje besisukantis objektas ir tiesiai judanti kamera gali būti matematiškai nagrinėjami kaip statinis objektas ir aplink jį skriejanti kamera. Šis santykinis judėjimas sukuria būtiną bazinę liniją, leidžiančią atkurti trimatę geometriją.

2 Metodologijos validacija kuriant sintetinius modelius

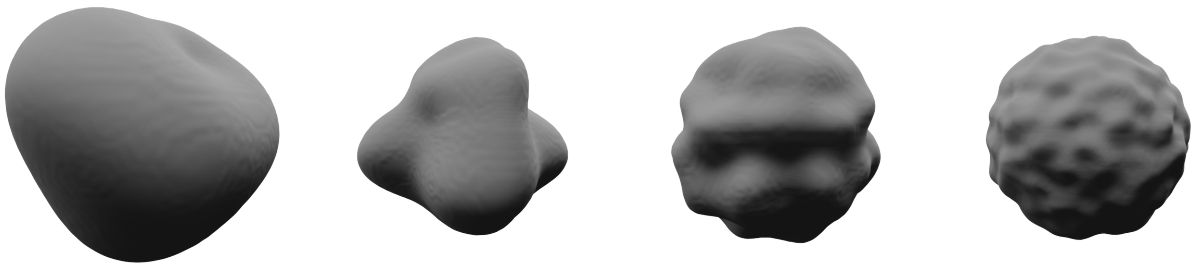
Šiame skyriuje pristatoma pradinė fotogrametrinės rekonstrukcijos metodologijos validacija, atlikta naudojant sintetinius duomenis. Prieš taikant SfM ir MVS algoritmus realiems kosminių misijų duomenims, buvo įvertintas jų veikimo patikimumas ir geometrinis tikslumas kontroliuojamoje aplinkoje. Sintetinių duomenų naudojimas leidžia izoliuoti specifinius vaizdų fiksavimo parametrus ir išvengti realių stebėjimų triukšmo, taip įgalinant objektyvų rekonstruoto modelio palyginimą su žinomu absoliučiu etalonu.

Skyrius struktūruojamas nuosekliai pereinant nuo duomenų generavimo prie rezultatų analizės. Pirmiausia aprašomas procedūrinis 3D asteroidų modelių kūrimas programine įranga Blender [25] bei dviejų skirtingų sudėtingumo lygių stebėjimo aplinkų imitavimas. Šios aplinkos apima bazinę idealizuotą situaciją ir realistišką kosminį scenarijų. Vaizdų apdorojimui ir taškų debesų generavimui naudojama COLMAP programinė įranga. Vėliau apibrėžiama automatizuota kiekybinio vertinimo metodika, kuri remiasi atstumų skaičiavimo algoritmais taikant CloudCompare [26] ir Open3D bibliotekas. Skyrius užbaigiamas gautų rezultatų aptarimu, kuriame identifikuojamas optimalus vaizdų parametrų derinys ir algoritmų pažeidžiamumas specifinėmis kosmoso sąlygomis.

2.1 Sintetinių asteroidų modelių generavimas

Pirmiausia buvo generuojami sintetiniai 3D asteroidų modeliai, skirti fotogrametrinio atkūrimo algoritmų validacijai. Procedūrinis modelių generavimas leido sukurti kontroliuojamą geometriją, naudojamą kaip absoliutus etalonas (angl. *ground truth*) tiek bazinėse analizėse, tiek imituojant sudėtingas kosminių stebėjimų sąlygas. Visi modeliavimo procesai buvo atliekami Blender programinėje įrangoje, automatizuojant veiksmus Python skriptais.

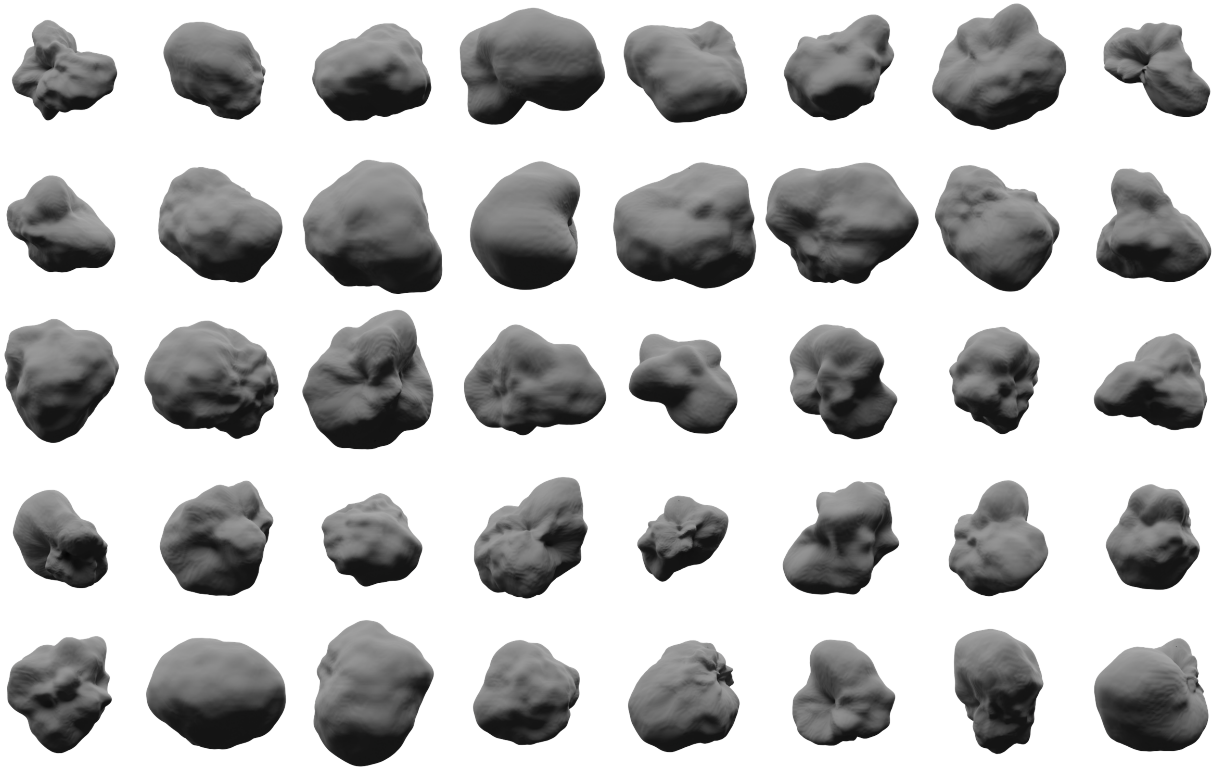
Bazinė asteroido forma buvo formuojama modifikuojant pradinį ikosferos (angl. *icosphere*) tinklą. Paviršiaus nelygumams išgauti pritaikytas 3D Perlino triukšmas, generuojamas pasitelkiant *perlin-numpy* biblioteką. Procese buvo kombinuojami keli triukšmo sluoksniai su skirtingais dažniais ir mastelio faktoriais (žr. 3 pav.). Žemo dažnio triukšmas formavo makroskopinę asteroido struktūrą, o aukšto dažnio sluoksniai mikroskopinį paviršiaus šiurkštumą.



3 pav. Skirtingų Perlino triukšmo sluoksnių poveikis asteroido modeliui didinant triukšmo dažnį ir mažinant jo mastelį iš kairės į dešinę.

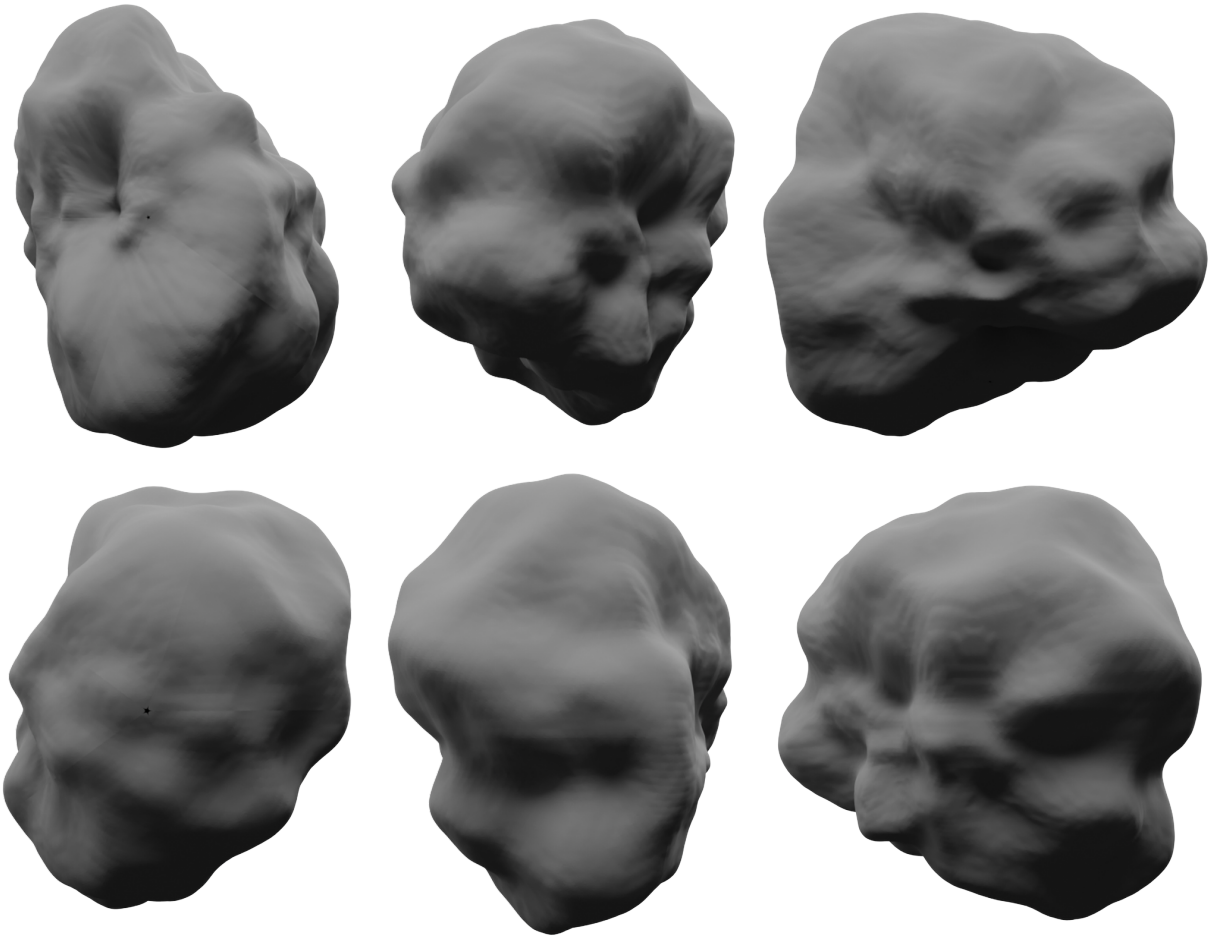
Procedūrinio modeliavimo metu buvo sugeneruoti keli skirtingi bazinės geometrijos asteroidų modeliai (žr. 4 pav.). Po atliktos vizualinės analizės pirmojo etapo fotogrametrijos eksperimentams

buvo atrinktas vienas optimalus modelis (žr. 5 pav.).

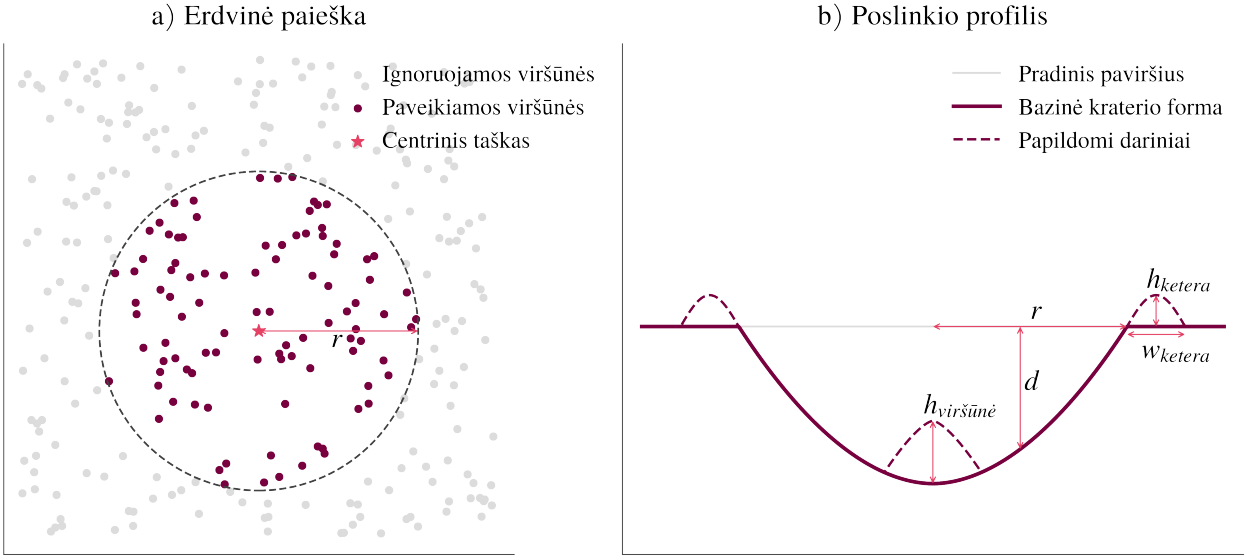


4 pav. Bazinės formos procedūriškai sugeneruotų asteroidų modelių pavyzdžiai gauti pritaikant tik Perlino triukšmą ant pradinio ikosferos modelio. Ši formų gausa iliustruoja procedūrinio generavimo atsitiktinumą ir leido atrinkti optimaliausią modelį pirmojo etapo bazinės fotogrametrijos eksperimentams.

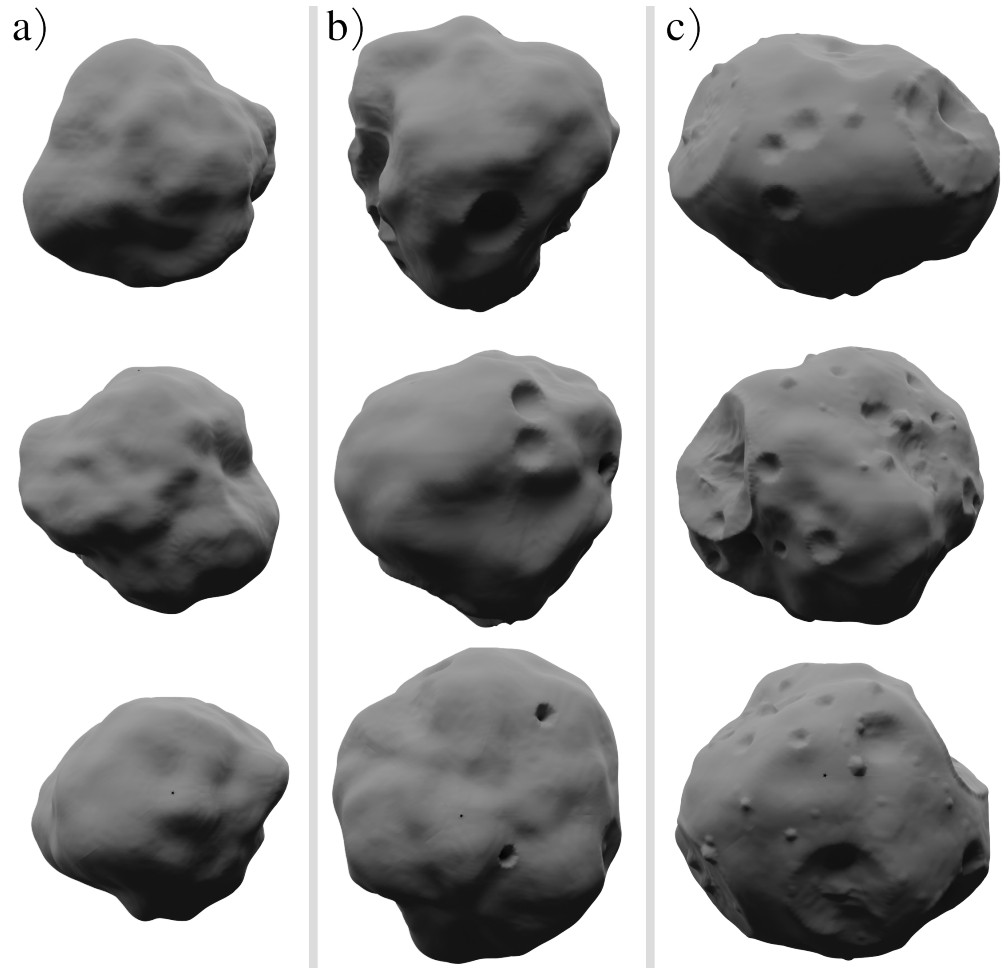
Siekiant padidinti modelio paviršiaus kompleksiškumą ir sukurti specifinius vizualinius orientyrus algoritmams, bazinė geometrija buvo papildyta geologiniais dariniais, tokiais kaip krateriai ir paviršiaus uolienos. Šių elementų integracijai naudota KDTree erdvinė duomenų struktūra, leidžianti efektyviai ieškoti artimiausių viršūnių nurodytu spinduliu r (žr. 6 pav., a). Krateriai buvo imituojami atsitiktiniuose paviršiaus taškuose, paslenkant viršūnes modelio vidaus link išilgai normalės vektorių, sukuriant bazinę įdubą su gyliu d (žr. 6 pav., b). Poslinkio dydis skaičiuotas taikant atstumu pagrįstą mažėjimo funkciją (angl. *falloff*), sukuriančią įgaubtą formą. Šis matematinis profilis kartu suformavo papildomus geologinius elementus, apimančius centrinę viršūnę, kurios aukštis $h_{\text{viršūnė}}$, ir išorinę keterą, aprašomą aukščio h_{ketera} bei pločio w_{ketera} parametrais. Kraterių dydžių skirstinys orientuotas į mažesnių darinių dominavimą. Uolienos generuotos analogišku principu, viršūnes paslenkant į išorę ir pritaikant geometrinį apribojimą, neleidžiantį uolienoms susiformuoti ant pernelyg stačių šlaitų. Ši paviršiaus heterogenizacija yra svarbi SfM algoritmams, nes sukuria unikalius lokalios geometrijos gradientus ir užtikrina stabilią atraminių taškų aptikimą (žr. 7 pav.).



5 pav. Atrinktas bazinis asteroido modelis, pavaizduotas iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Šis objektas buvo naudotas pirmojo etapo sintetinių vaizdų rinkiniams generuoti.



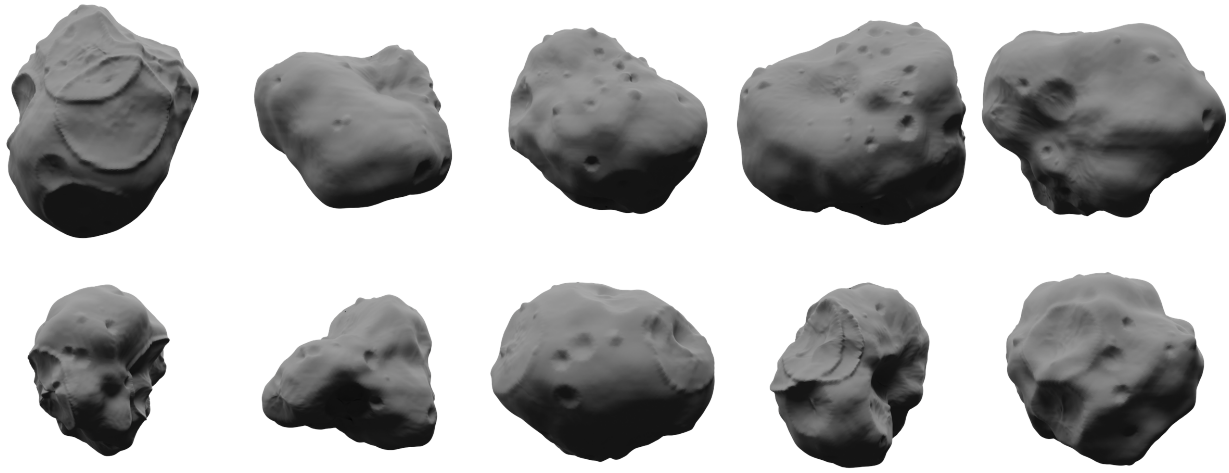
6 pav. Procedūrinio kraterio generavimo schema. Paveikslo a dalyje pavaizduota erdvinė viršūnių paieška spinduliu r aplink atsitiktinį centrinį tašką. Paveikslo b dalyje pateiktas poslinkio profilis išilgai normalės vektoriaus. Modelis apibrėžia bazinę įdubą, kurios gylis yra d, bei papildomus geologinius darinius apimančius centrinę viršūnę ($h_{\text{viršūnė}}$) ir išorinę keterą (h_{ketera}, w_{ketera}).



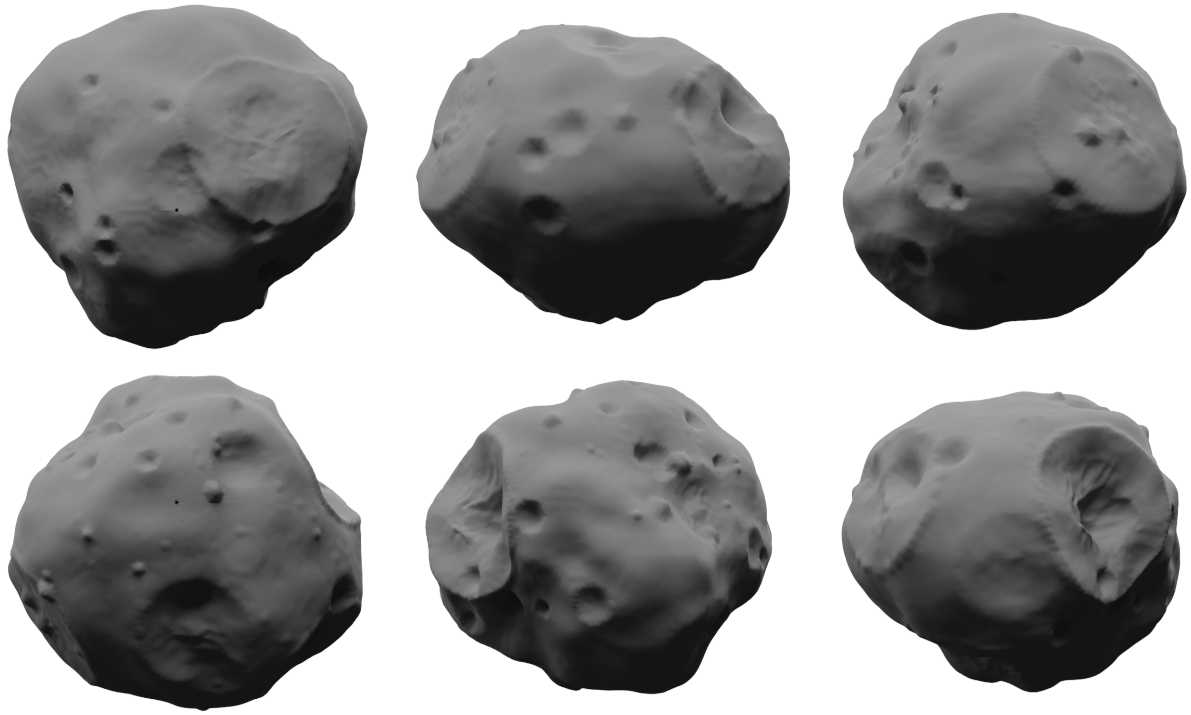
7 pav. Procedūrinio asteroido modelio generavimo etapai skirtingais apžvalgos kampais. a stulpelyje pavaizduota bazinė forma sukurta naudojant Perlino triukšmą. b stulpelyje matomas modelis su sugeneruotais krateriais. c stulpelyje pateiktas galutinis modelis su papildomomis paviršiaus uolienomis.

Galutiniame geometrijos paruošimo etape pritaikytas paviršiaus padalijimo (angl. *surface subdivision*) modifikatorius. Tai padidino tinklelio taškų tankį ir sušvelnino bazinio tinklo kampuotumą, užtikrinant detalią ir vizualiai tolygią topografiją, paruoštą tolimesniems atvaizdavimo etapams.

Buvo sugeneruoti skirtingi modeliai apjungiantys procedūrinį triukšmą su detaliais geologiniais dariniais, apimančiais kraterius ir uolienas (žr. 8 pav.). Po vizualinės analizės, vienas modelis buvo atrinktas antrojo etapo vaizdų generavimui (žr. 9 pav.).



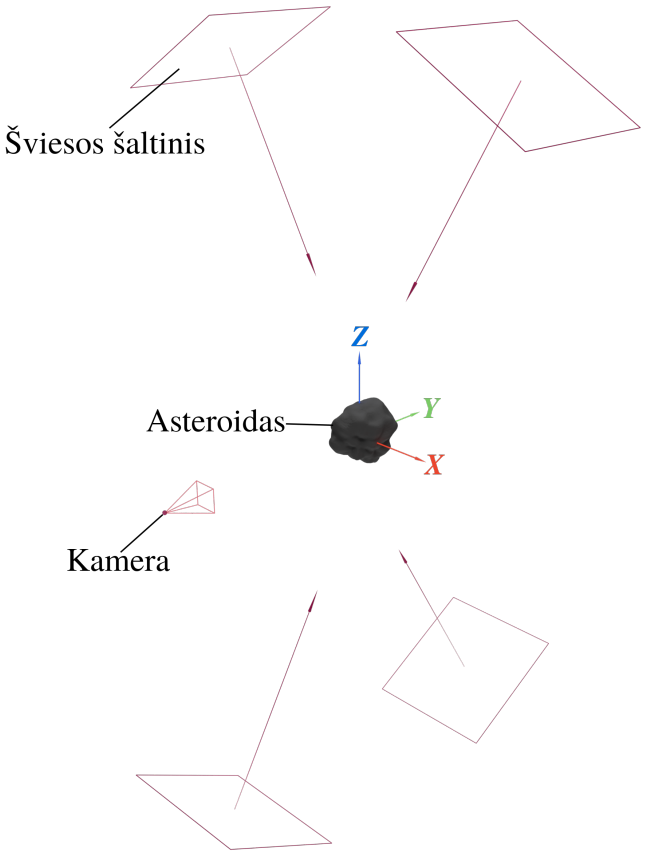
8 pav. Detalių asteroidų modelių pavyzdžiai gauti derinant Perlino triukšmą ir geologinius darinius. Sugeneruotų modelių įvairovė atspindi procedūrinio proceso atsitiktinumą ir leido atrinkti realistiškiausią variantą antrojo etapo fotogrametrijos eksperimentams.



9 pav. Atrinktas detalus asteroido modelis, pavaizduotas iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Šis objektas naudotas antrojo etapo sintetinių vaizdų rinkiniams generuoti su imituotomis kosmoso stebėjimo sąlygomis.

2.2 Bazinės fotogrametrijos analizė

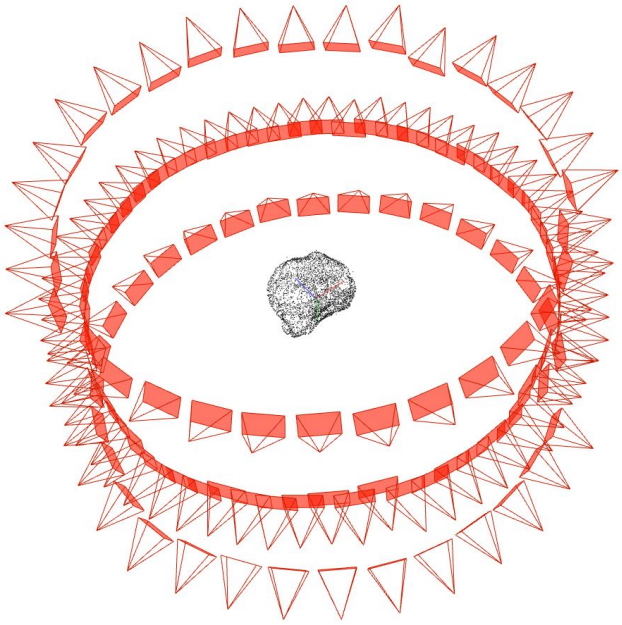
Šiame etape buvo siekiama nustatyti optimalią SfM bei MVS algoritmuose naudojamų vaizdų rinkinių parametrų erdvę idealiomis sąlygomis. Šiam tikslui pasiekti naudotas bazinis procedūrinis asteroido modelis be smulkių paviršiaus detalių, taip izoliuojant algoritmų gebėjimą atkurti bendrą geometriją. Keturi aplink modelį tolygiai paskirstyti šviesos šaltiniai užtikrino vienodą objekto matomumą iš visų kampų ir visiškai eliminavo šešėlių įtaką (žr. 10 pav.).



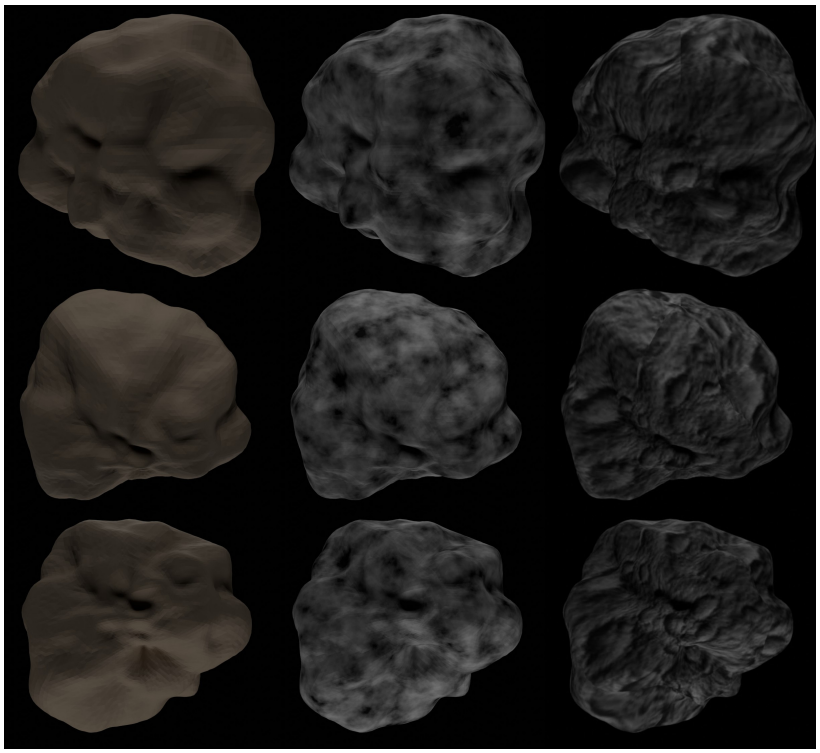
10 pav. Bazinio sintetinio eksperimento erdvės konfigūracijos schema. Tiriamas asteroido modelis patalpintas koordinačių sistemos centre. Scenoje išdėstyti keturi tolygiai paskirstyti šviesos šaltiniai užtikrinantys pilną objekto apšvietimą. Stebėjimams naudojama kamera judanti orbita aplink modelį.

Stebėjimo geometrija buvo suprojektuota taip, kad garantuotų pilną objekto aprėptį. Vaizdai buvo generuojami imituojant kamerą, skriejančią aplink asteroidą pilnu 360 laipsnių kampu trijose skirtingose orbitose. Buvo pasirinkta horizontali pusiaujo orbita bei dvi papildomos orbitos iš viršaus ir apačios, atitinkamai teigiamu ir neigiamu 30 laipsnių kampu (žr. 11 pav.). Tokia konfigūracija užtikrino visapusišką polinių ir ekvatorinių regionų persidengimą, eliminuodama nepakankamos bazinės linijos ar nematytų plotų riziką rekonstrukcijos metu.

Eksperimento metu buvo sistemingai keičiami vaizdų generavimo parametrai, siekiant nustatyti fotogrametrijos algoritmų jautrumą skirtingoms vizualinėms savybėms. Modeliui pritaikytos trys skirtingos tekstūros (žr. 12 pav.). Paprasta ruda tekstūra naudota kaip bazinis kontrolinis atvejis, siekiant įvertinti algoritmų ribas esant minimaliam vizualinių orientyrų kiekiui. Triukšminga pilka tekstūra sukurta generuoti idealius aukšto kontrasto taškus, užtikrinančius optimalų savybių aptikimą ir sekimą. Fotorealistinė tekstūra parinkta siekiant imituoti natūralų asteroido paviršiaus atspindį.



11 pav. Bazinio sintetinio modelio struktūros iš judesio (SfM) algoritmo apskaičiuotos kamerų pozicijos ir orientacijos. Vizualizacijos centre pavaizduotas rekonstruotas pradinis taškų debesis, apsuptas kamerų erdvinių padėčių bei jų žiūrėjimo krypčių (raudonos piramidės). Ši ideali kamerų išdėstymo trajektorija atspindi optimalias sintetinio eksperimento sąlygas.



12 pav. Bazinio sintetinio modelio rekonstrukcijai naudotų sugeneruotų vaizdų pavyzdžiai. Stulpeliuose modelis pavaizduotas iš trijų skirtingų apžvalgos kampų, o eilutėse taikomos skirtingos paviršiaus tekstūros, skirtos algoritmų tikslumui testuoti. Iš kairės į dešinę: vienspalvė ruda, triukšminga pilka ir detali fotorealistinė tekstūra. Šie virtualios aplinkos kadrai naudoti kaip įvesties duomenys.

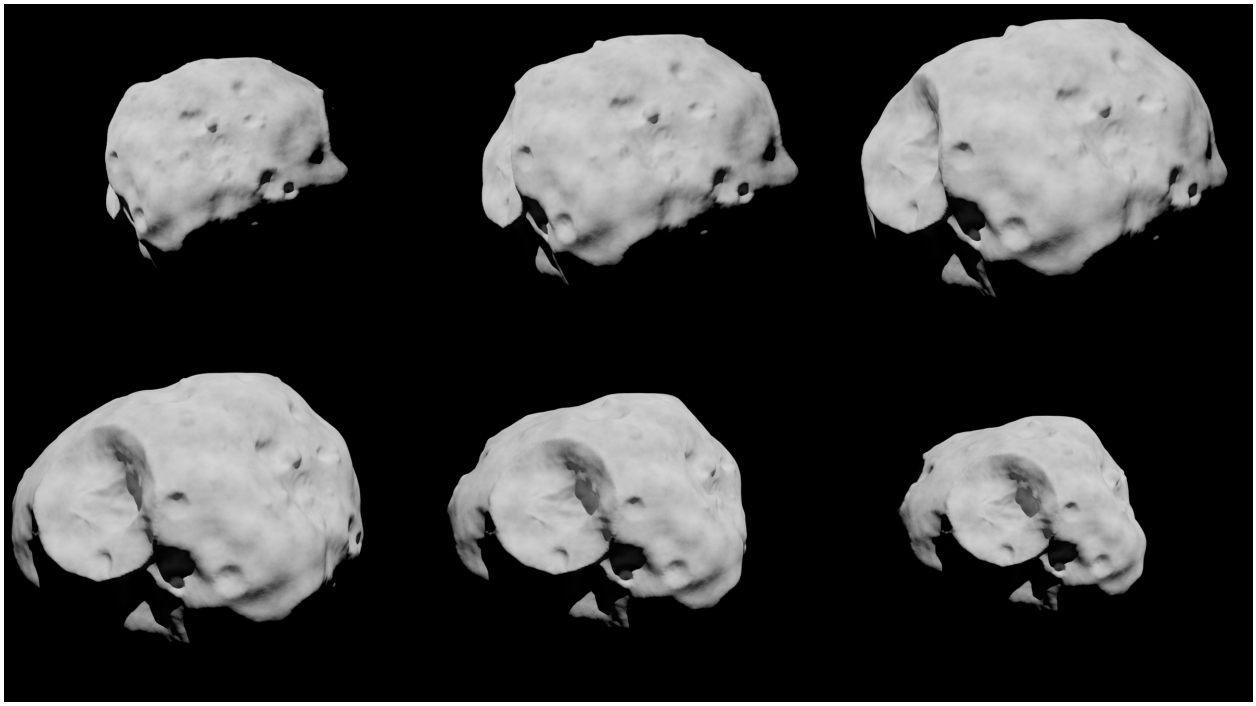
Kameros ir atvaizdavimo parametrai taip pat buvo varijuojami. Vaizdų rinkiniai buvo sudaryti iš

64, 128 ir 256 nuotraukų, testuojant skirtingus stebėjimo tankius. Vaizdų kokybė tirta keičiant raišką nuo 70 % (1344x756 pikseliai) iki 100 % (1920x1080 pikseliai) bazinės raiškos bei varijuojant imčių kiekį tarp 64 ir 128. 100 % raiška atitinka apie 2,92 m viename pikselyje erdvinę skiriamąją gebą modelio paviršiuje. Šios variacijos leido visapusiškai įvertinti, kaip skaitmeninis triukšmas ir pikselių tankis veikia programinės įrangos gebėjimą tiksliai atkurti 3D objektą.

2.3 Rekonstrukcija imituojant kosmines sąlygas

Tolesnė fotogrametrinės sistemos validacija atlikta simuliuojant kosmoso stebėjimų apribojimus, kurie paprastai sukelia reikšmingų iššūkių SfM algoritmams. Eksperimentams naudotas detalesnis procedūrinis asteroido modelis, papildytas krateriais ir uolienomis. Toks modelis leidžia įvertinti, kaip atskiri fotogrametriniai iššūkiai veikia smulkių paviršiaus detalių atkūrimo tikslumą.

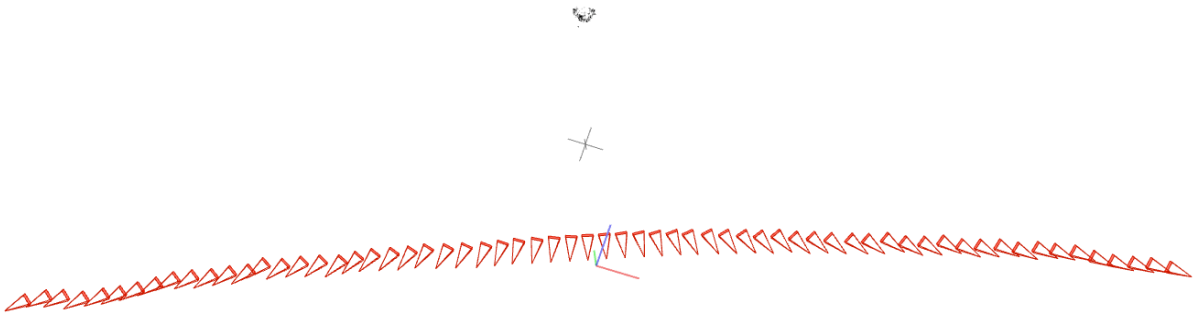
Radiometrinė stebėjimų aplinka buvo modifikuota pereinant prie vieno šviesos šaltinio, imituojančio Saulės spinduliuotę. Šis apšvietimo modelis apšviečia tik vieną asteroido pusę ir sukuria ekstremalius ryškumo gradientus su aštriais šešėliais, taip testuojant algoritmų atsparumą vizualinės informacijos praradimui tamsiose zonose (žr. 13 pav.).



13 pav. Imituotų kosmoso sąlygų rekonstrukcijai naudotų sugeneruotų vaizdų pavyzdžiai. Paveiksle pateikta kadrų seka, atspindinti erdvėlaivio praskriejimo trajektoriją ir besikeičiantį stebėjimo kampą. Vizualizacija demonstruoja simuliuotą aplinką su vienu tolimu šviesos šaltiniu, kuriančiu aštrius, didelio kontrasto šešėlius. Šie virtualios aplinkos kadrai naudoti kaip įvesties duomenys, vertinant fotogrametrijos algoritmų veikimą sudėtingomis stebėjimo sąlygomis.

Kinematinės sąlygos apribotos atsisakant idealios orbitinės trajektorijos. Šį kartą buvo simuliuojamas linijinis erdvėlaivio praskridimas pro statinį asteroidą (žr. 14 pav.). Ši trajektorija sąlygoja siaurą apžvalgos kampą ir leidžia užfiksuoti tik dalį asteroido paviršiaus. Papildomai, siekiant užfiksuoti didesnį modelio paviršiaus plotą, išbandytas alternatyvus scenarijus, kai praskridimo

metu asteroidas sukosi apie savo ašį. Tai leido aprėpti daugiau paviršiaus, tačiau įvedė papildomą judančių šešėlių trikdį savybių sekimo algoritmams.



14 pav. Imituotų kosmoso sąlygų eksperimento struktūros iš judesio (SfM) algoritmo apskaičiuotos kamerų pozicijos ir orientacijos. Vizualizacijos viršutinėje dalyje matomas rekonstruotas pradinis taškų debesis, o kamerų pozicijos (raudonos piramidės) išdėstytos linija ir nukreiptos į asteroidą. Atkurta praskridimo trajektorija atspindi apribotą paviršiaus matomumą tik iš vienos objekto pusės.

Norint įvertinti algoritmų našumą esant šiems apribojimams, buvo sistemingai varijuojami skirtingi vaizdų sekų parametrai. Vaizdų tankis tirtas generuojant 16, 32, 64 ir 128 kadrų sekas, analizuojant kadrų persidengimo lygio įtaką rekonstrukcijai tiesinės trajektorijos metu. Taip pat buvo testuojama standartinė ir padidinta vaizdų raiška, atitinkamai 100 % (1920x1080 pikseliai) ir 200 % (3840x2160 pikseliai). Standartinė 100 % raiška erdvėlaivio artimiausio praskriejimo taške atitiko apie 7,94 metro viename pikselyje erdvinę skiriamąją gebą. Šis parametro keitimas padėjo nustatyti, ar didesnis pikselių tankis pagerina savybių atpažinimą ir bendrą rekonstrukcijos kokybę esant neoptimaliam apšvietimui ir stebėjimo geometrijai.

2.4 3D rekonstrukcija

Sugeneruoti 2D vaizdų rinkiniai buvo panaudoti 3D asteroido modelio atkūrimui pasitelkiant COLMAP programinės įrangos automatinės rekonstrukcijos funkciją. Visas procesas buvo automatizuotas Python skriptu, kuris kiekvienam vaizdų rinkiniui per komandinę eilutę iškvietė automatinės rekonstrukcijos komandą. Ši darbo eiga eliminavo rankinio įsikišimo poreikį ir užtikrino nuoseklų visų eksperimentinių vaizdų rinkinių apdorojimą, taip sudarant sąlygas sistemingam rezultatų vertinimui.

Buvo naudoti numatytieji automatinės rekonstrukcijos nustatymai, leidžiantys COLMAP algoritmams savarankiškai atlikti visus fotogrametrinius etapus. Šis procesas apėmė vizualinių savybių paiešką, jų derinimą tarp nuotraukų, kameros pozicijų suradimą, retojo 3D taškų debesies apskaičiavimą bei galutinio tankaus taškų debesies generavimą. Taikant šį standartizuotą metodą, vidiniai kameros parametrai buvo automatiškai įvertinami ir optimizuojami pačios programos rekonstrukcijos eigoje.

Šio etapo galutiniai produktai buvo erdvinę geometriją reprezentuojantys tankieji taškų debesys išsaugoti PLY formatu. Šie failai buvo tiesiogiai perduodami į sekantį kiekybinio geometrinio

tikslumo vertinimo etapą.

2.5 Rekonstrukcijos tikslumo vertinimas

Kiekybiniam fotogrametrinių modelių geometrinio tikslumo įvertinimui sukurta ir pritaikyta objektyvi automatizuota palyginimo metodika. Pagrindinis iššūkis atliekant tikslumo analizę kyla dėl duomenų prigimties skirtumų. Programinės įrangos COLMAP sugeneruoti taškų debesys neturi absoliutaus mastelio, jų orientacija koordinačių sistemoje yra atsitiktinė ir jie neišvengiamai turi geometrinio triukšmo. Skirtingai nei šie rezultatai, Blender aplinkoje sugeneruoti etaloniniai modeliai yra idealūs 3D paviršiaus tinkleliai, pasižymintys tiksliais matmenimis ir orientacija.

Visas procesas buvo automatizuotas Python skriptais, o įvairiems duomenų apdorojimo ir analizės etapams buvo pasitelktos Open3D bibliotekos bei CloudCompare programinės įrangos funkcijos. Ši kelių etapų sistema apėmė pirminį taškų debesies išvalymą, duomenų normalizavimą, grubų bei tikslų erdvinį lygiavimą ir galiausiai geometrinių nuokrypių bei statistinių rodiklių skaičiavimą.

2.5.1 Triukšmo šalinimas

Pirmasis palyginimo eigos etapas buvo COLMAP sugeneruoto tankaus taškų debesies išvalymas. Neapdorotas rekonstrukcijos produktas dažnai turi pašalinių taškų ir geometrinių artefaktų. Šis žingsnis yra reikalingas, nes nepašalintos erdvėje sklandančios išskirtys reikšmingai iškraipytų vėlesnius erdvinio lygiavimo ir mastelio normalizavimo etapus. Bet to, triukšmo šalinimas pagerina ir paties modelio paviršiaus kokybę, nes efektyviai eliminuoja klaidingus taškus, susidarančius modelio pakraščiuose bei aplink paviršiaus detales, tokias kaip krateriai ar uolienos, kur dėl krintančių aštrių šešėlių algoritmai dažnai sukuria vizualinius artefaktus.

Siekiant pašalinti šį skaitmeninį triukšmą ir paruošti modelį tiksliam lygiavimui, buvo pritaikytas SOR filtras naudojant CloudCompare programinę įrangą. Vietoje vienkartinio agresyvaus filtro pritaikymo, kuris galėtų potencialiai pašalinti ir teisingai rekonstruotus modelio taškus, buvo pasirinktas konservatyvesnis iteratyvus metodas. Pasirinkti švelnūs filtro parametrai, kiekvieno taško analizei pasitelkiama 7 artimiausių kaimynų aplinka ir nustatytas aukštas 5 standartinių nuokrypių slenkstis. Nors tokie konservatyvūs parametrai apsaugo nuo ženklaus duomenų praradimo, vienkartinis valymas yra nepakankamai efektyvus. Dėl to, siekiant kruopštaus, bet saugaus valymo, procesas buvo kartojamas keletą kartų. Kiekviena iteracija pašalindavo dalį triukšmo taškų, taip pakeisdama bendrą debesies taškų statistinį pasiskirstymą ir leisdama vėlesnėms iteracijoms aptikti bei pašalinti vis subtilesnius artefaktus.

2.5.2 Duomenų normalizavimas

Pašalinus dalį geometrinio triukšmo, sekantis etapas buvo erdvinis duomenų normalizavimas. Standartiniai fotogrametrijos algoritmai atkuria 3D objektus be absoliutaus fizinio mastelio ir priskiria juos atsitiktinei koordinačių sistemai. Siekiant įgalinti objektyvų palyginimą su etaloniniu modeliu, rekonstruotas taškų debesis turėjo būti transformuotas į bendrą atskaitos sistemą. Šis pirminis lygiavimo procesas įgyvendintas naudojant Open3D biblioteką ir susidėjo iš dviejų žingsnių.

Pirma, buvo atliktas modelių centravimas. Kiekvienam modeliui, tiek rekonstruotam, tiek etaloniniam, buvo apskaičiuotas jo geometrinis centras surandant visų taškų erdvinių koordinačių aritmetinį vidurkį. Tuomet gautas centro vektorius buvo atimtas iš kiekvieno atitinkamo modelio taško koordinačių. Ši operacija efektyviai perkėlė visus objektus į bendrą koordinačių sistemos pradžios tašką (0, 0, 0).

Antra, buvo atlikta apytikslė mastelio korekcija. Kadangi fotogrametrinės rekonstrukcijos metu sukurto modelio mastelis yra atsitiktinis, jį reikėjo suderinti su etaloninio modelio masteliu. Tam buvo apskaičiuotas abiejų modelių vidutinis visų taškų atstumas nuo koordinačių sistemos pradžios taško. Padalinus etaloninio modelio vidutinį atstumą iš rekonstruoto debesies vidutinio atstumo, buvo gautas mastelio koeficientas. Šis daugiklis pritaikytas visoms rekonstruoto debesies taškų koordinatėms ir atliko pirminį geometrijos proporcijų sulyginimą. Nors ir apytikslis, šis žingsnis buvo pakankamas, kad paruoštų erdvinius duomenis tolimesniam lygiavimui.

2.5.3 Grubus lygiavimas

Atlikus pirminį duomenų apdorojimą ir normalizavimą, kitas žingsnis buvo grubus lygiavimas. Šio etapo tikslas yra rasti apytikslę rekonstruotų taškų debesies transformaciją, apimančią poziciją, orientaciją ir mastelį, kuri jį apytiksliai sulygiuotų su etaloniniu modeliu. Šis pradinis sulygiavimas yra reikalingas norint išvengti konvergavimo į lokalius minimumus vėlesniuose tikslaus lygiavimo etapuose.

Šiam uždaviniui spręsti buvo pasirinktas požymiais pagrįstas registravimo metodas, derinantis FPFH ir RANSAC algoritmus. Kadangi registravimo procesas yra jautrus parametrų parinkimui, buvo sukurta dviejų lygių iteracinė paieškos strategija, skirta rasti stabiliausią ir realistiškiausią lygiavimo sprendimą.

Kiekvieno išorinio ciklo iteracijoje, pritaikius konkretų vokselio dydį (angl. *voxel size*), abu taškų debesys yra pirmiausia diskretizuojami (angl. *downsampled*). Šis žingsnis sumažina taškų kiekį, todėl vėlesni skaičiavimams imlūs požymių išgavimo etapai yra atliekami ženkliai greičiau, neprarandant grubiam lygiavimui būtinų geometrinių savybių. Vidinio ciklo metu, jau diskretizuotiems taškų debesims, RANSAC algoritmas yra vykdomas daug kartų. Toks kartotinis vykdymas yra būtinas, nes RANSAC yra stochastinis metodas ir daugkartiniai bandymai ženkliai padidina tikimybę rasti globaliai optimalų sprendinį. Kiekvieno bandymo metu gautas rezultatas yra patikrinamas, atmetant transformacijas, kurios yra matematiškai išsigimusios arba kurių apskaičiuotas mastelio koeficientas neatitinka iš anksto apibrėžtų fiziškai logiškų ribų. Iš visų sėkmingų bandymų, atliktų tuo pačiu vokselio dydžiu, atrenkamas vienas geriausias, remiantis kokybės rodikliu, kuris įvertina rastų atitikmenų skaičių ir jų vidutinį kvadratinį nuokrypį (angl. *Root Mean Square Error*, RMSE).

Išoriniame cikle visas vidinio ciklo procesas yra kartojamas visam diapazonui skirtingų vokselių dydžių. Šis dydis lemia detalumo lygį, kuriuo algoritmas analizuoja geometriją. Mažesni dydžiai leidžia atpažinti smulkias detales, tačiau yra jautresni triukšmui, tuo tarpu didesni dydžiai geriau apibendrina bendrą objekto formą.

Galiausiai, norint objektyviai atrinkti geriausią lygiavimą iš rezultatų, gautų su skirtingais vokse-

lių dydžiais, buvo taikomas dviejų žingsnių atrankos procesas. Pirma, buvo sudaryta kandidatų grupė, į kurią pateko tik tie lygiavimai, kurių suderinamumo (angl. *fitness*) rodiklis viršijo nustatytą minimalią ribą. Šis žingsnis užtikrino, kad į tolimesnę atranką patektų tik transformacijos, pasižyminčios pakankamu debesų persidengimu. Antra, iš šios kandidatų grupės buvo išrinktas rezultatas su mažiausia normalizuota RMSE. Normalizavimas, atliekamas padalijant RMSE iš atitinkamo vokselio dydžio, yra būtinas norint objektyviai palyginti skirtingo mastelio lygiavimus. Toks metodas užtikrino, kad galutinė transformacija pasižymėtų ne tik dideliu persidengimu, bet ir mažiausia santykine paklaida.

Visos šios paieškos rezultatas yra viena, optimali transformacijos matrica. Ši matrica pritaikoma pilno tankio rekonstruotam taškų debesiui ir taip gaunamas grubiai sulygiuotas modelis, kuris yra paruoštas tolimesniam tikslaus lygiavimo etapui.

2.5.4 Tikslus lygiavimas

Toliau atliekamas tikslus lygiavimas. Jam pasitelkiama ICP algoritmo realizacija esanti CloudCompare programinėje įrangoje. Šis algoritmas reikalingas norint galutinai panaikinti likusius erdvinius nuoktrypius, kurie lieka po grubaus lygiavimo etapo dėl taškų debesų diskretizavimo.

Šiame darbe iteracijos buvo stabdomos pasiekus nustatytą konvergavimo kriterijų, kai RMSE reikšmės skirtumas tarp dviejų paeiliui einančių ciklų tampa mažesnis nei 10^{-7}, kas duoda tikslų ir stabilų rezultatą. Taip pat, algoritmas buvo sukonfigūruotas atsižvelgiant į 95 % numanomą debesų persidengimą, kas padeda optimizuoti patikimų atitikmenų paiešką. Šio etapo rezultatas yra rekonstruotas taškų debesis, kurio erdvinė padėtis, orientacija ir mastelis yra optimaliai suderinti su etaloniniu modeliu. Tokiu būdu modelis yra galutinai paruoštas kiekybiniam palyginimui.

2.5.5 Kiekybinis palyginimas

Galiausiai yra atliekamas kiekybinis rekonstrukcijos tikslumo įvertinimas. Atlikus tikslų lygiavimą, atstumai tarp rekonstruoto taškų debesies ir etaloninio modelio tiesiogiai reprezentuoja geometrinius atkūrimo netikslumus. Šiam tikslui pasiekti naudojami du pagrindiniai metodai, C2C bei C2M. Lyginant fotogrametrijos būdu gautas nepilnas topologines struktūras su etaloniniais paviršiais, atstumo skaičiavimas tampa nekomutatyvia operacija. Erdvinių nuokrypių matavimo kryptis ir atskaitos sistemos pasirinkimas tiesiogiai nulemia vertinamą geometrinę savybę. Abu algoritmai buvo realizuoti naudojant CloudCompare programinę įrangą.

Standartinis tiesioginis palyginimas atliekamas matuojant atstumą nuo kiekvieno atkurto taškų debesies elemento iki artimiausio etaloninio modelio paviršiaus. Ši analizės kryptis matematiškai apibrėžia rekonstrukcijos geometrinį tikslumą ir įvertina susidariusį erdvinį triukšmą. Metodas griežtai registruoja klaidingai sugeneruotus taškus bei vizualinius artefaktus, todėl jie tiesiogiai padidina vidutinę skaičiavimų paklaidą. Nepaisant šio jautrumo triukšmui, tiesioginis vertinimas turi reikšmingą apribojimą. Skaičiavimo algoritmas yra matematiškai aklas erdvinėms tuštumoms ir visiškai neatkurtoms paviršiaus sritims. Jei dėl algoritmų ribotumo modelyje susidaro ertmė, trūkstami taškai neprisideda prie bendro nuokrypio augimo. Dėl šios priežasties labai reti modeliai

gali demonstruoti dirbtinai aukštą tikslumą vien todėl, kad sudėtingiausios ir daugiausiai klaidų generuojančios paviršiaus dalys paprasčiausiai nebuvo atkurtos.

Siekiant visapusiškai įvertinti topologinį pilnumą bei bazinės globalios geometrijos tikslumą, pritaikytas atvirkštinis palyginimo metodas. Šio proceso metu skaičiuojamas atstumas nuo absoliutaus etaloninio modelio paviršiaus iki artimiausio rekonstruoto taškų debesies elemento. Toks palyginimas veikia kaip paviršiaus padengimo (angl. *surface coverage*) bei globalios bazinės geometrijos tikslumo matas. Inicijuojant atstumo paiešką nuo etalono, algoritmas aktyviai fiksuoja ir griežtai vertina neatkurtas erdvines sritis. Tai leidžia tiksliai išmatuoti faktinį paviršiaus padengimą. Tuo pačiu metu šis metodas natūraliai filtruoja lokalizuotą geometrinį triukšmą. Kadangi etaloniniai paviršiaus taškai yra susiejami tik su artimiausiais rekonstruotais elementais, algoritmas izoliuoja ir įvertina bazinės formos tikslumą nepriklausomai nuo klaidingai sugeneruotų aplinkinių artefaktų. Kadangi atvirkštinio metodo taikymui C2M algoritmas nėra tinkamas, etaloniniai paviršiaus tinkleliai buvo diskretizuoti sugeneruojant tankius taškų debesis su 500 000 atsitiktinių paviršiaus taškų ir palyginimui naudotas C2C metodas. Siekiant objektyviai apibrėžti ribą tarp sėkmingai atkurto paviršiaus ir erdvinės tuštumos, buvo nustatytas dinaminis atstumo slenkstis. Kiekvienam eksperimentui šis slenkstis buvo skaičiuojamas atskirai, remiantis statistiškai tiksliausio, mažiausią triukšmą turinčio modelio duomenimis, apskaičiuojant šio modelio absoliučių nuokrypių 97-ąjį procentilį. Šis duomenimis pagrįstas atskaitos taškas leido objektyviai ir nuosekliai fiksuoti paviršiaus tuštumas visame konkretaus eksperimento rezultatų masyve.

Iš gautų verčių buvo apskaičiuoti statistiniai rodikliai, skirti apibendrinti rekonstrukcijos bendrą tikslumą bei paviršiaus padengimą. Analizei buvo pasirinktos kelios pagrindinės metrikos:

- Vidutinis nuokrypis – Aritmetinis visų apskaičiuotų atstumų vidurkis. Suteikia bendrą supratimą apie rekonstrukcijos paklaidą, tačiau yra jautrus pavieniams dideliems nuokrypiams.
- Medianinis nuokrypis – Centrinė visų atstumų reikšmė. Ši metrika yra atsparesnė dideliems nuokrypiams ir geriau atspindi tipinę paklaidą, būdingą daugumai modelio taškų.
- Standartinis nuokrypis – Rodiklis, nusakantis atstumų verčių sklaidą aplink vidurkį. Maža reikšmė rodo, kad rekonstrukcijos tikslumas yra vienodas visame modelyje, didelė reikšmė, kad egzistuoja sritys su ženkliai skirtingu tikslumu.
- Didžiausias nuokrypis – Maksimali rasta atstumo reikšmė. Identifikuoja didžiausią pavienę paklaidą ir problemines rekonstrukcijos vietas.
- Pilnumas - Etaloninio modelio paviršiaus dalis, kuri patenka į nustatytą leistino geometrinio nuokrypio ribą. Leidžia objektyviai įvertinti algoritmų gebėjimą atkurti visą objekto topologiją.

Šie statistiniai rodikliai sudaro pagrindą visapusiškam fotogrametrinio atkūrimo kokybės vertinimui skirtingų eksperimentų metu.

2.6 Sintetinės rekonstrukcijos rezultatai ir diskusija

2.6.1 Fotogrametrijos taikymas idealiomis sąlygomis

Modelio ir stebėjimų parametrai

Pirmajame eksperimentų etape analizuojamas pasirinktas bazinis asteroido modelis, kurio skaitmeninės charakteristikos apibrėžia pradinę tyrimo būseną. Sintetinio asteroido matmenys siekė 1,79 km × 2,29 km × 2,3 km išilgai pagrindinių ašių. Tinklelis turėjo 10 000 viršūnių, užtikrinant pakankamą paviršiaus detalumą baziniams algoritmų testavimams. Šie pradiniai parametrai yra išlaikomi kaip etaloninis pagrindas, su kuriuo vėliau lyginami fotogrametrinės rekonstrukcijos metu gauti rezultatai.

Pritaikant metodologijoje aprašytas idealizuotas stebėjimo sąlygas, buvo sugeneruota 17 skirtingų vaizdų rinkinių (žr. 1 lentelę). Šie rinkiniai sudarė pagrindą tolesniam SfM ir MVS algoritmų vertinimui.

1 lentelė. Bazinio sintetinio modelio sugeneruotų vaizdų rinkinių parametrai ir atitinkamai atkurto taškų debesies tankiai. Paryškinta reikšmė žymi tankiausią atkurtą modelį.

Nr.	Tekstūra	Vaizdų kiekis	Raiška (%)	Imčių kiekis	Taškų kiekis
1	Paprasta ruda	64	100	128	800
2		128	100	64	42 000
3		128	100	128	32 000
4		256	70	64	2 000
5		256	70	128	140 000
6	Triukšminga pilka	64	100	64	318 000
7		64	100	128	318 000
8		128	100	64	**449 000**
9		128	100	128	445 000
10		256	70	64	363 000
11		256	70	128	363 000
12	Fotorealistinė	64	90	64	227 000
13		64	90	128	226 000
14		128	90	64	320 000
15		128	90	128	322 000
16		256	70	64	331 000
17		256	70	128	329 000

Vizualinių savybių įtaka

Rezultatai atskleidė tiesioginę rekonstrukcijos sėkmės priklausomybę nuo paviršiaus tekstūros. Modeliai su paprasta ruda tekstūra nepateikė pakankamai vizualinių orientyrų. Algoritmai negalėjo aptikti unikalių elementų ir dėl to kadrų suderinimas buvo netikslus. Sugeneruoti taškų debesys gavosi per reti ir neatitiko pradinės modelio formos. Šį algoritminį nepakankamumą tiesiogiai atspindi ženkliai mažesni galutinių rekonstruotų taškų kiekiai lyginant su kitais vaizdų rinkiniais.

Pritaikius triukšmingą pilką tekstūrą modelio atkūrimas buvo sėkmingas. Ši tekstūra suformavo aiškius aukšto kontrasto taškus, kurie užtikrino stabilų vizualinių savybių aptikimą bei suderinimą.

Gautas taškų debesis išlaikė tikslią makroskopinę morfologiją ir pasižymėjo dideliu paviršiaus tankiu. Fotorealistinės tekstūros atveju rekonstrukcija taip pat pavyko, nors sudėtingi raštai vietomis sukūrė geometrines dviprasmybes ir lėmė didesnius lokalius paviršiaus netikslumus.

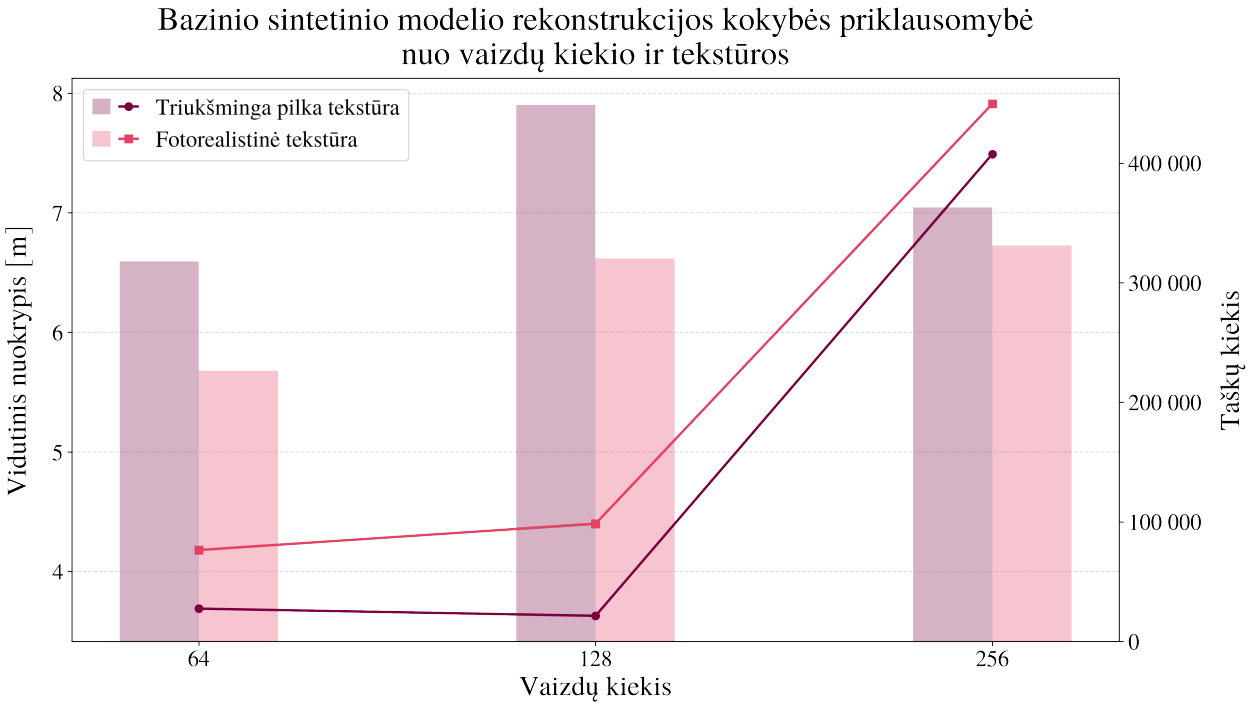
Tekstūros analizės rezultatai patvirtina, kad paviršiai su gausiomis vizualinėmis detalėmis užtikrina geresnį savybių aptikimą ir suderinamumą bei paties fotogrametrinio proceso tikslumą ir stabilumą.

Kiekybinis tikslumo vertinimas

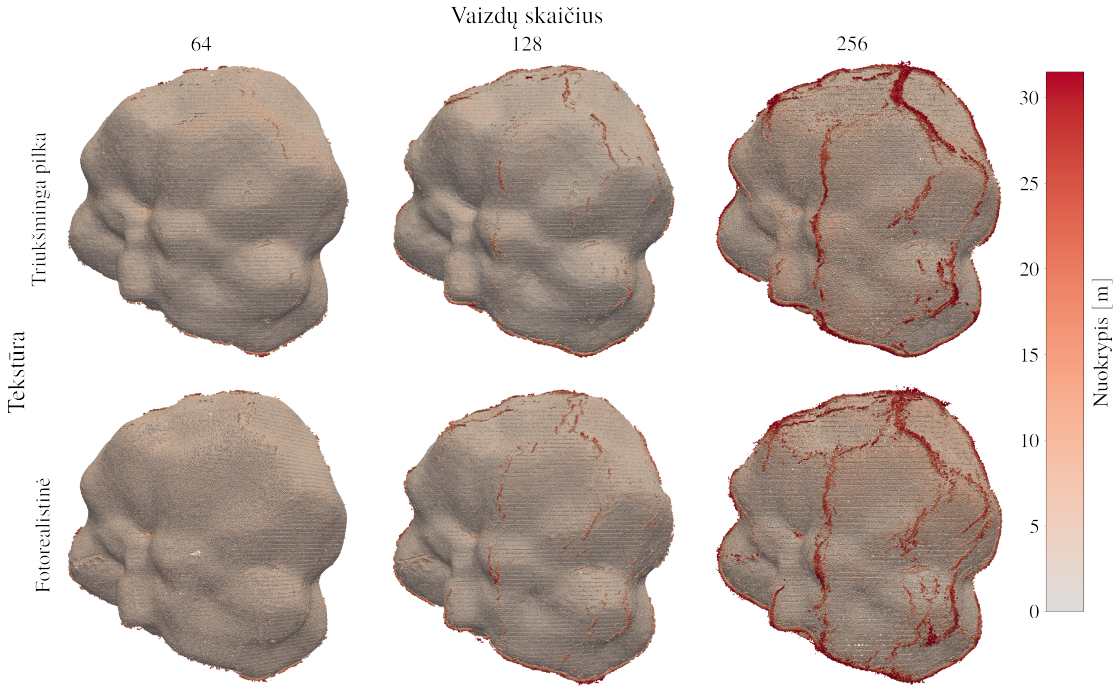
Atliktų rekonstrukcijų geometriniam tikslumui ir susidariusiam erdviniam triukšmui įvertinti pirmiausia buvo pritaikytas tiesioginis atstumo tarp debesų palyginimo metodas. Šis vertinimas leido kiekybiškai apskaičiuoti sėkmingai sugeneruotų 3D modelio taškų nuokrypius nuo pradinio procedūrinio modelio. Dėl prastos kokybės ir mažo taškų tankio paprastos rudos tekstūros rekonstrukcijos nebuvo įtrauktos į šią kiekybinę analizę. Visi pagrindiniai tiesioginio palyginimo statistiniai rezultatai yra susisteminti ir pateikti duomenų lentelėje (žr. 2 lentelę). Atkurto paviršiaus tikslumo priklausomybė nuo vaizdų skaičiaus bei tekstūros pavaizduota grafike (žr. 15 pav.). Erdvinis paklaidų pasiskirstymas papildomai pavaizduotas spalvinėje vizualizacijoje (žr. 16 pav.).

2 lentelė. Bazinio sintetinio modelio C2C rekonstrukcijos geometrinio nuokrypio metrikos. Rinkinių numeriai atitinka 1 lentelėje pateiktas konfigūracijas. Visi matmenys pateikti metrais. Paryškintos reikšmės nurodo geriausius statistinius rezultatus atskirose kategorijose.

Nr.	**Vidurkis** (m)	**Mediana** (m)	**Stand. nuokrypis** (m)	**Didž. nuokrypis** (m)
6	3,7	3,5	1,9	**39**
7	**3,6**	3,3	**1,8**	46
8	3,6	3,1	2,8	45
9	3,6	**3,1**	2,8	48
10	7,5	5,5	6,4	72
11	7,6	5,6	6,3	76
12	4,2	3,9	2,3	42
13	4,2	3,9	2,2	38
14	4,4	3,7	3,4	66
15	4,5	3,7	3,5	74
16	7,9	6,0	6,4	118
17	8,1	6,0	6,7	161



15 pav. Bazinio sintetinio modelio rekonstrukcijos rezultatų priklausomybė nuo vaizdų skaičiaus ir tekstūros taikant C2C lyginimo metodą. Kreivės (kairė ašis) rodo vidutinį nuokrypį metrais, stulpeliai (dešinė ašis) - atkurto taškų debesies tankį. Tamsi spalva žymi triukšmingą pilką, šviesesnė - fotorealistinę tekstūrą. Atrinkti modeliai generuoti 64 imčių kiekiu. Grafike matoma, jog triukšminga pilka tekstūra leidžia sugeneruoti tankesnį paviršių ir pasiekti mažesnį nuokrypį.

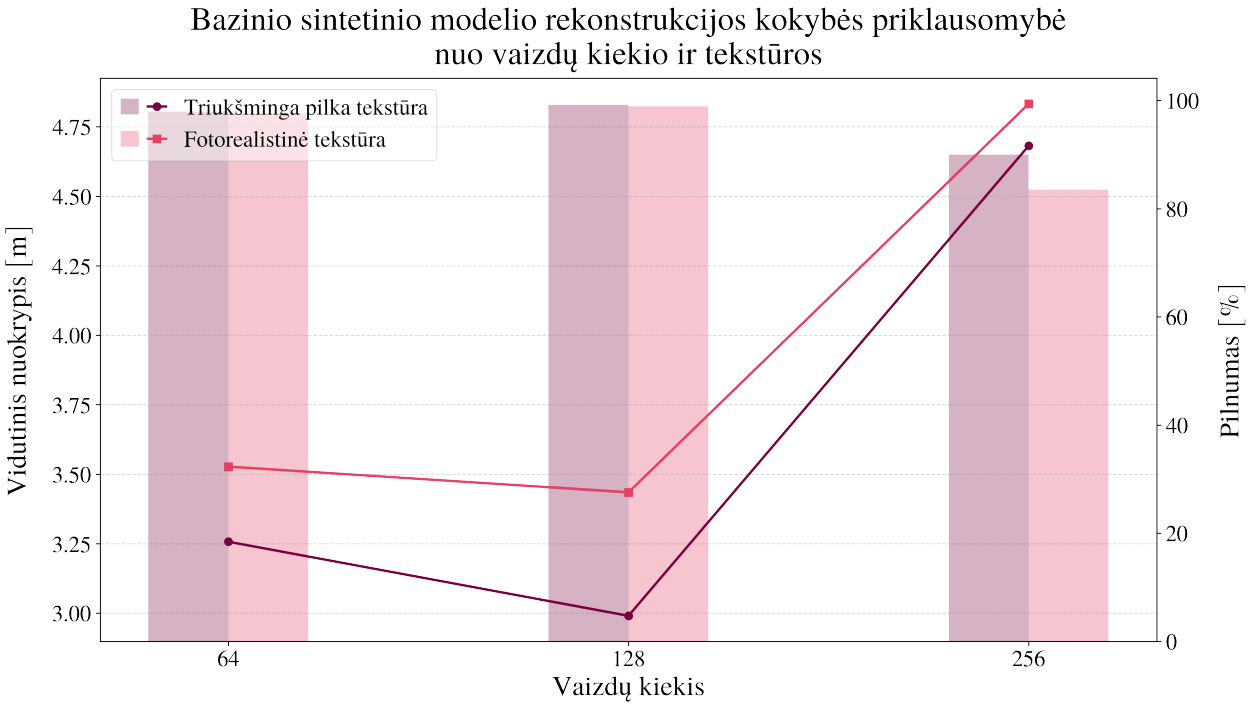


16 pav. Bazinio sintetinio modelio vaizdų generavimo parametrų įtakos erdviniam tikslumui C2C vizualizacija. Modeliai gauti sistemingai varijuojant paviršiaus tekstūrą ir įvesties vaizdų skaičių (fiksuotas 64 imčių kiekis). Spalvinė skalė rodo absoliutųjį nuokrypį metrais, apribotą 99-tuoju procentiliu. Paveiksle stebima tendencija, jog didėjant įvesties vaizdų skaičiui, vizualiai auga ir atkurto paviršiaus erdvinis triukšmas.

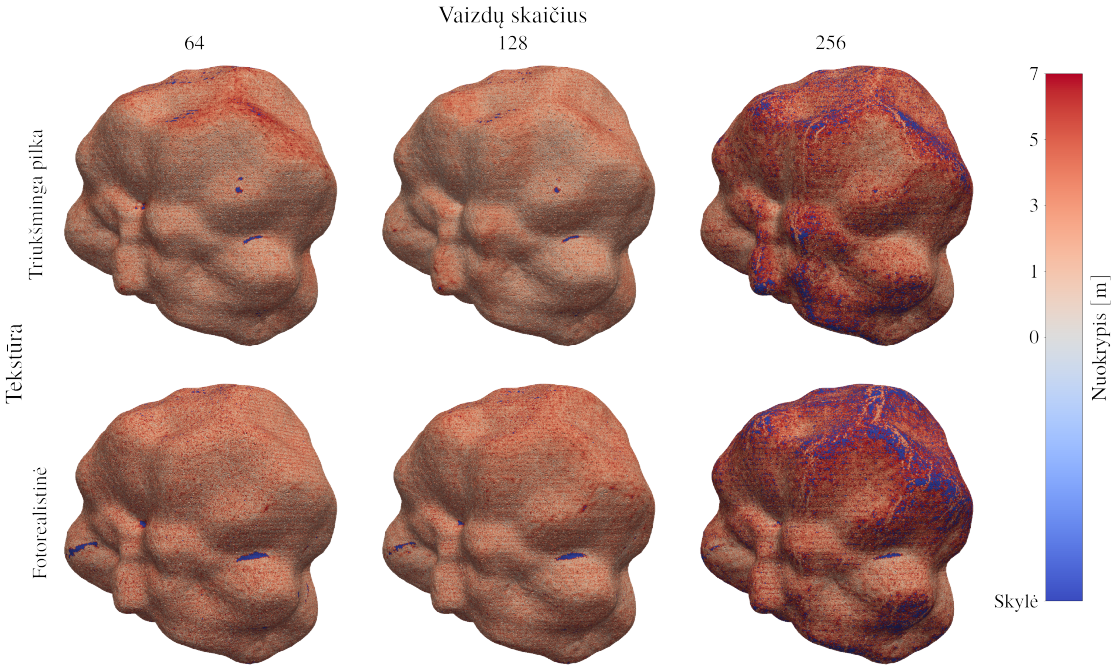
Siekiant įvertinti atkurto paviršiaus padengimą ir bazinės geometrijos tikslumą buvo atliktas antrasis analizės etapas pritaikant atvirkštinį atstumo tarp debesų palyginimo metodą. Šis matavimas aktyviai fiksuoja erdvines tuštumas ir taip leidžia objektyviai įvertinti globalų modelio pilnumą. Visi atvirkštinio palyginimo statistiniai rodikliai yra apibendrinti papildomoje duomenų lentelėje (žr. 3 lentelę). Rekonstrukcijos pilnumo bei tikslumo priklausomybė nuo vaizdų skaičiaus ir naudotos tekstūros pavaizduota grafike (žr. 17 pav.). Paviršiaus spragos bei bazinės geometrijos nuokrypiai parodyti spalvinėje vizualizacijoje (žr. 18 pav.).

3 lentelė. Bazinio sintetinio modelio atvirkštinio C2C geometrinio nuokrypio metrikos. Rinkinių numeriai atitinka 1 lentelėje pateiktas konfigūracijas. Visi matmenys pateikti metrais. Paryškintos reikšmės nurodo geriausius statistinius rezultatus atskirose kategorijose.

Nr.	**Pilnumas** (%)	**Vidurkis** (m)	**Mediana** (m)	**Stand. nuokrypis** (m)
6	97,98	3,3	3,2	1,3
7	98,06	3,1	3,1	1,2
8	99,17	3,0	2,9	**1,2**
9	**99,19**	**3,0**	**2,9**	1,2
10	90,04	4,7	4,8	1,4
11	88,84	4,7	4,8	1,4
12	97,67	3,5	3,5	1,4
13	97,66	3,5	3,5	1,4
14	98,96	3,4	3,4	1,3
15	98,96	3,5	3,4	1,3
16	83,55	4,8	5,0	1,4
17	82,02	4,8	4,9	1,4

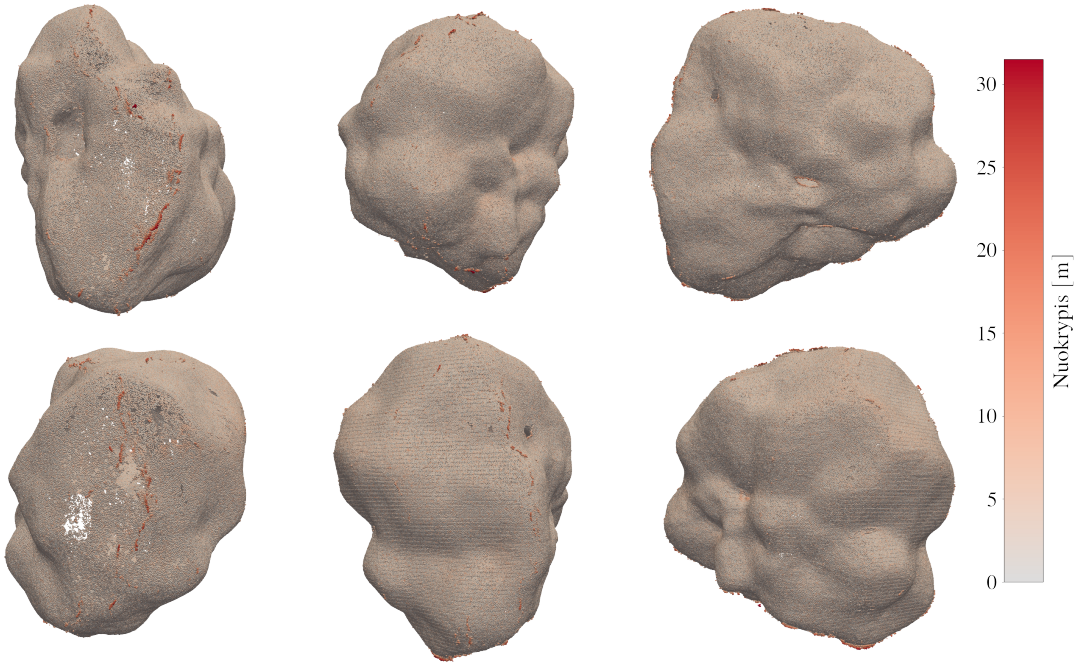


17 pav. Bazinio sintetinio modelio rekonstrukcijos rezultatų priklausomybė nuo vaizdų skaičiaus ir tekstūros taikant C2C lyginimo metodą. Kreivės (kairė ašis) rodo vidutinį nuokrypį metrais, stulpeliai (dešinė ašis) - atkurto taškų debesies pilnumą. Tamsi spalva žymi triukšmingą pilką, šviesesnė - fotorealistinę tekstūrą. Atrinkti modeliai generuoti 64 imčių kiekiu. Grafike matoma, jog triukšminga pilka tekstūra leidžia pasiekti mažesnį nuokrypį.



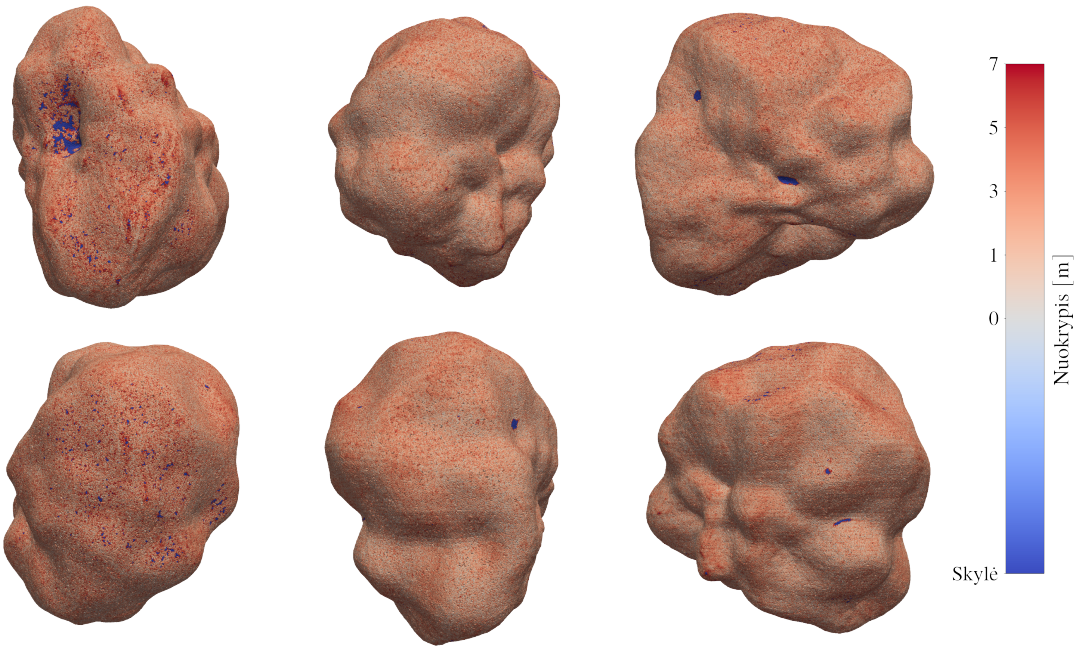
18 pav. Bazinio sintetinio modelio vaizdų generavimo parametrų įtakos paviršiaus padengimui ir bazinės geometrijos tikslumui vizualizacija, taikant atvirkštinį C2C lyginimo metodą. Modeliai gauti varijuojant tekstūrą ir vaizdų skaičių (fiksuotas 64 imčių kiekis). Skalė rodo absoliutųjį nuokrypį metrais, tamsiai mėlyna žymi neatkurtas sritis. Matoma, jog optimalus rezultatas gaunamas su 128 vaizdais, pasiekiant didžiausią padengimą esant mažiausiems nuokrypiams.

Atlikti skaičiavimai atskleidė du išsiskiriančius optimalius rezultatus priklausomai nuo pasirinktos vertinimo metrikos. Tiesioginio palyginimo atveju mažiausias erdvinis nuokrypus pasiektas naudojant triukšmingą pilką tekstūrą su 64 vaizdais 100 % raiška bei 128 imčių kiekiu. Šio modelio vidutinis nuokrypis siekė 3,6 m. Jo erdvinė kokybė yra pavaizduota iš šešių apžvalgos kampų (žr. 19 pav.). Atvirkštinio palyginimo atveju geriausias paviršiaus padengimas bei tiksliausia bazinė geometrija gauta pritaikius tą pačią tekstūrą su padidintu 128 vaizdų kiekiu 100 % raiška bei 64 imtimis. Šio modelio paviršiaus padengimas siekė 99,19 %. Jis taip pat pavaizduotas iš visų ortogonalių pusių (žr. 20 pav.). Šie du skirtingi rezultatai atspindi kraštutines fotogrametrinių algoritmų veikimo ribas. Pirmuoju atveju prioritetas teikiamas absoliučiam pavienių taškų patikimumui, o antruoju atveju siekiama maksimalaus globalios formos užbaigtumo.



19 pav. Bazinio sintetinio modelio erdvinio tikslumo C2C vizualizacija. Pavaizduotas statistiškai tiksliausias modelis (triukšminga pilka tekstūra, 64 vaizdai, 100 % raiška, 128 imtys) iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Spalvinė skalė rodo absoliutųjį nuokrypį metrais, apribotą 99-tuoju procentiliu. Bendras atkurto paviršiaus tikslumas yra aukštas, stebimas minimalus erdvinis triukšmas sudėtingos geometrijos srityse.

Analizuojant vaizdų generavimo parametrų įtaką tikslumui ir efektyvumui buvo nustatytos kelios pagrindinės tendencijos. Triukšminga pilka tekstūra bendru atveju siekė geresnius rezultatus nei fotorealistinė, nes ryškūs vizualiniai orientyrai leido algoritmams stabiliau identifikuoti paviršiaus taškus. Vaizdų atvaizdavimo imčių kiekio variacija neturėjo reikšmingos įtakos galutiniams rekonstrukcijos rezultatams. Aukštesnė nuotraukų raiška padėjo tiksliau atkurti smulkias paviršiaus struktūras, tačiau tai proporcingai ilgino skaičiavimų trukmę. Vertinant įvesties vaizdų skaičių stebima aiški rezultatų divergencija. Didinant kadrų kiekį nuo 64 iki 128 išauga tiesioginis geometrinis triukšmas. Tuo pačiu metu didesnis informacijos kiekis leidžia pasiekti geresnį paviršiaus padengimą ir tikslesnę globalią bazinę geometriją. Pasiekus 256 vaizdų ribą modelio atkūrimo kokybė smarkiai suprastėja. Šį degradavimą sukelia naudota žemesnė vaizdų raiška. Taip pat, minimali ba-



20 pav. Bazinio sintetinio modelio paviršiaus padengimo ir bazinės geometrijos tikslumo vizualizacija, taikant atvirkštinį C2C lyginimo metodą. Pavaizduotas tankiausias atkurtas modelis (triukšminga pilka tekstūra, 128 vaizdai, 100 % raiška, 64 imtys) iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Spalvinė skalė rodo absoliutųjį nuokrypį metrais, apribotą 99-tuoju procentiliu. Šis modelis pasižymi geriausiu paviršiaus padengimu ir tiksliausiai atkurta bazine geometrija.

zinė linija tarp gretimų kadrų nesukuria pakankamo paralakso efekto stabiliai gylio trianguliacijai SfM algoritmų veikimo metu. Tai lemia matematinių klaidų kaupimąsi ir galutinio taškų debesies iškraipymą.

2.6.2 Fotogrametrijos taikymas simuliuotomis kosmoso sąlygomis

Modelio ir stebėjimų parametrai

Antrajame tyrimo etape analizuotas pasirinktas detalusis asteroido modelis. Sintetinio asteroido modelio matmenys siekė 2,7 × 2,55 × 2,27 km. Objekto tinklelis buvo sudarytas iš 980 000 viršūnių, užtikrinant aukštą paviršiaus detalumą tolimesniems tyrimams. Šie baziniai parametrai leidžia objektyviai pamatuoti algoritmų gebėjimą atkurti smulkius geologinius darinius esant vieno šviesos šaltinio apšvietimui ir griežtoms judėjimo trajektorijoms.

Siekiant sistemingai įvertinti rekonstrukcijos tikslumą, buvo sugeneruota 10 pagrindinių vaizdų rinkinių keičiant nuotraukų kiekį ir jų raišką (žr. 4 lentelę). Taip pat paruošti 2 papildomi rinkiniai, kuriuose pritaikytas objekto sukimasis apie savo ašį.

4 lentelė. Imituotų kosmoso sąlygų vaizdų rinkinių konfigūracijos. Linija atskiria įprastus rinkinius nuo imituoto asteroido sukimosi bandymų. Brūkšnys (–) žymi nepavykusias rekonstrukcijas, o paryškinta reikšmė nurodo didžiausią atkurto modelio taškų kiekį.

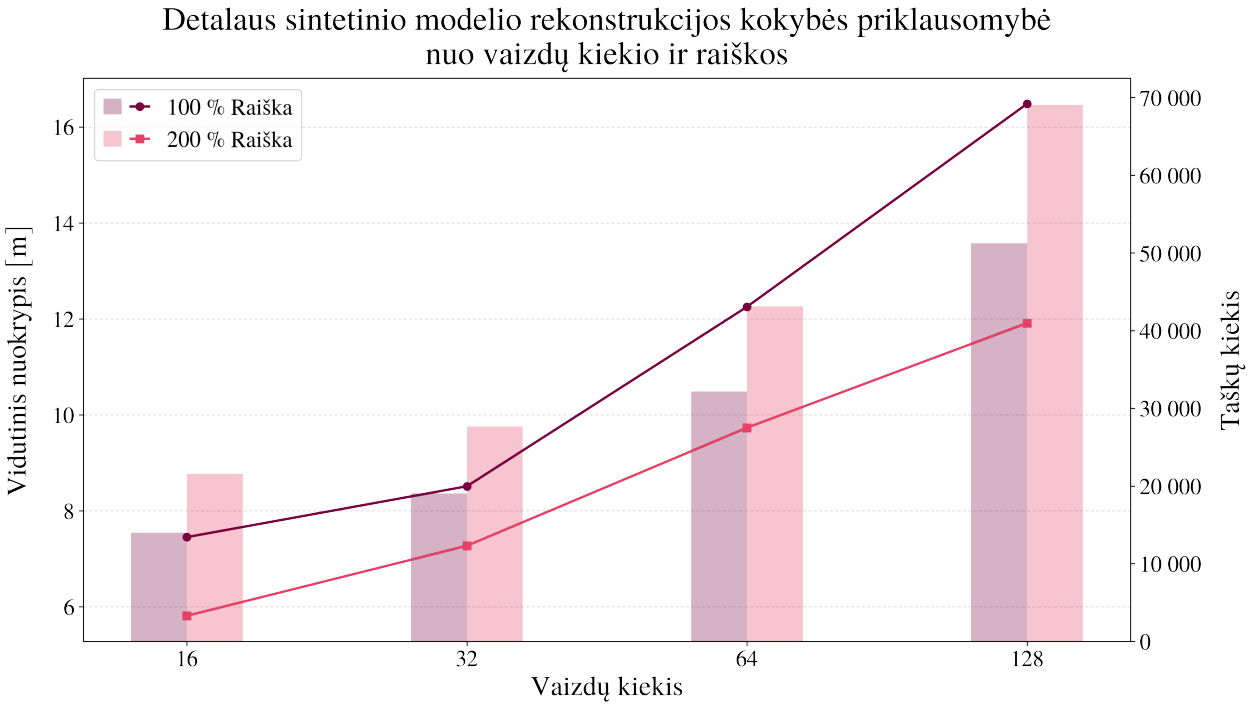
Nr.	**Vaizdų kiekis**	**Raiška** (%)	**Taškų kiekis**
1	16	100	14 000
2	16	200	22 000
3	32	100	19 000
4	32	200	28 000
5	64	100	32 000
6	64	200	43 000
7	128	100	51 000
8	128	200	**69 000**
11	64	100	–
12	128	100	–

Kiekybinis tikslumo vertinimas

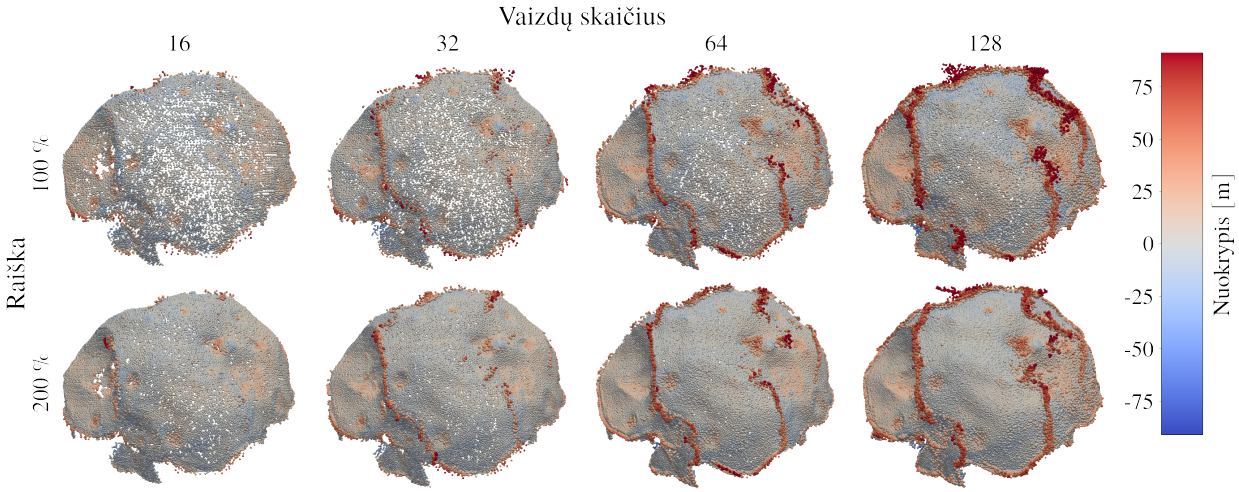
Siekiant įvertinti rekonstrukcijos kokybę simuliuotomis kosmoso sąlygomis pirmiausia buvo pritaikytas tiesioginis atstumo palyginimo metodas. Skirtingai nei bazinėje analizėje šiuo atveju tiesioginis vertinimas matuoja geometrinį tikslumą ir lokalų triukšmą išskirtinai tik sėkmingai atkurtose apšviestose objekto paviršiaus srityse. Šiam skaičiavimui naudoti C2C bei C2M algoritmai. Visi pagrindiniai tiesioginio palyginimo statistiniai rodikliai yra apibendrinti duomenų lentelėje (žr. 5 lentelę). Atkurto paviršiaus tikslumo priklausomybė nuo įvesties vaizdų kiekio bei raiškos pavaizduota grafike (žr. 21 pav.). Erdvinis paklaidų pasiskirstymas ir lokalūs nuokrypiai sėkmingai sugeneruotose zonose parodyti spalvinėje vizualizacijoje (žr.22 pav.).

5 lentelė. Imituotų kosmoso sąlygų rekonstrukcijos tikslumo metrikos. Viršutinėje lentelės dalyje pateikiami C2C, apatinėje - C2M metodo rezultatai. Rinkinių numeriai atitinka 4 lentelėje pateiktas konfigūracijas. Visi matmenys pateikti metrais. Paryškintos reikšmės nurodo geriausius statistinius rezultatus atskirose kategorijose.

Nr.	**Vidurkis** (m)	**Mediana** (m)	**Stand. nuokrypis** (m)	**Didž. nuokrypis** (m)
1	8,0	5,6	8,4	112
2	**6,4**	**4,6**	**6,2**	**102**
3	9,1	4,9	12,6	168
4	7,8	4,8	9,4	103
5	12,7	7,5	15,3	178
6	10,2	6,1	12,0	149
7	16,8	10,9	18,9	299
8	12,3	7,8	13,8	262
1	7,5	5,2	8,6	112
2	**5,8**	**4,1**	**6,5**	**102**
3	8,5	4,3	12,9	166
4	7,3	4,4	9,6	103
5	12,3	7,3	15,5	177
6	9,7	5,7	12,2	149
7	16,5	10,7	19,0	301
8	11,9	7,5	14,0	262



21 pav. Imituotų kosmoso sąlygų sintetinio modelio rekonstrukcijos rezultatų priklausomybė nuo vaizdų kiekio ir raiškos taikant C2M lyginimo metodą. Kreivės (kairė ašis) rodo vidutinį nuokrypį metrais, stulpeliai (dešinė ašis) - atkurto taškų debesies tankį. Tamsi spalva žymi 100 %, šviesesnė - 200 % raišką. Grafike matoma, jog didesnė raiška leidžia sugeneruoti tankesnį paviršių ir pasiekti mažesnį nuokrypį. Taip pat, augant vaizdų kiekiui kartu su taškų tankiu sistemingai didėja ir vidutinis nuokrypis.



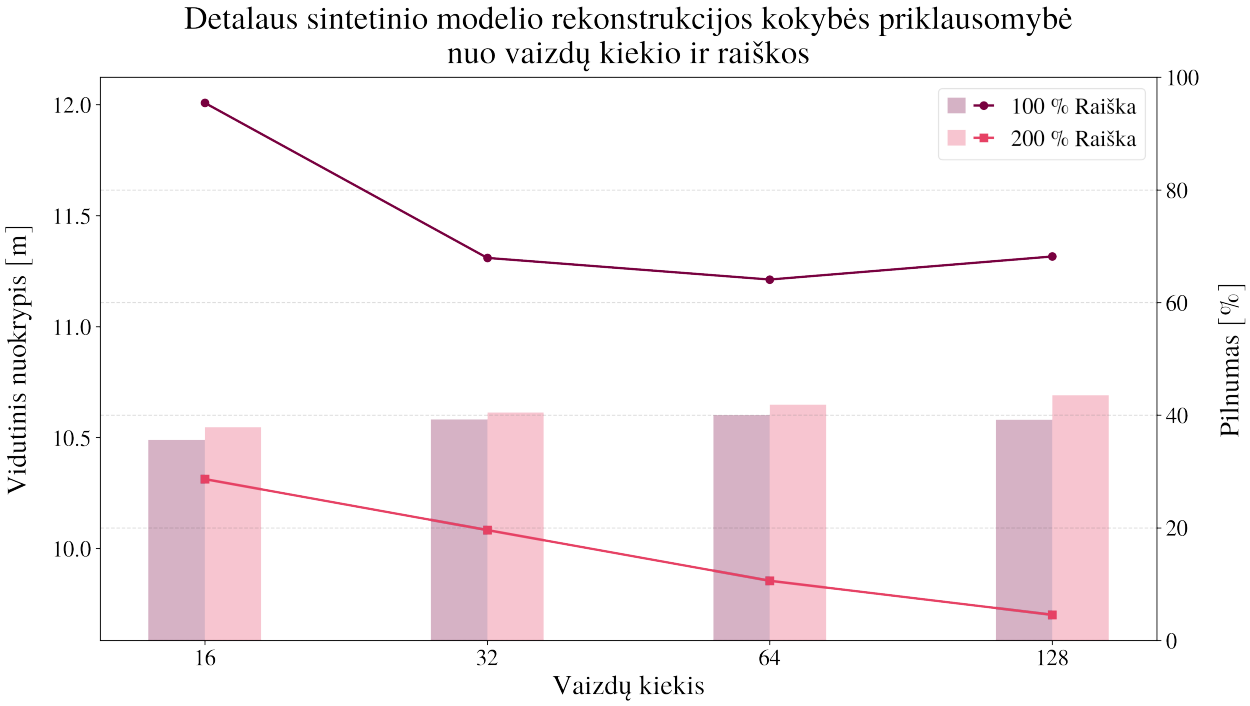
22 pav. Imituotų kosmoso sąlygų modelio vaizdų generavimo parametrų įtakos erdviniam tikslumui C2M vizualizacija. Modeliai gauti sistemingai varijuojant raišką ir įvesties vaizdų kiekį. Spalvinė skalė rodo nuokrypį metrais, apribotą 99-tuoju procentiliu. Paveiksle stebima tendencija, jog didinant įvesties vaizdų skaičių didėja modelio tankis, tačiau kartu didėja ir erdvinis triukšmas. Taip pat matoma, kad aukštesnė vaizdų raiška lemia geresnius rezultatus.

Siekiant įvertinti paviršiaus padengimą ir bazinės globalios geometrijos tikslumą, šiomis sudėtingomis sąlygomis pritaikytas atvirkštinis C2C palyginimo metodas. Šis vertinimas atskleidžia realią sėkmingai atkurtos asteroido topologinės formos dalį. Visi atvirkštinio palyginimo statistiniai rodik-

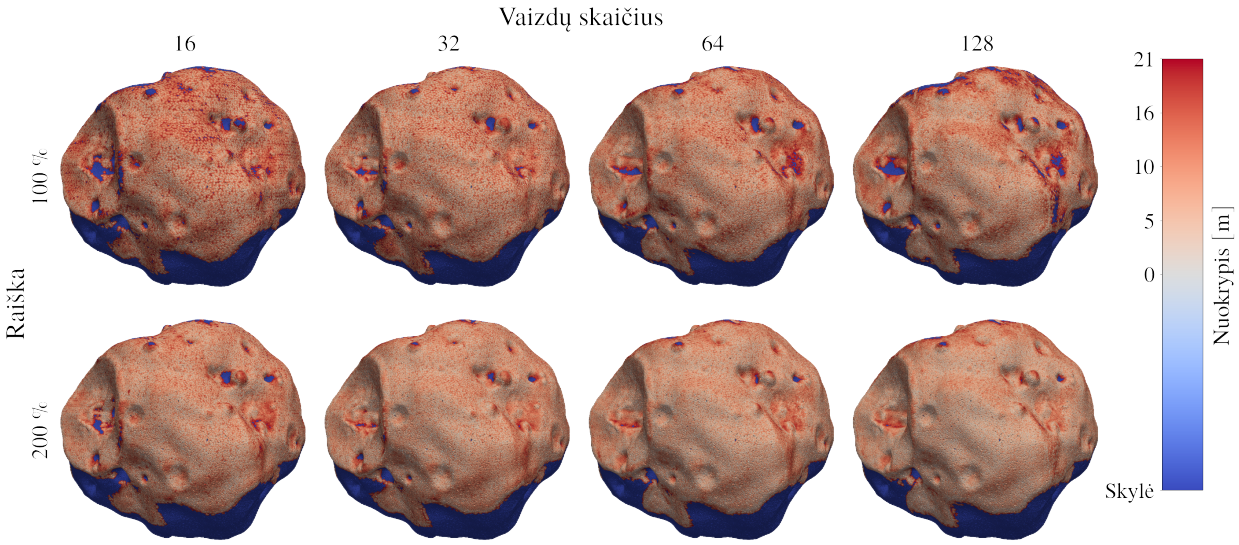
liai yra pateikti papildomoje duomenų lentelėje (žr. 6 lentelę). Rekonstrukcijos pilnumo priklausomybė nuo įvesties vaizdų skaičiaus ir raiškos pavaizduota grafike (žr. 23 pav.). Paviršiaus padengimo spragos bei bazinės geometrijos nuokrypiai parodyti spalvinėje vizualizacijoje (žr. 24 pav.).

6 lentelė. Imituotų kosmoso sąlygų atvirkštinio C2C geometrinio nuokrypio metrikos. Rinkinių numeriai atitinka 4 lentelėje pateiktas konfigūracijas. Visi matmenys pateikti metrais. Paryškintos reikšmės nurodo geriausius statistinius rezultatus atskirose kategorijose.

Nr.	**Pilnumas** (%)	**Vidurkis** (m)	**Mediana** (m)	**Stand. nuokrypis** (m)
1	35,62	12,0	11,9	4,4
2	37,86	10,3	9,9	**4,2**
3	39,26	11,3	11,0	4,5
4	40,52	10,1	9,6	4,3
5	40,04	11,2	10,8	4,5
6	41,89	9,9	9,2	4,3
7	39,21	11,3	10,9	4,7
8	**43,56**	**9,7**	**8,9**	4,5

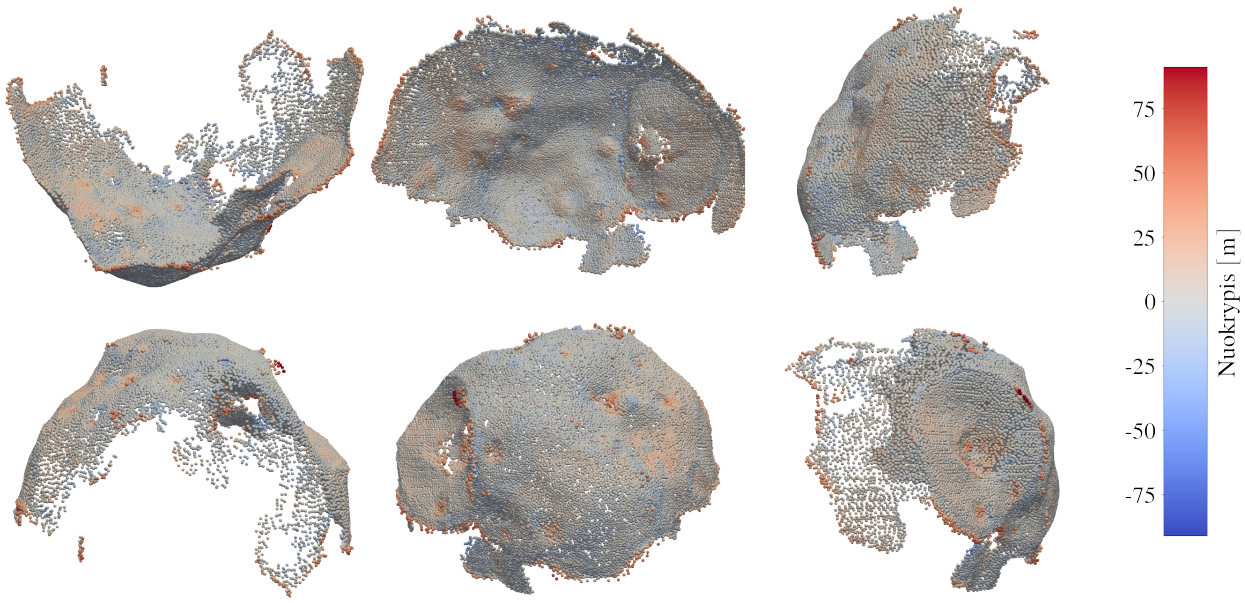


23 pav. Imituotų kosmoso sąlygų sintetinio modelio rekonstrukcijos rezultatų priklausomybė nuo vaizdų kiekio ir raiškos taikant C2C lyginimo metodą. Kreivės (kairė ašis) rodo vidutinį nuokrypį metrais, stulpeliai (dešinė ašis) - atkurto taškų debesies pilnumą. Tamsi spalva žymi 100 %, šviesesnė - 200 % raišką. Grafike matoma, jog didesnė raiška leidžia sugeneruoti tankesnį paviršių ir pasiekti mažesnį nuokrypį. Taip pat, augant vaizdų kiekiui, kartu su modelio pilnumu mažėja ir vidutinis nuokrypis.

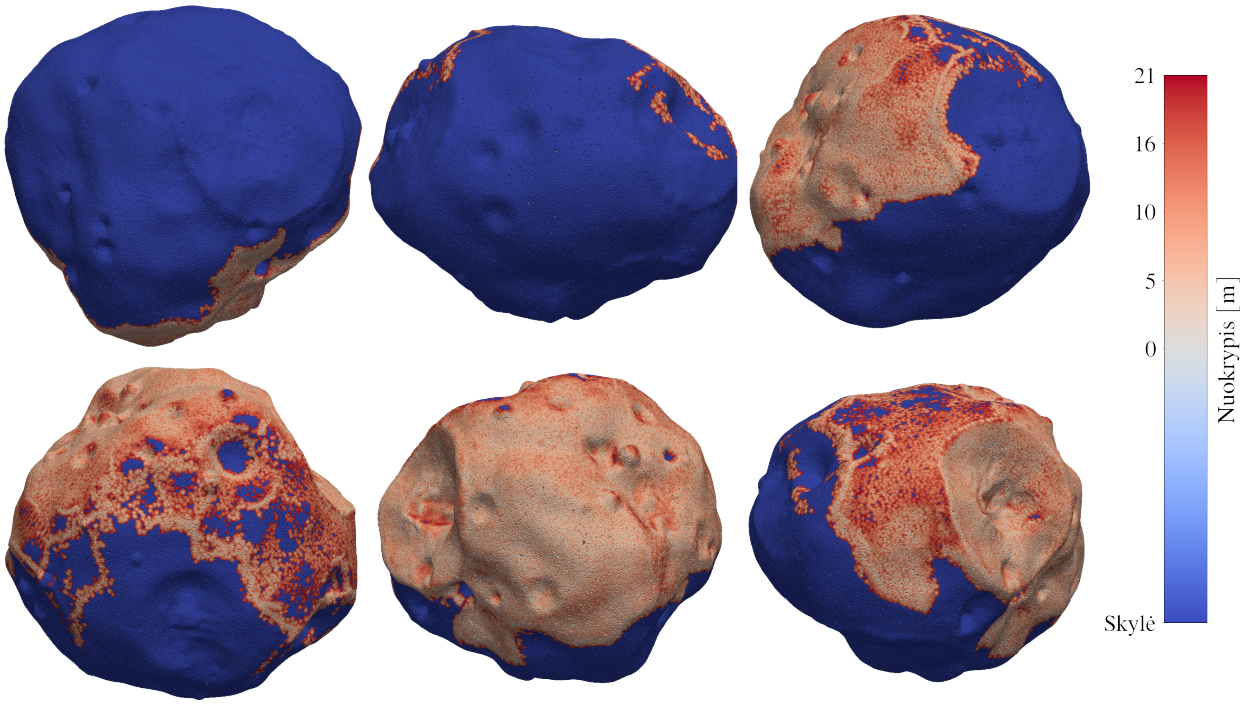


24 pav. Imituotų kosmoso sąlygų modelio vaizdų generavimo parametrų įtakos paviršiaus padengimui ir bazinės geometrijos tikslumui vizualizacija, taikant atvirkštinį C2C lyginimo metodą. Modeliai gauti sistemingai varijuojant raišką ir įvesties vaizdų kiekį. Spalvinė skalė rodo nuokrypį metrais, tamsiai mėlyna žymi neatkurtas sritis. Matoma, jog didinant įvesties vaizdų skaičių didėja atkurto paviršiaus padengimas ir bazinės geometrijos tikslumas.

Atlikti skaičiavimai simuliuotoje kosmoso aplinkoje atskleidė du skirtingomis savybėmis pasižyminčius optimalius rezultatus. Tiesioginio palyginimo atveju mažiausias lokalus triukšmas pasiektas naudojant 16 vaizdų seką su 200 % raiška. Šio modelio vidutinis nuokrypis siekė 5,8 m (žr. 25 pav.). Atvirkštinio palyginimo metrika atskleidė kitą optimalų parametrų rinkinį. Didžiausias paviršiaus pilnumas ir tiksliausia bazinė geometrija gauta pritaikius 128 vaizdų seką su ta pačia padidinta raiška. Šio modelio paviršiaus padengimas siekė 43,56 % (žr. 26 pav.). Nors pastarasis variantas pasižymi detalesniu topologinės formos atkūrimu, jame taip pat pastebimas padidėjęs lokalus geometrinis triukšmas. Šie rezultatai tiesiogiai patvirtina bazinės analizės metu stebėtą algoritmų veikimo kompromisą tarp absoliutaus lokaliojo tikslumo ir globalios formos užbaigtumo veikiant griežtai suvaržytomis duomenų įvesties sąlygomis.



25 pav. Imituotų kosmoso sąlygų modelio erdvinio tikslumo C2M vizualizacija. Pavaizduotas statistiškai tiksliausias modelis (16 vaizdų ir 200 % raiška) iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Spalvinė skalė rodo geometrinį nuokrypį metrais, apribotą 99-tuoju procentiliu. Dėl riboto stebėjimo kampo erdvėlaivio praskriejimo metu paviršius atkurtas tik iš dalies. Atkurtoje dalyje stebimas minimalus erdvinis triukšmas sudėtingos geometrijos srityse.



26 pav. Imituotų kosmoso sąlygų modelio paviršiaus padengimo ir bazinės geometrijos tikslumo vizualizacija, taikant C2C lyginimo metodą. Pavaizduotas tankiausias atkurtas modelis (128 vaizdų ir 200 % raiška) iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Skalė rodo geometrinį nuokrypį metrais, tamsiai mėlyna žymi neatkurtas sritis. Dėl riboto stebėjimo kampo paviršiaus padengimas yra mažas. Atkurtoje dalyje pasiektas vidutinis bazinės geometrijos tikslumas.

Analizuojant simuliuotos kosmoso aplinkos poveikį išryškėja specifinės parametrų tendencijos ir fiziniai apribojimai. Vaizdų raiškos padidinimas iki 200 % universaliai pagerino tiek geometrinį

tikslumą, tiek paviršiaus pilnumą. Didesnė raiška suteikė algoritmams galimybę aptikti smulkius elementus net ir sudėtingose zonose arti šešėlio terminatoriaus. Įvesties kadrų kiekio didinimas nuo 16 iki 128 atskleidžia jau pažįstamą kompromisą. Didesnis nuotraukų skaičius leidžia atkurti platesnį paviršiaus plotą ir tikslesnę bazinę geometriją, tačiau neišvengiamai padidina matematiškai besikaupiantį erdvinį triukšmą.

Vertinant šiuos rezultatus papildomai būtina atsižvelgti į pačios simuliuotos aplinkos fizinius suvaržymus. Maksimalus atkuriamo paviršiaus plotas yra griežtai ribojamas linijinės praskriejimo trajektorijos ir vieno šaltinio apšvietimo. Dėl praskriejimo specifikos, virtualios kameros fiksuoja tik vieną asteroido pusę, o neapšviestas pusrutulis nesuteikia jokių vizualinių bruožų fotogrametriniams algoritmams. Šie dinaminiai apribojimai paaiškina, kodėl simuliuotomis sąlygomis pasiektas bendras pilnumo procentas yra natūraliai mažesnis nei pilnos orbitos bazinėje analizėje.

Dinaminio objekto stebėjimo iššūkiai

Papildomas tyrimo etapas apėmė dinaminio objekto stebėjimo scenarijų. Šis eksperimentas veikė kaip ribinių sąlygų testas, skirtas įvertinti automatinės COLMAP programinės įrangos automatinės rekonstrukcijos funkcijos galimybes apdorojant sudėtingus praskridimo duomenis. Skirtingai nei statinio modelio atveju, visi bandymai rekonstruoti besisukančio asteroido vaizdų sekas baigėsi kritinėmis klaidomis ir algoritmas nesugeneravo net pradinio retojo taškų debesies.

Pagrindinė šio nesėkmės priežastis yra susijusi su fundamentaliu fotogrametrijos apribojimu. Standartiniai struktūros iš judesio algoritmai griežtai remiasi statiškos scenos prielaida. Objekto sukimasis pažeidžia šią taisyklę ir sukuria erdvines dviprasmybes. Besikeičianti paviršiaus geometrija ir judantys šešėliai apsunkina algoritmui matematiškai teisingai aptikti ir susieti vizualines savybes tarp skirtingų kadrų.

Šią algoritminę problemą sustiprino specifinės eksperimento sąlygos apimančios žemą laikinę skiriamąją gebą bei neoptimizuotus kinematinius parametrus. Imituoto viso praskridimo metu buvo fiksuojamas sąlyginai mažas nuotraukų kiekis. Dėl tokio duomenų retumo laiko atžvilgiu, greitas kameros judėjimas kartu su lėtu asteroido sukimusi lėmė pernelyg didelius perspektyvos ir apšvietimo pokyčius tarp gretimų kadrų. Standartinė automatizuota sistema nesugebėjo apdoroti šių atotrūkių.

2.6.3 Sintetinės rekonstrukcijos apibendrinimas

Pirmojoje tyrimo pusėje atlikti sintetiniai eksperimentai atskleidė reikšmingus fotogrametrinio atkūrimo galimybių skirtumus priklausomai nuo stebėjimo aplinkos. Bazinė analizė pademonstravo aukštą geometrinį tikslumą idealiomis pilnos orbitos sąlygomis. Veikiant šiems kontroliuojamiems parametrams, atkurti modeliai pasiekė 3,6 metro vidutinį geometrinį nuokrypį ir leido sugeneruoti itin tankius taškų debesis, turinčius iki 449 000 taškų. Perėjimas prie simuliuotos kosmoso aplinkos su linijine praskriejimo trajektorija ir vieno šaltinio apšvietimu drastiškai pakeitė rezultatus. Fiziniai apribojimai fiksuojant tik dalinai apšviestą pusrutulį sumažino maksimalų pasiekiamą tikslumą ir nulėmė 6,4 metro geriausią vidutinį nuokrypį. Be to, struktūrinis tankis buvo smarkiai apribotas pasiekiant tik maždaug 69 000 taškų ribą.

Abiejų eksperimentų metu pastebėtas atvirkštinis ryšys tarp įvesties duomenų kiekio ir statis-

tinio tikslumo. Tai atspindi fundamentalų fotogrametrinių algoritmų veikimo kompromisą tarp absoliutaus geometrinio tikslumo ir topologinio pilnumo. Naudojant retus vaizdų rinkinius, bazinė linija tarp gretimų kameros pozicijų yra santykinai plati. Dėl šios priežasties struktūros iš judesio algoritmai taiko griežtus reprojekcijos klaidų slenksčius. Skaičiavimų metu sėkmingai atpažįstami ir persidengiančiuose kadruose susiejami tik itin aukšto kontrasto bei ryškios tekstūros paviršiaus taškai. Sudėtingos šešėliuotos ar vientisos tekstūros paviršiaus sritys neatitinka griežtų reikalavimų ir procese yra paprasčiausiai atmetamos. Dėl šio atrankos mechanizmo rezultatų vertinime atsiranda specifinis fenomenas vadinamas išgyvenamumo klaida (angl. *survivorship bias*). Atkūrimo filtrus sėkmingai praėję taškai pasižymi itin aukštu patikimumu ir mažu matematiniu triukšmu, tačiau pačiame modelyje lieka didelės neužpildytos erdvinės tuštumos. Esant dideliam nuotraukų tankiui stebima priešinga algoritmų elgsena. Gausus įvesties vaizdų kiekis suteikia pakankamai persidengiančios informacijos gylio vertinimui sudėtingesnėse paviršiaus srityse daugiavaizdžio stereo atkūrimo algoritmams. Jie naudoja šį duomenų perteklių siekiant ekstrapoliuoti trūkstamą informaciją net ir mažo kontrasto zonose. Nors tai leidžia sėkmingai užpildyti topologines ertmes ir atkuria bendrą globalią formą, koreliacija šiose sudėtingose srityse yra matematiškai kur kas silpnesnė. Šis algoritminis neapibrėžtumas tiesiogiai transformuojasi į išaugusį lokalų geometrinį triukšmą ir padidėjusį vidutinį nuokrypį.

Automatizuoti atkūrimo procesai, tokie kaip standartinė COLMAP programinės įrangos funkcija, yra itin efektyvūs idealiomis sąlygomis. Tačiau simuliuotoje kosmoso aplinkoje stebimas didelis taškų debesies tankio sumažėjimas ir stiprėjantis kompromisas tarp tikslumo bei pilnumo atskleidžia esminį šių sistemų trūkumą. Griežtai automatizuoti algoritmai neturi reikiamo lankstumo prisitaikyti prie sudėtingų apšvietimo sąlygų bei apribotos bazinės linijos praskriejimo trajektorijose. Dėl šios priežasties pereinant prie realių kosminių misijų duomenų analizės būtina atsisakyti standartinio automatizuoto požiūrio ir taikyti detalią modulinę fotogrametrijos eigą. Šis metodas reikalauja suskaidyti šį procesą į atskirus kontroliuojamus modulius, kur galima individualiai optimizuoti ypatybių išgavimo slenksčius bei atitikimų paieškos apribojimus ir gylio žemėlapių filtravimo parametrus.

3 Fotogrametrinė analizė realiomis kosmoso sąlygomis

Šiame skyriuje nagrinėjimas modulinės fotogrametrinės sistemos taikymas rekonstruojant realų asteroido (101955) Bennu 3D modelį iš NASA OSIRIS-REx misijos archyvinių duomenų. Kadangi sintetinių duomenų validacija atskleidė standartinių automatizuotų procesų apribojimus sudėtingomis stebėjimo sąlygomis, šiame etape fokusuojamasi į parametrų valdymu pagrįstą metodiką. Perėjimas prie realių kosminių stebėjimų sukelia specifinių iššūkių, kuriuos lemia didelė NASA planetų duomenų sistemos (angl. *Planetary Data System*) [27] archyvų apimtis, aštrus apšvietimas bei foninis žvaigždžių triukšmas. Taip pat analizę apsunkina dinaminės kinematikos sąlygos, susijusios su asteroido sukimusi bei dinamine erdvėlaivio trajektorija.

Skyriaus struktūra apima visą procesą nuo pradinės duomenų atrankos bei algoritminio filtravimo iki galutinių rezultatų vertinimo. Pirmiausia aprašoma PDS archyvo analizė ir vaizdų paruošimo etapas, apimantis failų formatų konvertavimą bei maskavimo procedūras. Toliau detalizuojamas modulinės fotogrametrinės sistemos įgyvendinimas. Skyrius užbaigiamas išsamia Bennu rekonstrukcijos kiekybinio tikslumo vertinimo rezultatų analize.

3.1 Duomenų šaltiniai ir atrankos metodika

3.1.1 Duomenų archyvas

Pagrindinis šio tyrimo duomenų šaltinis yra viešai prieinamas NASA PDS archyvas. Šioje sistemoje saugomi visi OSIRIS-REx misijos metu sukaupti moksliniai stebėjimai, apimantys asteroido Bennu paviršiaus nuotraukas bei lazerinio aukščiamačio rezultatus. Tyrimui pasirinkti antrojo lygio (angl. *Level 2*, L2) sukalibruoti duomenų produktai. Šio lygio duomenyse jau yra pritaikytos radiometrinės ir geometrinės korekcijos, kurios dalinai pašalina specifinius kamerų jutiklių artefaktus ir užtikrina vaizdų tinkamumą tiksliems fotogrametriniams skaičiavimams.

Reikalinga informacija apie kiekvieno stebėjimo parametrus buvo išgaunama tiesiogiai analizuojant atsisiųstų failų pavadinimus. Šiose struktūrizuotose tekstinėse eilutėse užkoduoti esminiai metaduomenys apimantys fiksavimo laiką, naudotą instrumentą, matavimo vienetus ir kalibracijos lygį. Svarbu paminėti, jog atliekant fotogrametrinę rekonstrukciją nebuvo naudojami erdvėlaivio atstumo iki asteroido ar kiti išoriniai navigaciniai duomenys (angl. *SPICE kernels*). Šis apribojimas reiškia, kad fotogrametriniai algoritmai neturi atskaitos taško fiziniams atstumams apskaičiuoti, o tai lemia gautų 3D modelių mastelio neapibrėžtumą. Dėl šios priežasties vėlesniuose analizės etapuose reikalingas papildomas mastelio normalizavimas lyginant atkurtus modelius su absoliučiais etaloniniais matavimais.

3.1.2 Misijos fazių ir instrumentų parinkimas

OSIRIS-REx misija pasižymėjo sudėtinga ir nuolat kintančia stebėjimo kinematika bei skirtingais erdvėlaivio atstumais iki asteroido Bennu. Siekiant visapusiškai įvertinti fotogrametrinės sistemos galimybes tyrimui buvo atrinktos trys skirtingos misijos fazės kartu su joms specifiškai pritaikytais optiniais instrumentais.

Pirmiausia analizei pasirinkta erdvėlaivio artėjimo fazė (angl. *approach phase*). Joje erdvėlaivis skrido tiesia trajektorija, o pats asteroidas sukosi aplink savo ašį. Ši konfigūracija leido užfiksuoti asteroido paviršių 360° kampu ir užtikrino būtiną kadrų persidengimą. Svarbu paminėti, jog šis stebėjimo metodas dalinai išsprendė statiškos scenos prielaidos problemą. Šiame etape stebėjimai buvo vykdomi iš didelio atstumo naudojant teleskopinę PolyCam kamerą. Instrumento siauras regos laukas, siekiantis maždaug 0,8°, leido užfiksuoti pilną objekto diską viename kadre. Analizėms naudotų vaizdų erdvinė skiriamoji geba siekė apie 1,12 metro pikselyje. Algoritmams sukuriamas erdvinių koordinačių atitikmuo, lyg asteroidas būtų visiškai nejudantis kūnas, aplink kurį skrieja erdvėlaivis. Tai leido sėkmingai taikyti fotogrametrijos algoritmus, paliekant paviršiuje judančius šešėlius kaip vienintelį dinaminį stebėjimo trikdį.

Kitos dvi tyrimui pasirinktos orbitinės misijos fazės, žymimos kaip A ir B orbitos. Jose erdvėlaivis skriejo arti asteroido paviršiaus, todėl stebėjimams naudota MapCam kamera. Šis instrumentas pasižymi platesniu, maždaug 4° regos lauku, kuris yra būtinas norint aprėpti pakankamą paviršiaus plotą iš nedidelio atstumo. Orbitos A fazėje gautų vaizdų erdvinė skiriamoji geba siekė apie 0,24 metro pikselyje, o orbitoje B siekė maždaug 0,13 metro pikselyje. Orbitinės fazės stebėjimai į analizę įtraukti siekiant išbandyti fotogrametrinių algoritmų ribas atkuriant aukštos raiškos lokalią topografiją bei įvertinti kadrų persidengimo stabilumą esant sparčiai kintančiai stebėjimo perspektyvai.

3.1.3 Etaloninio modelio duomenų šaltinis

Gautų fotogrametrinės rekonstrukcijos rezultatų kiekybiniam vertinimui buvo būtinas patikimas atskaitos etalonas. Šiam tikslui iš to paties PDS archyvo atsisiųstas asteroido Bennu formos modelis sukurtas remiantis tiksliais OSIRIS-REx lazerinio aukščiamačio (angl. *OSIRIS-REx Laser Altimeter*, OLA) matavimų duomenimis (žr. 27 pav.).



27 pav. Realaus asteroido Bennu etaloninis modelis, pavaizduotas iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Modelis sugeneruotas remiantis OSIRIS-REx misijos lazerinio aukščiamačio (OLA) duomenimis [4, 27]. Šis paviršius naudojamas kaip absoliuti atskaita kiekybiniam fotogrametrinės rekonstrukcijos rezultatų įvertinimui.

OLA yra aktyvusis instrumentas skleidžiantis lazerio impulsus ir fiksuojantis jų grįžimo laiką. Ši technologija leidžia nuskaityti paviršiaus topografiją visiškai nepriklausomai nuo saulės apšvietimo sąlygų ar stebimo objekto paviršiaus šešėlių. Nors lazeriniai aukščiamačiai suteikia itin tikslią informaciją apie geometriją ir turi aiškų absoliutų mastelį, šis metodas pasižymi reikšmingais inžineriniais apribojimais. Aktyvūs erdvėlaivių jutikliai reikalauja didelių energijos sąnaudų ir efektyviai veikia tik stebint objektus iš artimo atstumo. Dėl šių priežasčių ankstyvosiose misijų fazėse optinė rekonstrukcija išlieka pirminiu ir esminiu įrankiu dangaus kūnų analizei iš toli.

Šiame tyrime OLA modelis taikomas kaip etalonas atliekant paklaidų skaičiavimus. Kadangi pradinė optinė fotogrametrija nesuteikia informacijos apie realų fizinį mastelį, gauti 3D taškų debesys analizės metu buvo dirbtinai proporcingai padidinti ir sulygiuoti su OLA duomenimis. Šis mastelio priderinimas neatstoja trūkstamų navigacinių parametrų, bet yra taikomas tik tam, kad būtų galima atlikti prasmingą geometrinių nuokrypių palyginimą tarp abiejų paviršių.

3.1.4 Vaizdų atrinkimas

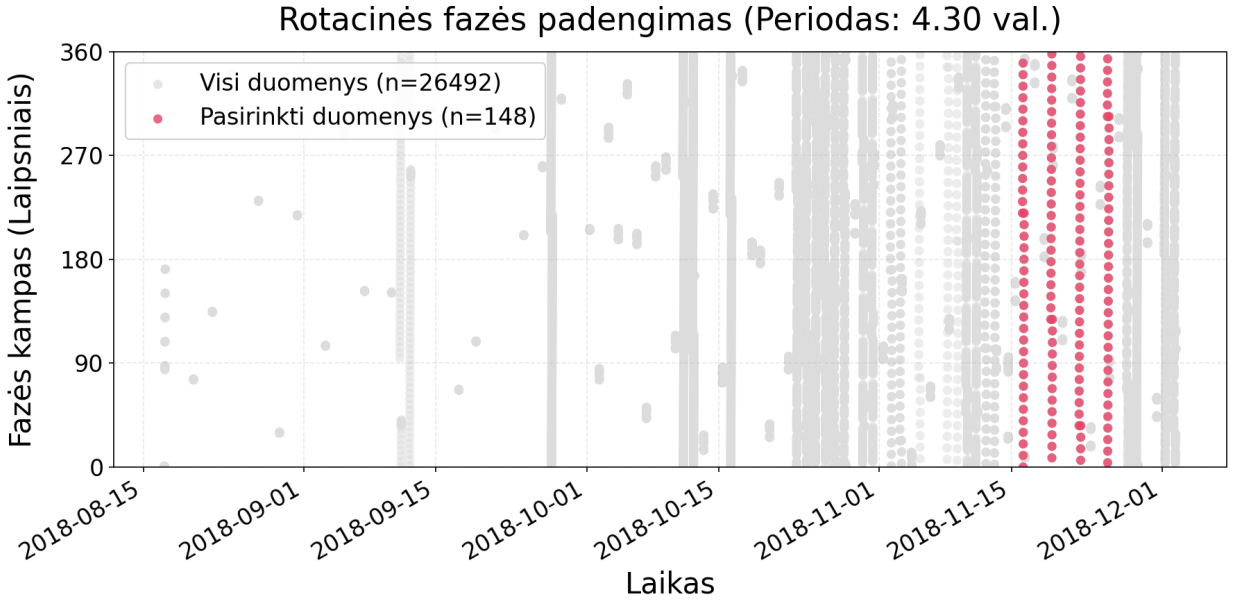
Archyve esančių duomenų apimtis yra itin didelė, todėl siekiant suformuoti kokybišką ir skaičiavimams optimalų duomenų rinkinį fotogrametrinei analizei pritaikytas daugiapakopis euristinis filtravimas.

Pirmasis atrankos etapas rėmėsi instrumentų ir matavimo vienetų identifikavimu. Priklausomai nuo analizuojamos misijos fazės, atrinkti tik specifinės kameros vaizdai. Papildomai failai filtruoti pagal matavimo vienetus, pasirenkant atspindžio vietoje radiacijos srauto. Šis sprendimas priimtas siekiant suvienodinti paviršiaus albedo informaciją ir išvengti globalaus apšvietimo intensyvumo svyravimų.

Toliau taikytas laikinis filtras, kurio parametrai parinkti atsižvelgiant į misijos fazę. Artėjimo fazės atveju analizė apribota paskutinių kelių dienų laikotarpiu prieš pereinant į orbitinę stadiją. Šis laiko langas apėmė maždaug keturis pilnus asteroido sukimosi ciklus (žr. 28 pav.) ir užtikrino aukščiausią įmanomą paviršiaus raišką išlaikant pilno disko matomumą. Orbitinių fazių atveju laikinis filtras nebuvo taikomas ir analizei naudoti viso fazės periodo stebėjimai.

Trečiasis žingsnis apėmė kokybinį fotometrinį filtravimą. Buvo pašalinti kadrai, kurių vidutinis pikselių šviesumas viršijo nustatytas ribas. Tokiu būdu eliminuoti peršviesti vaizdai, kuriuose dėl per didelio šviesos srauto buvo prarastos topografinės detalės.

Galiausiai pritaikytas geometrinis filtras skirtas užtikrinti pakankamą erdvinę bazę triangulacijai. Iš sekų atmesti visi vaizdai, tarp kurių fiksavimo laiko intervalas buvo mažesnis nei 10 sekundžių. Nors vidutinis laiko tarpas tarp nuotraukų artėjimo misijos fazėje siekė 7 minutes, orbitos A fazėje 24 minutes, o orbitos B fazėje 14 minučių, misijos duomenyse pasitaikydavo greitų nuotraukų serijų (angl. *burst sequences*). Artėjimo fazėje tokios serijos buvo fiksuojamos 7 sekundžių, o orbitos A fazėje vos 4 sekundžių intervalais. Pritaikytas apribojimas leido automatiškai eliminuoti šiuos perteklinius kadrus, kurie nesuteikia pakankamo paralakso pokyčio 3D taškų skaičiavimui ir tik be reikalo apkrauna kompiuterinius resursus. Kadangi orbitos B fazėje tokių greitų serijų nebuvo, šis filtras paliko vaizdų seką nepakitusią.



28 pav. Realaus asteroido Bennu artėjimo fazės duomenų atrankos vizualizacija. Grafike pavaizduotas vaizdų pasiskirstymas pagal stebėjimo laiką ir rotacinę fazę. Pilki taškai žymi visą šios fazės duomenų archyvą (n = 26 492), raudoni rekonstrukcijai atrinktą vaizdų seką (n = 148). Matoma, jog atrinktas vaizdų rinkinys tolygiai apima 4 pilnus asteroido rotacijos periodus.

3.2 Vaizdų paruošimas

3.2.1 Formatų konversija

Originalūs stebėjimo duomenys PDS archyve yra saugomi astronomijoje standartizuotu FITS (angl. *Flexible Image Transport System*) formatu. Šie failai savyje talpina 32 bitų dinaminio diapa-

zono informaciją. Nors toks formatas yra optimalus moksliniams matavimams, dauguma atvirojo kodo SfM algoritmų reikalauja standartizuotų vaizdų tipų. Dėl šios priežasties prieš atliekant fotogrametrinę analizę visi atrinkti failai buvo konvertuoti į 8 bitų PNG formatą.

Kosminėje erdvėje fiksuoti vaizdai pasižymi dideliais šviesumo kontrastais, todėl tiesinis suspaudimas visiškai užtamsintų šešėlius arba peršviestų saulės apšviestas zonas. Siekiant išvengti šios problemos konversijos metu pritaikytas logaritminis tonų atvaizdavimas. Toks vaizdinės informacijos išlaikymas visame asteroido diske yra esminė sąlyga užtikrinanti sėkmingą fotogrametrinių algoritmų veikimą ieškant unikalių paviršiaus taškų.

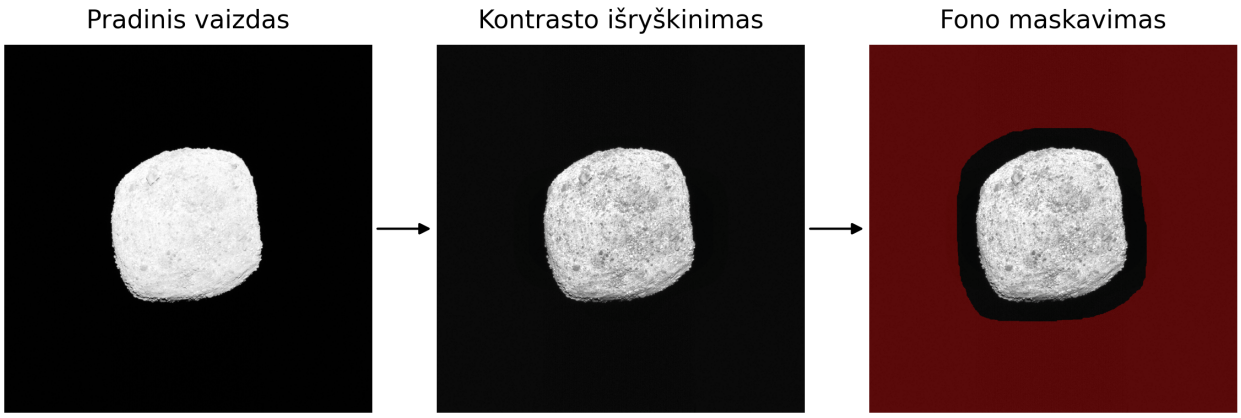
3.2.2 Paviršiaus kontrasto stiprinimas

Natūralus atspindžio duomenų kontrastas dažnai yra per žemas patikimam fotogrametrinių savybių aptikimui dėl vientisos asteroido paviršiaus spalvos. Šiai problemai spręsti visiems konvertuotiems vaizdams pritaikytas CLAHE kontrasto išryškinimas. Šis metodas leido sėkmingai išryškinti smulkius geologinius darinius tiesiogiai saulės apšviestose srityse, kur natūralūs šešėliai buvo per silpni, ir kartu išlaikė matomumą tamsesnėse zonose. Algoritme integruotas kontrasto ribojimo mechanizmas papildomai užkirto kelią foninio triukšmo stiprinimui. Toks dirbtinai padidintas lokalus tekstūros ryškumas lėmė didesnį aptiktų unikalių taškų kiekį ir užtikrino stabilesnį sekančių kadrų susiejimo procesą.

3.2.3 Fono maskavimas

Giliame kosmoso fone užfiksuotose nuotraukose neretai matomos žvaigždės bei kameros jutiklių triukšmas. Fotogrametrijos algoritmai gali klaidingai identifikuoti žvaigždes kaip stacionarius paviršiaus taškus. Tokios klaidos iškraipo kameros erdvinių koordinačių skaičiavimus ir sukuria nereikalingą triukšmą. Siekiant padidinti algoritmų stabilumą, sumažinti geometrinį triukšmą ir optimizuoti skaičiavimo resursus, kiekvienam kadrui sugeneruotos binarinės kaukės, izoliuojančios asteroido kūną nuo kosmoso fono.

Maskavimo algoritmas susidėjo iš kelių nuoseklių žingsnių. Pirmiausia vaizdai buvo konvertuoti į pilką skalę ir tamsaus fono atskyrimui pritaikytas žemas slenkstis. Smulkus pavienių pikselių triukšmas pašalintas naudojant morfologinę atidarymo operaciją. Toliau algoritmas identifikavo visus kadre esančius kontūrus ir išsaugojo tik patį didžiausią, taip eliminuojant bet kokius likusius nereikšmingus artefaktus. Galiausiai šis išskirtas objektas buvo užpildytas ir šiek tiek išplėstas pritaikant morfologinį išplėtimą. Tai leido suformuoti vientisą kaukę su apsaugine zona, užtikrinant, kad visas asteroido siluetas būtų pilnai aprėptas be pavojaus nupjauti naudingą objekto kraštą (žr. 29 pav.).

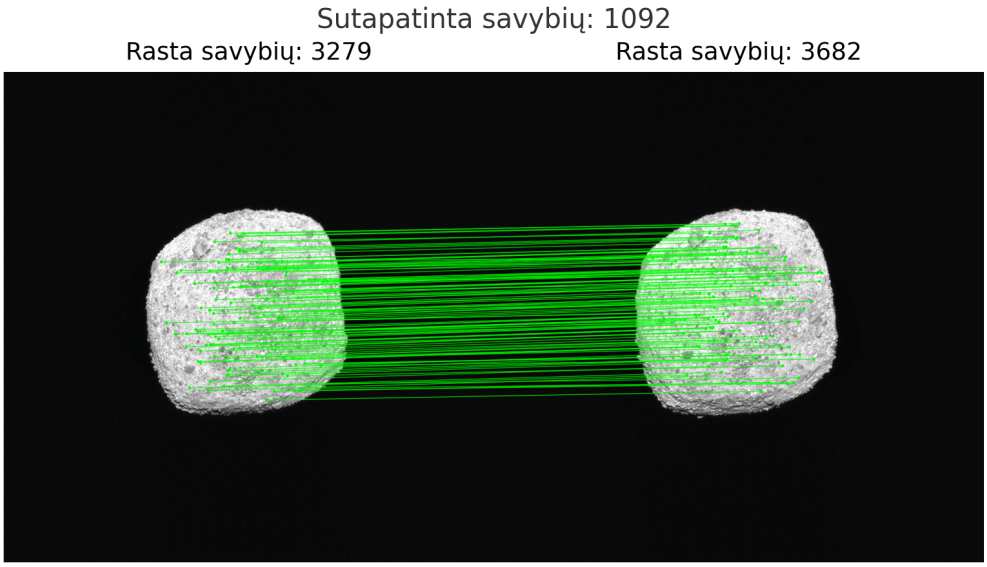


29 pav. Realaus astereoido Bennu artėjimo fazės vaizdų paruošimo fotogrametrijai etapai. Kairėje pirminis vaizdas, konvertuotas iš FITS formato taikant logaritminę atvaizdavimo funkciją. Viduryje vaizdas po kontrasto išryškinimo, išskiriančio lokalias paviršiaus tekstūros detales. Dešinėje sugeneruota fono kaukė, skirta izoliuoti asteroidą nuo atviros kosmoso erdvės.

3.3 Modulinės fotogrametrinės sistemos įgyvendinimas

Šiam tyrimui sukurta automatizuota fotogrametrinė sistema, kurioje rekonstrukcijos procesas suskaidytas į atskirus funkcinius modulius. Tokia architektūra leido lanksčiai keisti parametrus, vykdyti eksperimentinį jų optimizavimą bei užtikrinti proceso stabilumą. Sistemoje integruoti įrankiai leido versijuoti bandymus, stebėti proceso eigą realiuoju laiku, vizualizuoti tarpinius rezultatus bei automatiškai atkurti procesą po programinės įrangos sutrikimų.

Pirminis rekonstrukcijos etapas apėmė retą (angl. *sparse*) modelio atkūrimą. Vaizdų savybių išskyrimui pasirinktas SIFT algoritmas, pasižymintis atsparumu mastelio ir posūkio pokyčiams, kurie yra neišvengiami stebint besisukantį objektą. Savybių suderinimui tarp vaizdų taikytas išsamios paieškos metodas. Nors šis metodas reikalauja daugiau skaičiavimo resursų nei standartinis gretimų kadrų derinimas, esant nedideliam vaizdų rinkiniui (<300), jis užtikrino didžiausią patikimumą ir leido rasti ryšius tarp vaizdų net esant dideliems perspektyvos pokyčiams ar tarp skirtingų sukimosi periodų vaizdų (žr. 30 pav.).



30 pav. Realaus asteroido Bennu vaizdų savybių suderinimo vizualizacija tarp dviejų artėjimo fazės sekos kadrų. Žalios linijos jungia identifikuotus geometrinius atitikmenis tarp kairiojo ir dešiniojo vaizdų. Šie bendri taškai yra esminis pagrindas santykinei erdvėlaivio kameros pozicijai ir orientacijai nustatyti struktūros iš judesio (SfM) algoritmo veikimo metu.

Remiantis suderintais taškais, SfM algoritmas iteratyviai atkūrė retą taškų debesį bei apskaičiavo kamerų pozicijas erdvėje. Svarbus šio etapo aspektas buvo vidinių kameros parametrų kalibracija. Pasirinkta strategija, leido algoritmui pačiam optimizuoti kameros parametrus rekonstrukcijos eigoje. Tai įgalino rasti matematiškai nuoseklų sprendinį ir sėkmingai konverguoti į stabilų geometrinį modelį, nepaisant potencialių fizinių neatitikimų.

Galutinis etapas apėmė tankią (angl. *dense*) rekonstrukciją, kuriai atlikti naudotas MVS algoritmas. Naudojant SfM etape gautą geriausią retą modelį ir patikslintas kamerų pozicijas, buvo sugeneruotas tankus taškų debesis, reprezentuojantis detalią asteroido paviršiaus geometriją.

3.4 Kiekybinis palyginimas

Galutinis kiekybinis sugeneruoto 3D modelio tikslumo vertinimas buvo atliekamas lyginant jį su etaloniniu didelės raiškos OLA modeliu. Šiam vertinimui buvo pasitelkta ta pati eiga, aprašyta 2.5 poskyryje, atliekant tuos pačius triukšmo šalinimo, centravimo, normalizavimo ir sulygiavimo žingsnius. Taip pat, siekiant visapusiškai įvertinti rekonstrukcijos rezultatus, vertinimo eigoje pritaikyta ta pati dviejų etapų lyginimo sistema. Pirmiausia, tiesioginis C2M palyginimo metodas buvo naudojamas absoliučiam geometriniam tikslumui ir lokaliam struktūriniam triukšmui apskaičiuoti atkurtame modelyje. Antrajame etape etaloninis LiDAR modelis buvo diskretizuotas į 500 000 taškų debesį ir pritaikytas atvirkštinis C2C metodas, skirtas objektyviai įvertinti sėkmingai atkurto asteroido paviršiaus padengimą bei globalios bazinės geometrijos tikslumą.

3.5 Rezultatai ir diskusija

3.5.1 Duomenų filtravimo statistika

Atlikta duomenų analizė parodė, kad tik maža dalis visų misijos archyve esančių vaizdų yra tiesiogiai panaudojami fotogrametrinei rekonstrukcijai. Didžioji dalis duomenų buvo eliminuota taikant daugiapakopį filtravimą, būtiną užtikrinti geometrinį ir fotometrinį kadrų suderinamumą. 7 lentelėje pateikiama detali statistika, iliustruojanti duomenų kiekio mažėjimą kiekviename atrankos etape trims tirtoms misijos fazėms. Pateikti duomenys atspindi geriausius bandymus kiekvienam scenarijui.

7 lentelė. Realaus asteroido Bennu duomenų atrankos procesas. Lentelėje pateikiama OSIRIS-REx misijos vaizdų archyvo filtravimo statistika, rodanti išlaikytų nuotraukų kiekį skirtinguose atrankos etapuose ir atitinkamose misijos fazėse.

Filtravimo etapas	**Orbita A**	**Orbita B**	**Artėjimo**
Pradinis kiekis	588	6 284	26 640
Pagal instrumentą	588	876	14 820
Matavimo vienetai	294	438	7 410
Laikinis filtras	294	438	592
Fotometrinis filtras	294	386	592
Intervalas	147	386	148
Suderinta[1]	**2**	**3**	**43**

Vertinant šią statistiką išryškėja du esminiai filtravimo etapai. Pirmasis ženklus duomenų kiekio sumažėjimas (nuo pradinio kiekio iki intervalo filtro) atspindi euristinę, nustatytų taisyklių pagrindu atliktą atranką. Šiame etape buvo pašalinta didžioji dalis archyvinių duomenų, kurie, nors ir moksliškai vertingi kitoms taikymo sritims, yra netinkami fotogrametrijai. Tai apima netinkamų instrumentų vaizdus, kalibracines sekas bei peršviestus kadrus. Šis etapas patvirtina, kad neapdoroti misijų archyvai nėra tiesiogiai pritaikomi 3D rekonstrukcijai ir reikalauja agresyvaus pirminio valymo.

Kritinę metodo veikimo ribą atskleidžia antrasis sumažėjimas, nuo intervalo filtro iki suderintų kadrų. Tai reprezentuoja algoritminę atranką, kurią atliko COLMAP programinės įrangos SfM algoritmas. Šiame etape išryškėjo kokybinis skirtumas tarp tirtų misijos fazių. Analizuojant A ir B orbitų duomenis, matoma jog algoritmas atmetė beveik 99 % techniškai tvarkingų vaizdų. Tai indikuoja, jog vien techninės vaizdo kokybės nepakanka ir sėkmingai rekonstrukcijai reikalingas geometrinis kadrų persidengimas. Tuo tarpu artėjimo fazėje buvo pasiektas geresnis rezultatas ir algoritmas sėkmingai užregistravo apie 30 % euristiniu būdu atrinktų vaizdų. Nors palanki trajektorija leido išlaikyti reikšmingą dalį kadrų, didelė dalis stebėjimų duomenų neturi pakankamo savybių tankio ar geometrinio ryšio su kitais kadrais.

[1] Vaizdai, sėkmingai užregistruoti pirminio modelio atkūrimo etape.

3.5.2 Kameros parametrai

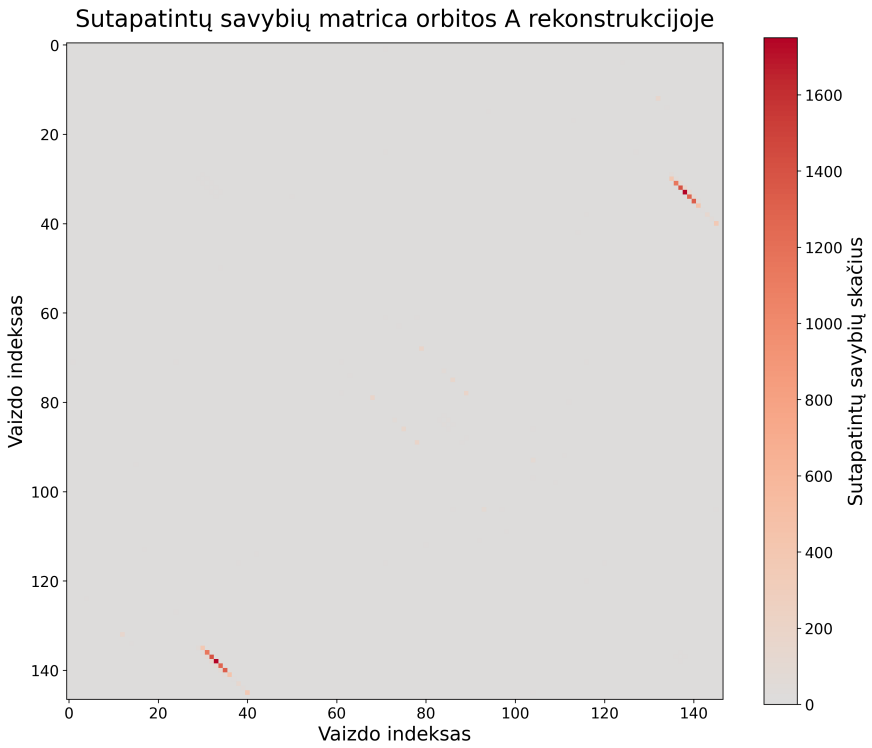
Detali rekonstrukcijos nestabilumo analizė parodė aiškią kameros parametrų įtaką galutiniam rezultatui. Visi bandymai atkurti paviršių naudojant fiksuotus, techninėje dokumentacijoje nurodytus instrumento parametrus, baigėsi proceso nutrūkimu SfM etape. Algoritmas nesugebėdavo rasti sprendinio tenkinančio griežtus geometrinius apribojimus. Realiomis kosminio skrydžio sąlygomis atsiranda smulkūs ir matematiškai nemodeliuoti optinės sistemos iškraipymai. Šiuos netikslumus gali sukelti temperatūriniai svyravimai, nežymūs jutiklio poslinkiai ar fokusavimo ypatumai. Dėl šių mikroskopinių paklaidų reprojekcijos paklaida išlieka didelė ir griežtai apribotas algoritmas atmeta visą rekonstrukciją kaip matematiškai negalimą.

Šiai problemai spręsti pritaikyta savikalibracijos strategija. Šis metodas traktuoja kameros parametrus kaip laisvus kintamuosius ir leidžia algoritmui pačiam juos optimizuoti rekonstrukcijos eigoje. Tai įgalina sistemą kompensuoti mikroskopines paklaidas, padalijant klaidą ir šiek tiek pakoreguojant židinio nuotolį ar iškraipymo koeficientus. Nors apskaičiuoti vidiniai kameros parametrai skyrėsi nuo fizinių instrumento savybių, ši laisvė leido sistemai sėkmingai konverguoti. Matematiniu požiūriu algoritmas rado virtualią kamerą, kuri geriausiai atitiko stebėjimo duomenis. Šio kompromiso rezultatas yra mastelio neapibrėžtumas. Rekonstruotas modelis atspindi teisingą ir proporcingą asteroido formą, tačiau neturi teisingo absoliutaus mastelio. Monokuliarinėje fotogrametrijoje nenaudojant tikslių kameros parametrų ar išorinių navigacijos parametrų, mastelis visada išlieka tik santykinis dydis.

3.5.3 Rekonstrukcijos stabilumas skirtinguose scenarijuose

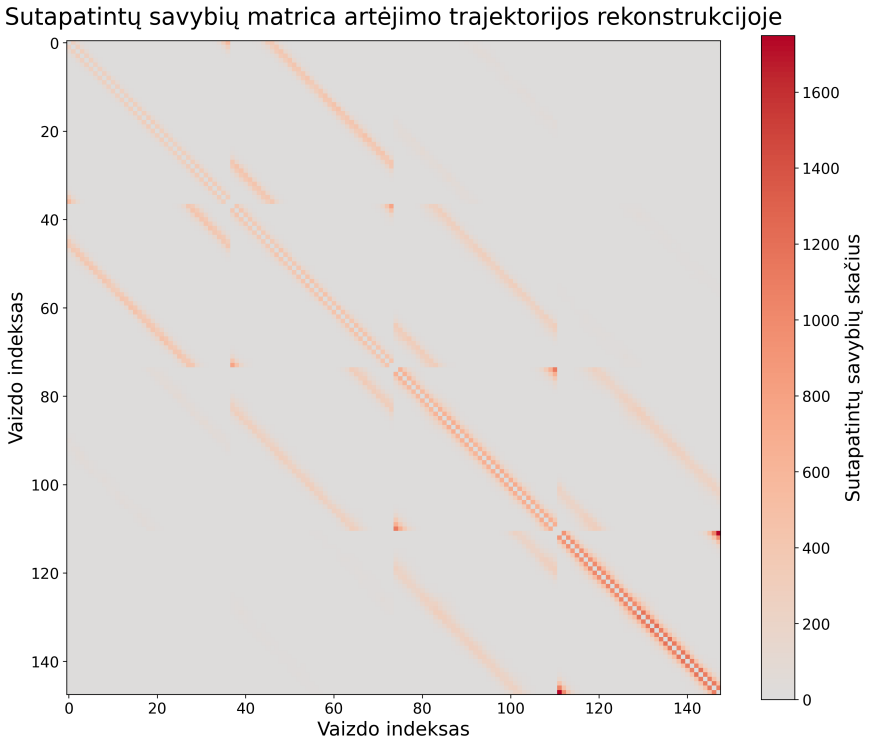
Eksperimentiniai tyrimai atskleidė tiesioginę fotogrametrinio atkūrimo sėkmės priklausomybę nuo stebėjimo geometrijos. Sėkmingam modeliavimui būtinas pakankamas vaizdų persidengimas bei stabilios apšvietimo sąlygos, leidžiančios algoritmams identifikuoti bei suderinti paviršiaus taškus skirtinguose kadruose.

Visi bandymai atkurti asteroido modelį naudojant orbitų A ir B duomenis baigėsi nesėkmingai. Pagrindinė to priežastis yra nepalanki stebėjimo konfigūracija. Šią problemą vaizdžiai iliustruoja orbitinės fazės atitikimų matrica (žr. 31 pav.), kurioje matomas matematinių ryšių tarp kadrų trūkumas. Erdvėlaivio judėjimas artimoje orbitoje kartu su asteroido sukimusi nulėmė tai, kad persidengimas tarp kadrų buvo minimalus arba jo visai nebuvo. Papildomas nesėkmę lėmęs veiksnys buvo nuolat judantys šešėliai, kurie apsunkino savybių atitikmenų paiešką. Dėl šių veiksnių gauti rezultatai pasireiškė tik kaip atsitiktinis geometrinis triukšmas. Tikėtina, kad tokiose misijos fazėse fotogrametrinė analizė galėtų būti įmanoma integruojant tikslius navigacinius duomenis.

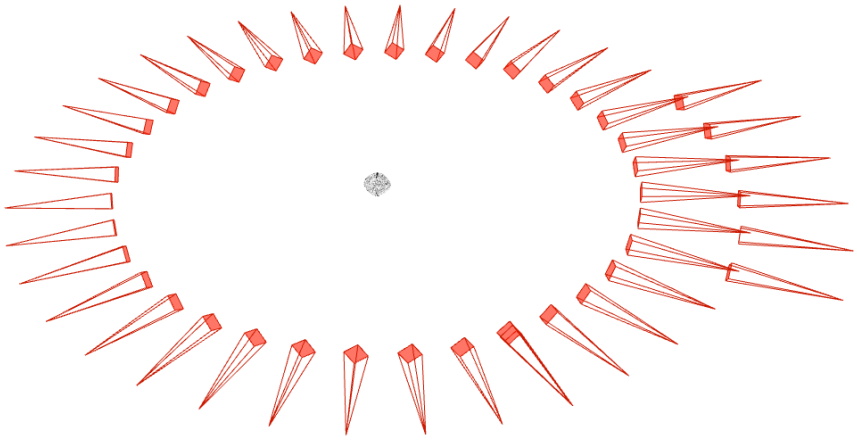


31 pav. Realaus asteroido Bennu orbitos A fazės vaizdų sutapatintų savybių matrica. Ašys žymi vaizdų indeksus chronologine sekos tvarka, o spalvos intensyvumas - sėkmingai rastų bendrų atitikmenų skaičių tarp kadrų porų. Matrica yra beveik tuščia ir tai parodo jog algoritmas negalėjo suformuoti vientiso ryšių tinklo, būtino sėkmingai rekonstrukcijai.

Priešingai nei orbitinėse fazėse, artėjimo fazės duomenų sėkmę lėmė palanki stebėjimo geometrija. Tai patvirtina tanki ir nuosekli šios fazės atitikimų matrica (žr. 32 pav.). Erdvėlaivio tiesiaeigis artėjimas kartu su paties asteroido sukimusi aplink savo ašį suformavo virtualios orbitos efektą, kuris atsispindi ir SfM apskaičiuotose kamerų pozicijose (žr. 33 pav.). Ši specifinė konfigūracija leido algoritmui interpretuoti vaizdų seką kaip nuoseklų apskriejimą aplink objektą bei užtikrino reikiamą kadrų persidengimą sėkmingai trianguliacijai. Tai įgalino santykinio gylio informacijos atkūrimą pasikliaunant vien optiniais duomenimis.



32 pav. Realaus asteroido Bennu artėjimo fazės vaizdų sutapatintų savybių matrica. Ašys žymi vaizdų indeksus chronologine sekos tvarka, o spalvos intensyvumas - sėkmingai rastų bendrų atitikmenų skaičių tarp kadrų porų. Pagrindinė įstrižainė rodo stirpų ryšį tarp laike gretimų kadrų, o periodinės struktūros už įstrižainės ribų patvirtina pasikartojantį to paties paviršiaus matomumą po pilnų asteroido apsisukimų.



33 pav. Asteroido Bennu struktūros iš judesio (SfM) algoritmo apskaičiuotos kamerų pozicijos ir orientacijos artėjimo fazės rekonstrukcijos metu. Vizualizacijos centre matomas atkurtas pradinis taškų debesis, apsuptas kameros erdvinių padėčių (raudonos piramidės). Ši geometrija atskleidžia, kaip asteroido sukimasis ir erdvėlaivio judėjimas tiesia linija suformavo virtualios orbitos efektą, sudariusią sąlygas algoritmui užfiksuoti ir apdoroti objekto paviršių iš visų pusių.

3.5.4 Kiekybinis tikslumo vertinimas

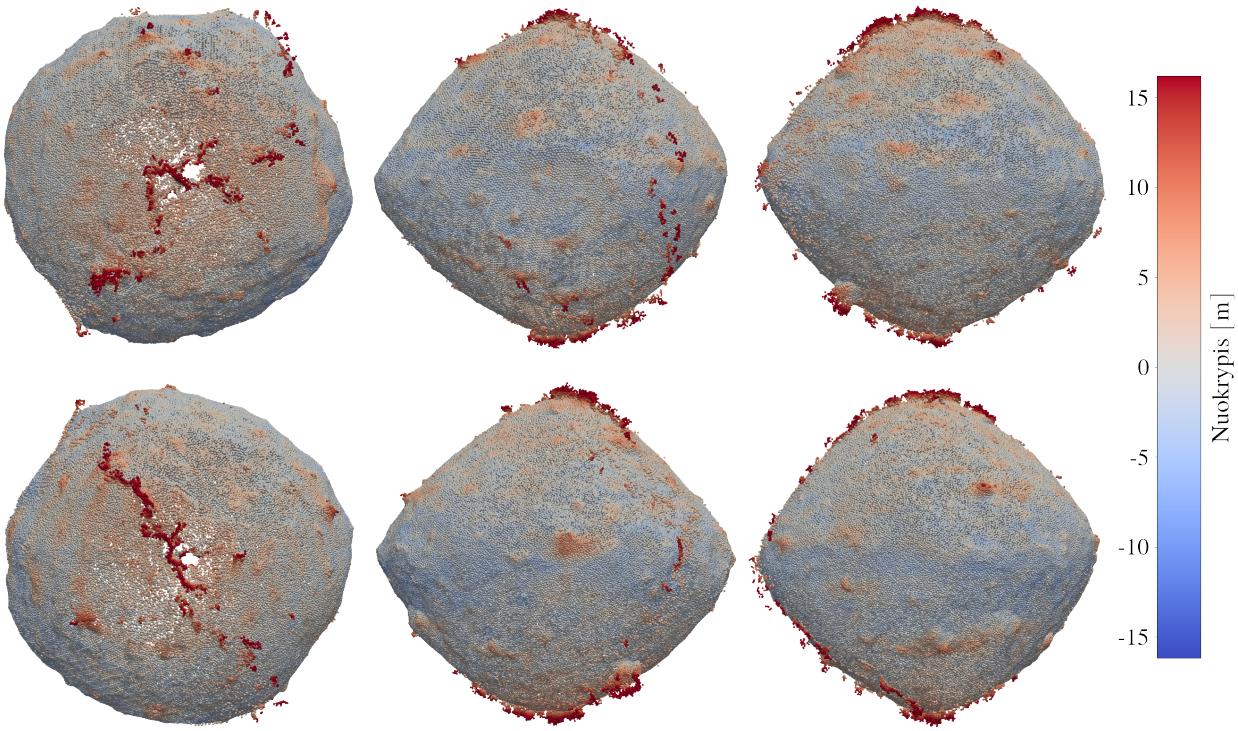
Atlikus sėkmingai rekonstruoto modelio palyginimą su etaloniniu OLA modeliu naudojant C2M metodą, buvo sudarytas skaliarinis nuokrypių laukas. Vertinant statistinius rodiklius (žr. 8 lentelę),

matomas 2 m vidutinis nuokrypis. Lyginant šį dydį su asteroido masteliu, kurio vidutinis skersmuo siekia apie 530 m, paklaida sudaro mažiau nei 0,4 % viso objekto dydžio. Lyginant vidurkį su 1,4 m siekiančia mediana stebimas pasiskirstymo asimetriškumas. Didžioji dalis rekonstruotų taškų pasižymi aukštu tikslumu, tačiau bendrą vidurkį padidina nedidelis skaičius stambių erdvinių nuokrypių.

8 lentelė. Asteroido Bennu rekonstrukcijos geometrinio nuokrypio metrikos. Lentelėje pateikti atkurto artėjimo fazės modelio lyginimo su lazerinio aukščiamačio duomenų etaloniniu tinkleliu statistiniai rezultatai taikant C2M metodą. Matmenys pateikti metrais.

Taškų kiekis	**Vidurkis** (m)	**Mediana** (m)	**Stand. nuokrypis** (m)	**Didž. nuokrypis** (m)
120 000	2,0	1,4	2,7	30

Vizualinė rekonstrukcijos paklaidų analizė atskleidė dėsningą šių netikslumų pasiskirstymą. Remiantis paklaidų vizualizacija (žr. 34 pav.), didžiausių nuokrypių koncentracija yra matoma polių srityse dėl didelio stebėjimo kampo. Papildomi lokalių paklaidų klasteriai formuojasi aplink didžiuosius paviršiaus nelygumus ir yra tiesiogiai siejami su šešėlių dinamika.



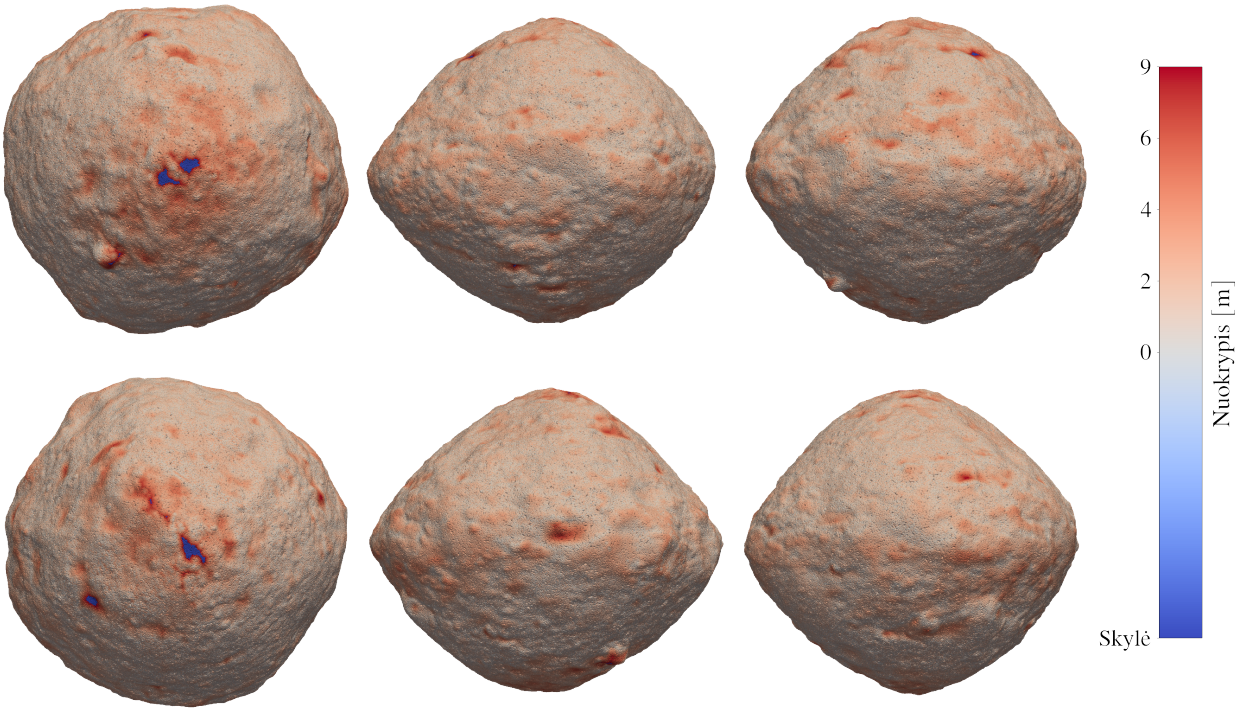
34 pav. Realaus asteroido Bennu erdvinio tikslumo C2M vizualizacija. Pavaizduotas atkurtas modelis, gautas naudojant artėjimo fazės duomenis, iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Spalvinė skalė rodo geometrinį nuokrypį metrais, apribotą 99-tuoju procentiliu. Didžiojoje paviršiaus dalyje pasiektas aukštas tikslumas, tačiau poliuose ir aplink stambius darinius stebimas padidėjęs erdvinis triukšmas.

Siekiant objektyviai įvertinti atkurto paviršiaus pilnumą, buvo pritaikytas atvirkštinis palyginimo metodas. Visi šio vertinimo statistiniai rodikliai yra apibendrinti duomenų lentelėje (žr. 9 lente-

lę). Vizualinė paviršiaus padengimo analizė (žr. 35 pav.) patvirtina, kad algoritmams pavyko atkurti didžiąją dalį objekto paviršiaus. Minimalios erdvinės spragos yra stebimos tik asteroido ašigalių srityse, kurios dėl stebėjimo geometrijos perspektyvos buvo mažiausiai matomos. Nepaisant šių tuštumų polių regionuose, atvirkštinė metrika rodo, kad bazinė globali Bennu geometrija buvo atkurta patikimai ir gautas modelis sėkmingai atspindi jo topologinę formą.

9 lentelė. Realaus asteroido Bennu rekonstrukcijos bazinės geometrijos nuokrypio metrikos. Lentelėje pateikti artėjimo fazės modelio lyginimo su lazerinio aukščiamačio etaloniniu tinkleliu statistiniai rezultatai taikant atvirkštinį C2C metodą. Matmenys pateikti metrais.

Padengimas (%)	**Vidurkis** (m)	**Mediana** (m)	**Stand. nuokrypis** (m)
99,84	2,1	1,9	1,1



35 pav. Realaus asteroido Bennu paviršiaus padengimo ir bazinės geometrijos tikslumo vizualizacija, taikant atvirkštinį C2C lyginimo metodą. Pavaizduotas atkurtas modelis, gautas naudojant artėjimo fazės duomenis, iš šešių ortogonalių apžvalgos kampų. Spalvinė skalė rodo geometrinį nuokrypį metrais, tamsiai mėlyna žymi neatkurtas sritis. Didžiojoje paviršiaus dalyje pasiektas aukštas tikslumas, tačiau poliuose matomos ertmės.

Apibendrinant realių optinių duomenų tyrimą, galima teigti, kad detali modulinė fotogrametrijos eiga leido sėkmingai sugeneruoti globalų Bennu asteroido modelį iš artėjimo fazės vaizdų. Vertinant gauto modelio struktūrinį tankį, stebimas aiškus skirtumas nuo etaloninio modelio. Fotogrametrinis atkūrimas leido sugeneruoti modelį, sudarytą iš maždaug 120 000 taškų, tuo tarpu etaloninis OLA modelis turi apie 600 000 viršūnių. Nors iš optinių duomenų sukurto modelio ski-

riamoji geba yra mažesnė, šis rezultatas patvirtina fotogrametrinės rekonstrukcijos metodo pritaikomumą globalios formos atkūrimui realiomis kosmoso misijų sąlygomis.

4 Bendroji diskusija

4.1 Metodologijos evoliucija nuo simuliacijų iki realių stebėjimų

Tyrimo pradžioje naudoti sintetiniai modeliai veikė kaip kontroliuojama eksperimentinė erdvė. Ši aplinka leido izoliuoti ir atskirai vertinti geometrinius, kinematinius bei stebėjimo vaizdų kintamuosius. Tyrimas atskleidė algoritmų pritaikymo realybėje apribojimus. Blender programinėje įrangoje sukurtos simuliacijos negalėjo atkartoti stochastinio kosminės aplinkos triukšmo. Tai apima optinę sklaidą, jutiklių artefaktus bei archyvo triukšmą. Šis realybės atotrūkis patvirtina, kad vystant 3D rekonstrukcijos algoritmus astrofizikiniams tyrimams neužtenka kliautis idealizuotais sintetiniais modeliais ir būtina integruoti įvairius triukšmo modelius.

Dėl šio atotrūkio tarp simuliacijos ir realybės standartinės automatizuotos fotogrametrijos sistemos, susidūrusios su realiomis kosminių stebėjimų sąlygomis, patyrė algoritmų veikimo sutrikimus. Standartiniai SfM algoritmai yra optimizuoti Žemės sąlygoms, kur vyrauja detali tekstūra ir stabilus apšvietimas. Susidūrus su šiomis sudėtingomis sąlygomis, sistema nerado matematinio sprendinio. Žemas paviršiaus kontrastas ir kintantys šešėliai pažeidė statinės scenos prielaidas, o algoritminiai apribojimai atmetė visus stebėjimų duomenis.

Šis automatizuotų sistemų ribotumas parodo modulinės architektūros ir išsamios parametrizacijos poreikį astrofizikoje. Siekiant išgauti trimačius duomenis iš archyvinių stebėjimų, sistemą reikėjo išskaidyti į atskirus valdymo modulius. Atvira architektūra leido izoliuoti probleminius etapus ir suteikė galimybę koreguoti fiksuotus algoritmų parametrus. Tai leido sistemai prisitaikyti prie nenumatytų optinių iškraipymų ir konverguoti į matematinį sprendinį.

4.2 Fotogrametrijos apribojimai asteroidų tyrimuose

Fotogrametrinės rekonstrukcijos procesas remiasi statinės scenos ir pastovaus apšvietimo prielaidomis. Dangaus kūnų mechanika tiesiogiai pažeidžia šias bazines sąlygas ir sukelia algoritminį nestabilumą, o tai apsunkina savybių atitikmenų paiešką. Be specifinių stebėjimo geometrijų, sukuriančių virtualios orbitos efektą, algoritmai nesugeba susieti kadrų tarpusavyje ir matematinio sprendinio paieška tampa nesėkminga.

Atkūrus 3D duomenis, išryškėja antrasis apribojimas. Optiniu būdu atkurta monokuliarinė geometrija yra konformiška ir atspindi tikslias darinių proporcijas, bet neturi absoliutaus mastelio. Norint susieti gautą modelį su realiais matavimo vienetais būtina integruoti išorinius navigacinius erdvėlaivio trajektorijos duomenis. Be šių papildomų parametrų fotogrametrinis modelis išlieka tiksliu, bet tik santykiniu objekto vaizdu.

Trečiasis ribojimas yra susijęs su modelio topologiniu tikslumu. MVS algoritmas veikia kaip geometrinis žemo dažnio filtras. Gautų rezultatų analizė parodė, kad šis metodas atkuria globalią asteroido formą, tačiau sistemingai glotnina paviršių. Šio proceso metu yra prarandamos aukšto dažnio topografinės detalės, tokios kaip maži krateriai ar paviršiaus akmenys.

Ketvirtasis trūkumas apima metodo polinkį generuoti lokalizuotą triukšmą. Šios klaidos atsiranda, kai optinės stebėjimo anomalijos algoritmiškai transformuojamos į fizines struktūras. Tyrimas

atskleidė dvi pagrindines šio triukšmo atsiradimo priežastis. Geometriniai nuokrypiai polių srityse formuojasi dėl mažo stebėjimo kampo, kai sferinio objekto kraštuose esantys vaizdo pikseliai projekcijoje yra ištempiami arba tampa nematomi. Tuo tarpu klaidinga geometrija aplink stambius reljefo darinius atsiranda dėl judančių šešėlių. Algoritmai šiuos apšvietimo gradientus klaidingai interpretuoja kaip topografinius pokyčius ir atkuria neegzistuojančias erdvines anomalijas.

4.3 Metodo pritaikomumas

Optinė fotogrametrija nėra skirta pakeisti didelio tikslumo aktyvių sistemų. Jos pagrindinė pritaikymo niša yra ankstyvoji objekto charakterizacija kosminės misijos artėjimo fazėje. Šiame etape erdvėlaivis yra per toli, kad galėtų naudoti lazerinius aukščiamačius, bet jau fiksuoja pakankamos raiškos paviršiaus vaizdus. Šis metodas leidžia išgauti pirminius kosminio kūno geometrinius duomenis dar prieš įskriejant į orbitą.

Išgautas fotogrametrinis modelis atspindi globalią asteroido formą bei santykinį tūrį. Nors tyrimo metu atkurtas konformiškas modelis neturi absoliutaus mastelio, realiose misijose ši santykinė geometrija gali būti susieta su absoliučiais fizikiniais dydžiais papildomai integruojant erdvėlaivio navigacijos duomenis. Nepaisant to, kad rekonstrukcija išlygina smulkias topografines detales, šis metodas sukuria geometrinį pagrindą tolesniems skaičiavimams.

Praktinė šio išankstinio modelio vertė yra susijusi su erdvėlaivio navigacija. Išsprendus mastelio problemą, atkurtas asteroido tūris ir forma apibrėžia reikiamas geometrines ribas kūno gravitacinio potencialo lauko modeliavimui. Sujungus šiuos geometrinius duomenis su numanomais tankio įverčiais, galima iš anksto įvertinti masės centrą bei inercijos momentus. Gautas gravitacinio lauko modelis yra prielaida leidžianti planuoti artėjimo trajektoriją ir atlikti orbitos įvedimo manevrus.

Išvados

Remiantis atliktais teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais formuluojamos šio darbo pagrindinės išvados.

1. Neapdoroti astrofizikinių misijų vaizdų archyvai nėra tiesiogiai pritaikomi fotogrametrinėje rekonstrukcijoje. Šiam procesui yra būtinas euristinis filtravimas, užtikrinantis geometrinį bei fotometrinį kadrų suderinamumą.

2. Šį rekonstrukcijos metodą riboja stebėjimo kinematika. Orbitinės stebėjimo fazės yra netinkamos modelio atkūrimui dėl nepakankamo kadrų persidengimo ir judančių ryškių šešėlių. Tiksliam modelio atkūrimui yra būtina stabili stebėjimo geometrija, kuri OSIRIS-REx misijoje pasiekta tik artėjimo fazėje susiformavus virtualios orbitos efektui.

3. Fotogrametriniai algoritmai veikia kaip geometrinis žemo dažnio filtras. Metodas atkuria globalią konformišką formą, pasiekdamas apie 0,4 % santykinę vidutinę paklaidą, lyginant su lazeriniais matavimais, tačiau praranda smulkias topografines detales ir išlaiko absoliutaus mastelio neapibrėžtumą be išorinių navigacinių duomenų.

4. Nepaisant identifikuotų apribojimų, optinė fotogrametrija gali būti pritaikoma ankstyvojoje asteroido charakterizacijoje kosminių misijų artėjimo fazėje. Šis metodas sukuria globalios formos ir santykinio tūrio modelį, kuris suteikia geometrinį pagrindą, vertinant fizikinius parametrus ir planuojant erdvėlaivio navigacijos trajektorijas.

Literatūra

[1] L. Shuang and C. Pingyuan, Landmark tracking based autonomous navigation schemes for landing spacecraft on asteroids, *Acta Astronautica*, 2008, **62**, 391–403.

[2] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2nd ed., 2003. https://www.cambridge.org/core/books/multiple-view-geometry-in-computer-vision/0B6F289C78B2B23F596CAA76D3D43F7A.

[3] Y. Furukawa and J. Ponce, Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32**, 1362–1376. https://www.di.ens.fr/pmvs/.

[4] D. S. Lauretta, S. S. Balram-Knutson, E. Beshore, *et al.*, Osiris-rex: Sample return from asteroid (101955) bennu, *Space Science Reviews*, 2017, **212**, 925–984. https://arxiv.org/abs/1702.06981.

[5] Musashino Art University, "Perspective projection – art and design glossary." https://art-design-glossary.musabi.ac.jp/perspective-projection/.

[6] University of Auckland, Computer Science Department, "Vision guided control - compsci 773 lecture notes." https://www.cs.auckland.ac.nz/courses/compsci773s1t/lectures/773-GG/lectA-773.htm.

[7] D. G. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**, 91–110. https://link.springer.com/article/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

[8] J. L. Schönberger *et al.*, "Colmap - structure-from-motion and multi-view stereo." https://colmap.github.io/, 2016.

[9] S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, *et al.*, Adaptive histogram equalization and its variations, in *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 39, 355–368, Academic Press, 1987.

[10] J. L. Bentley, Multidimensional binary search trees used for associative searching, *Commun. ACM*, Sept. 1975, **18**, 509–517.

[11] K. Perlin, An image synthesizer, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, July 1985, **19**, 287–296.

[12] R. B. Rusu, N. Blodow, and M. Beetz, Fast point feature histograms (fpfh) for 3d registration, in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3212–3217, 2009.

[13] M. A. Fischler and R. C. Bolles, Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Commun. ACM*, June 1981, **24**, 381–395.

[14] P. Besl and N. D. McKay, A method for registration of 3-d shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**, 239–256.

[15] R. B. Rusu, Semantic 3d object maps for everyday manipulation in human living environments, *KI - Künstliche Intelligenz*, 2010, **24**, 345–348.

[16] L. Jorda and P. J. Gutiérrez, Rotational properties of cometary nuclei, *Space Science Reviews*, 2001, **92**, 165–192. https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1021598404115.

[17] W. Steffen, N. Koning, S. Wenger, C. Morisset, and M. Magnor, Shape: A 3D Modeling Tool for Astrophysics, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, **17**, 454–465. https://ieeexplore.ieee.org/document/5453364.

[18] Capek, David, Petrík, Michal, Pachman, Jirí, *et al.*, 3d shape models for describing monolithic asteroids and meteoroids, *A&A*, 2025, **696**, A40.

[19] S. Watanabe, Y. Tsuda, M. Yoshikawa, *et al.*, Hayabusa2 mission overview, *Space Science Reviews*, 2017, **208**, 3–16. https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-017-0377-1.

[20] European Space Agency, "Rosetta overview." https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta_overview, 2024.

[21] National Aeronautics and Space Administration, "Mars 2020 perseverance rover." https://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-2020-perseverance-rover/, 2024.

[22] Li, Hongliang, Wu, Bo, Li, Zhaojin, *et al.*, Integrated photogrammetry and photoclinometry for enhanced 3d surface reconstruction of asteroids, *A&A*, 2026, **707**, A357.

[23] L. Baglivo, A. Del Bue, M. Lunardelli, F. Setti, V. Murino, and M. De Cecco, A Method for Asteroids 3D Surface Reconstruction from Close Approach Distances, in *Computer Vision Systems*, 21–30, Springer, 2011. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23968-7_3.

[24] S. Zhang, Y. Yang, B. Hu, Y. Han, Y. Ma, and S. Liu, High-accuracy asteroid 3d modelling method based on stereo images and laser altimetry data, *Optics Laser Technology*, 2025, **192**, 113501.

[25] Blender Development Team, "Blender (version 4.3) [computer software]." https://www.blender.org, 2024.

[26] "Cloudcompare (version 2.13.2) [gpl software]." http://www.cloudcompare.org/, 2024.

[27] NASA Planetary Data System, "Small bodies node: Osiris-rex data archive." https://sbn.psi.edu/pds/resource/orex/, 2024. Accessed: 2025-01-25.

Photogrammetric Reconstruction of Asteroids: From Synthetic Baselines to OSIRIS-REx Mission Data

Vladas Šatas

Summary

Optical sensor data serves as the primary information source during the early approach phases of space missions, preceding the operational range of active instruments like Light Detection and Ranging (LiDAR). While photogrammetry offers a pathway for early shape and gravitational modelling, its application in space is constrained by radiometric and kinematic conditions [1,23]. This research investigates the reliability and accuracy of Structure-from-Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) algorithms under these specialised constraints [2, 3].

The study utilises a three-phase progressive methodology. First, the computational pipeline was validated using procedurally generated synthetic asteroid model. Second, realistic space conditions were simulated, incorporating single-source illumination, high-contrast shadows, and restricted fly-by trajectories to stress-test the algorithms. Finally, an heuristic and algorithmic filtering and processing pipeline was applied to real optical imagery of asteroid (101955) Bennu, extracted from the OSIRIS-REx mission archive [4, 27]. Reconstructed models were quantitatively evaluated against high-precision laser altimeter data using the Cloud-to-Mesh (C2M) distance metric [26].

Synthetic simulations demonstrated a fundamental algorithmic trade-off regarding input data density. While maximizing image resolution universally improves geometric accuracy, increasing the number of captured frames presents a distinct duality. Higher frame density significantly enhances overall surface coverage and the fidelity of the global base geometry, yet it simultaneously elevates the average statistical deviation by introducing localized structural noise in visually ambiguous regions.

When applied to archival data, orbital phase sequence failed to reconstruct due to dynamic shadows and insufficient baseline frames overlap. However, the approach phase sequence, where spacecraft's linear motion combined with the asteroid's rotation to create virtual orbit effect, yielded a successful model. The final photogrammetric model achieved a mean geometric deviation of around 2 meters compared to the laser altimeter reference, representing approximately 0.4 % of the asteroid's average diameter.

The findings confirm that while monocular photogrammetry lacks the high-frequency topographic precision required for landing site selection [4], it successfully captures global shape and relative volume, making it a viable tool for early-phase mission planning and initial object characterization.