



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Išskirtinių taškų radimo algoritmų įtakos 3D rekonstrukcijos kokybei tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Martynas Ragina

Projekto autorius

Lekt. dr. Kęstas Rimkus

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Išskirtinių taškų radimo algoritmų įtakos 3D rekonstrukcijos kokybei tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Martynas Ragina

Projekto autorius

Lekt. dr. Kęstas Rimkus

Vadovas

Prof. dr. Vidas Raudonis

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Martynas Ragina

Išskirtinių taškų radimo algoritmų įtakos 3D rekonstrukcijos kokybei tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Martynas Ragina

Patvirtinta elektroniniu būdu

Ragina, Martynas. Išskirtinių taškų radimo algoritmų įtakos 3D rekonstrukcijos kokybei tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Kęstas Rimkus; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: išskirtiniai taškai, trimatė rekonstrukcija, SIFT detektorius, struktūra iš judesio, kelio duobės.

Kaunas, 2022. 46 p.

Santrauka

Šiame darbe atliekamas tyrimas skirtas nustatyti SIFT išskirtinių taškų detektoriaus parametrų įtaką objekto trimatės rekonstrukcijos tikslumui. Tyrimo objektas yra kelio duobės. Pirmoje dalyje yra atliekama literatūros analizė. Nustatomi SIFT algoritmo parametrai, galintys turėti didžiausią įtaką tyrimo rezultatams. Taip pat apžvelgiami trimatės rekonstrukcijos metodai. Antroje dalyje aprašoma metodinė darbo dalis, apibrėžiami kokybiniai parametrai, skirti trimatės rekonstrukcijos įvertinimui. Aprašoma metodika, bei programos naudotos trimačio vaizdo sudarymui, bei vėlesnei jo analizei. Trečia darbo dalis skirta rezultatų pateikimui ir jų įvertinimui. Nustatomi tiriamajam objektui optimalūs SIFT parametrai, bei įvertinama trimatės rekonstrukcijos priklausomybė nuo jų.

Objekto trimatei rekonstrukcijai įvykdyti naudojama COLMAP atviro kodo programinė įranga. Gaunamas modelis yra eksportuojamas ir toliau analizuojamas MATLAB programinės įrangos aplinkoje aprašyta programa.

Ragina, Martynas. Influence of Feature Points Extraction Algorithms for Quality of 3D Reconstruction. Master's Final Degree Project / supervisor lect. dr. Kęstas Rimkus; Electrical and Electronics engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: feature points, 3D reconstruction, SIFT detector, structure from motion, potholes.

Kaunas, 2022. 46 p.

Summary

In this work, an analysis of SIFT feature points detector parameters influence for accuracy of 3D reconstruction is performed. The main object of interest is road surface and potholes. The first part is dedicated for analysis of literature, understanding of SIFT algorithm's working principle, it's parameters overview. 3D reconstruction methods are discussed here as well. In the second part of this work, the workflow of this work is shown. The third part is dedicated for results and their interpretation. Optimal parameter settings for SIFT algorithm are determined and accuracy of 3D reconstruction using these parameters is shown.

For 3D reconstruction of said object, and open-source software COLMAP is used. Generated model is then exported and then analyzed using a program written in MATLAB software.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros analizė	12
1.1. Foto kameros apibrėžimas	12
1.2. Vaizdo išskirtiniai taškai	13
1.3. SIFT – Scale invariant feature transform algoritmas.....	15
1.3.1. SIFT parametrai	17
1.4. Standartinis kameros modelis	18
1.5. Trimačio objekto rekonstrukcija.....	20
1.5.1. Vizualinė vienu metu vykdoma lokalizacija ir atvaizdavimas (VSLAM)	20
1.5.2. Lygiagretus sekimas ir atvaizdavimas	21
1.5.3. Struktūra iš judesio (SfM)	21
1.5.4. Mastelio neapibrėžtumas	22
1.6. Panašių tyrimų apžvalga.....	23
1.6.1. Stereo vaizdu paremtos 3D kelio duobių rekonstrukcijos tyrimas.....	23
1.6.2. Stereo vaizdu paremta kelio dangos stebėsena.....	23
1.6.3. Kelio duobių aptikimas pagal skirtuminės transformacijos ir kelio dangos modeliavimą....	23
1.6.4. Kelio duobių 3D rekonstrukcija naudojant naują vaizdo apdorojimo sistemą, bei struktūros iš judesio techniką	24
2. Metodinė dalis	25
2.1. Tiriamojo darbo eiga	25
2.2. Kokybiniai parametrai	25
2.3. SIFT parametrų įvertinimas.....	26
2.4. Kelio duobių vaizdo fiksavimo metodika.....	27
2.5. Trimačio objekto rekonstrukcija.....	28
2.6. Rekonstruoto modelio analizė MATLAB programiniu paketu.....	30
2.6.1. Modelio pasisukimo kampo pašalinimas.....	32
2.6.2. Perimetro, bei paviršiaus ploto skaičiavimas	33
2.6.3. Gylio, bei duobės tūrio skaičiavimas.....	34
2.6.4. Kalibracija	35
3. Tyrimo rezultatų dalis	36
3.1. SIFT parametrų įtaka išskirtinių taškų paieškoje	36
3.2. Kalibracijos tikslumas	39
3.3. Išskirtinių taškų įtaka rekonstrukcijai.....	40
Rezultatai ir išvados	44
Literatūros sąrašas	45
Priedai	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Išskirtinių taškų algoritmai pagal ieškomų požymių kategorijas [4]	14
2 lentelė. SIFT algoritmo parametrai [6]	17
3 lentelė. Pagrindinių SIFT detektoriaus parametrų skaitinės ribos	18
4 lentelė. Projekcijos paklaidos naudojant skirtingas kameras.....	26
5 lentelė. Išskirtinių taškų kiekio, bei sutaptintų taškų skaičius priklausomai nuo kontrasto parametro ribinės vertės.....	38
6 lentelė. Išskirtinių taškų kiekio, bei sutaptintų taškų skaičius priklausomai nuo kraštinės parametro ribinės vertės.....	38
7 lentelė. SIFT detektoriaus standartiniai ir optimalūs parametrai.....	39
8 lentelė. Šablono matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais	39
9 lentelė. Šablono matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais	39
10 lentelė. Vidutinės matuojamų dydžių paklaidos.....	40
11 lentelė. Matavimų rezultatai su standartiniais SIFT parametrais	41
12 lentelė. Matavimų rezultatai su standartiniais SIFT parametrais	41
13 lentelė. Matavimų rezultatai su blogai parinktais SIFT parametrais	41
14 lentelė. Matavimų rezultatai su blogai parinktais SIFT parametrais	42
15 lentelė. Matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais	42
16 lentelė. Matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais	42
17 lentelė. Vidutinės matavimų paklaidos.....	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. camera obscura [3].....	12
2 pav. Išskirtinių taškų galimos variacijos [4].....	13
3 pav. SIFT algoritmo išskirtinių taškų paieškos vizualizacija [5].....	15
4 pav. Supaprastintas kameros modelis [7].....	18
5 pav. Geometrinis vaizdo projekcijos atvaizdavimas [8].....	19
6 pav. Stereo vaizdo geometrijos priklausomybė vaizdo projekcijose [9].....	20
7 pav. projekcijos paklaidos pavyzdys [17].....	26
8 pav. SIFT parametrų priklausomybės nustatymo algoritmas.....	27
9 pav. Duobės vaizdo fiksavimo metodika.....	28
10 pav. COLMAP programinio paketo grafinė aplinka.....	29
11 pav. Sutaptintų išskirtinių taškų atvaizdavimas.....	29
12 pav. (a) kairėje – rasti etaloninio modelio taškai, (b) dešinėje – modelio retoji rekonstrukcija... 30	
13 pav. Rekonstruoto modelio analizei skirtos programos algoritmas.....	31
14 pav. Nepasuktas rekonstruotas trimatis modelis.....	31
15 pav. Pasuktas rekonstruotas duobės trimatis modelis.....	33
16 pav. Etaloninio modelio duobės perimetro atvaizdas grafike.....	34
17 pav. 3D rekonstrukcija tūrio skaičiavimui.....	35
18 pav. Rastų išskirtinių taškų kiekio priklausomybė nuo kontrasto perimetro ribinės vertės.....	36
19 pav. Rastų išskirtinių taškų kiekio priklausomybė nuo kraštinės perimetro ribinės vertės.....	37
20 pav. Kairėje – sutaptinti išskirtiniai taškai, kai parametrai yra tinkami; dešinėje – kai parametrai nėra tinkami.....	38
21 pav. Viršus: kairėje – perimetras, kai parametrai yra blogi, dešinėje – parametrai standartiniai; apačioje – nauji parametrai.....	43

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

SfM – structure from motion (liet. *struktūra iš judesio*);

DoG – skirtuminis Gauso filtras;

RGB – raudona, žalia, mėlyna spalvų kodavimo gama;

HSV – atspalvio, sodrumo reikšmės kodavimo gama;

PTAM – parallel tracking and mapping (liet. *lygiagretus sekimas ir vaizdavimas*)

VSLAM – visual simultaneous localization and mapping (liet. *vienalaikis lokalizavimas ir kartografavimas*)

CT – contrast threshold (liet. *kontrasto ribinė vertė*)

ET – edge threshold (liet. *kraštinės ribinė vertė*)

Įvadas

Duobės yra dideli kelio paviršiaus konstrukciniai gedimai. Kelio dangą veikia daugybė kelio eroziją didinančių veiksnių. Pagrindinė priežastis jų atsiradimui yra paviršiaus susitraukimą, bei išsiplėtimą lemiantys atmosferiniai reiškiniai. Didžiausią įtaką, kelio konstrukcijos erozijai turintis veiksnys yra vandens prasiskverbimas pro kelio dangą. Vandeniui keliaujant į gruntinius vandenis, žemės paviršius esantis po kelio danga, yra išplaunamas, taip sudarant oro kišenes po kelio danga. Kelią veikiant didelėms transporto apkrovoms, šios paveiktos vietos laikui bėgant ištrupa. Taip pat vandeniui užšalus, dėl vandens fizikinių savybių virtus ledu, padidėja jo tūris. Ledas deformuoja kelio konstrukciją. Jam ištirpus, lieka ertmės, silpninančios kelio dangos paviršių.

Siekiant užtikrinti eismo saugumą, nuolatinė kelio dangos priežiūra yra itin svarbi. Iki šiol, kelio dangos defektai buvo stebimi paskirtų inspektorių, bei kelių statybos inžinierių. Tačiau vien Lietuvoje, 2020 metų, Lietuvos automobilių kelių direkcijos duomenimis, valstybinės reikšmės kelių ilgis yra 21,2 tūkst. km. 2021 metais, buvo planuojama suremontuoti 150 km kelių ruožų. Tuo tarpu, tais pačiais metais, planuota patikrinti 1000 km kelių kokybę [1]. Pasak Amerikos automobilių asociacijos atlikto tyrimo, kasmet amerikiečiai išleidžia net 3 mlrd. dolerių, automobilių remontui, dėl kelio duobių sukeltų gedimų [2]. Užtikrinti pakankamą žmogiškąjį resursą visos transporto sistemos stebėsenai yra labai sudėtinga. Be to, įvairūs analitiniai skaičiavimai skirstant tokių defektų remontui skirtus resursus labai priklauso nuo juos atliekančio personalo patirties, bei įgūdžių. Šiam žmogiškajam kintamajam pašalinti, bei padaryti kelių remontą efektyvesniu, vis dažniau naudojamos automatizuotos duobių aptikimo sistemos, leidžiančios efektyviai ir objektyviai atpažinti ir lokalizuoti kelio nelygumus. Tokios sistemos ne tik užtikrina personalo saugumą darbo metu, bet ir sumažina darbo krūvį. Be to, atsiranda galimybė kaupti labai tikslius duomenis apie kelio būklę, bei jos kaitą laike. Tokiu būdu gali būti vertinami transporto srauto pokyčiai kelyje, taip pat atsiranda galimybė tiksliau numatyti būsimų remontų apimtį, bei laiką. Pastarajame dešimtmetyje, buvo pradėtos tirti įvairios technologijos, skirtos kelio dangos inspekcijai atlikti automatizuotu būdu. Pirmosios tokios technologijos, buvo paremtos vibracijas matuojančiais jutikliais, automobiliui judant kelyje. Tačiau toks kelio būklės vertinimas yra itin neatsparus matavimuose pasitaikantiems įvairiems triukšmams ir yra itin sunku įvertinti tikrąją kelio būklę.

Šiuo metu, lazerinis kelio dangos skenavimas yra pagrindinė šios srities technologija. Tačiau nors atlikti matavimai lazeriais yra universalūs, bei itin tikslūs ir ši technologija nėra itin patraukli dėl ypatingai didelės eksploataavimo, bei ilgalaikės priežiūros kainos. Dėl šios priežasties, mokslininkai pradėjo skirti didesnę dėmesį skaitmeniniams fotoaparatus, stereo vaizdo pritaikymui, kelio dangos trimatei rekonstrukcijai, bei jos kokybiniais parametrais tirti. Šiame darbe, trimatės rekonstrukcijos pagrindu laikomas struktūros iš judesio (angl. *Structure from motion*) metodas. Ši technika naudoja vienos foto kameros fiksuojamus vaizdus, kintant jos padėčiai erdvėje, tokiu būdu gaunant vaizdo poslinkį, kuris gali būti priskiriamas geometrinei priklausomybei. Svarbiausia, vaizdo kameromis paremtų trimatės rekonstrukcijos sistemų, dalis yra vaizdo detalių supratimas kompiuteriniais dydžiais. Šios detalės yra aprašomos išskirtiniais taškais (angl. *feature points*). Priklausomai pagal tai, kokios vaizde esančios detalės yra atpažįstamos algoritmo ar koks jų kiekis yra randamas, tiesiogiai turi įtaką ir rekonstruoto vaizdo trimačiui modeliui. Kadangi atskirai rekonstrukcijos metodai, bei išskirtinių taškų detektoriai yra gana plačiai išanalizuoti, šiame darbe bus tiriamas ryšys tarp šių technikų ir kokią kokybinę įtaką turi išskirtinių taškų algoritmų parametrai rekonstruotam trimačiam modeliui.

Darbo tikslas – atlikti kokybinių trimatės rekonstrukcijos parametrų priklausomybės nuo SIFT išskirtinių taškų detektoriaus parametrų tyrimą.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą. Aprašyti SIFT metodo veikimo principą ir populiariausias trimatės rekonstrukcijos technikas.
2. Išskirti galimus kokybinius parametrus trimatės rekonstrukcijos tikslumui nustatyti.
3. Nustatyti SIFT išskirtinių taškų detektoriaus parametrų dinamiką analizuojant kelio dangos paviršiaus nuotraukas. Rasti optimalius nustatymus.
4. Nustatyti priklausomybę tarp SIFT detektoriaus parametrų dydžių ir rastų/sutapdintų išskirtinių taškų kiekio. Rasti geriausius parametrų nustatymus duotam objektui įvertinti.
5. Sugeneruoti kelio dangos paviršiaus 3D rekonstrukciją. Realizuoti trimačio modelio analizei skirtą programinę įrangą.
6. Įvertinti tyrime gautus rezultatus pagal aprašytus trimačio objekto vertinimui skirtus kokybinius parametrus.

Darbo struktūra:

Šį darbą sudaro trys pagrindinės dalys:

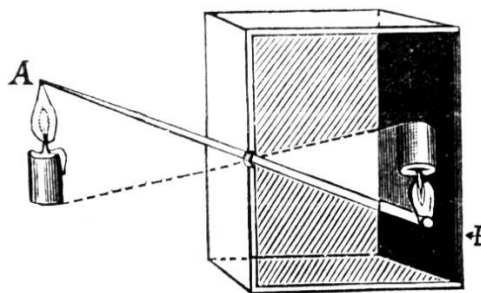
- Pirmajame šio darbo skyriuje, apžvelgiami su tema susiję vaizdo apdorojimo metodai, išskirtinių taškų detektorius SIFT, jo veikimo principas ir pagrindiniai parametrai, bei trimačio vaizdo rekonstrukcijos technikos. Aprašomi išskirtinių taškų radimo algoritmų veikimo principai ir juos valdančių parametrų įtaka rezultatui. Taip pat apžvelgiami kitų autorių atlikti tyrimai panašia tema.
- Antrasis skyrius sudarytas iš metodinės tyrimo dalies įgyvendinimo aprašymo. Šioje dalyje aprašomas trimačio modelio sudarymas, bei 3D modelio analizei skirtos programinės įrangos paruošimas. Apibrėžiami kokybiniai parametrai, reikalingi tyrimui vykdyti.
- Trečiasis skyrius yra skirtas rezultatų pateikimui ir jų interpretacijai. Šiame skyriuje pateikiamos išskirtinių taškų algoritmų priklausomybės keičiant jų parametrus. Pateikiamos rekomendacijos optimalių detektoriaus parametrų parinkimui, analizuojant kelio nelygumus. Pateikiami trimatės rekonstrukcijos kokybinių parametrų pokyčiai kintant išskirtinių taškų detektoriaus parametrams.

1. Literatūros analizė

Pirmajame skyriuje atliekama esamos literatūros analizė. Pateikiami su tyrimu susijusių objektų apibrėžimai. Paaiškinami SIFT išskirtinių taškų detektoriaus veikimo principai, bei iškeliami hipotezė, kurie parametrai turi daugiausiai įtakos kelio dangos vaizdų analizės kokybei. Taip pat aptariamos trimatės rekonstrukcijos galimybės ir technikos.

1.1. Foto kameros apibrėžimas

Fotoaparatas – tai optinis instrumentas, skirtas erdvinių vaizdų fiksavimui plokštumoje. Tai gali būti tik mechanika paremti aparatai arba elektroniniai įtaisai, tačiau paprasčiausias apibrėžimas yra toks – tai yra šviesai nepralaidi dėžutė su anga, kuri leidžia patekti šviesai ant, viduje esančio, foto jautraus paviršiaus ar elektroninio jutiklio plokštumos. Pirmieji fotoaparatai pasirodė 18 – 19 amžiuje, tačiau lot. *camera obscura*, kaip pateikta 1 paveikslėlyje, arba kitaip tamsiojo kambario reiškinys buvo nagrinėjamas filosofų jau 4 - tame amžiuje prieš mūsų erą [3]. Šiuolaikiniuose fotoaparatuose, optinių lęšių pagalba yra suformuojamas spindulys. Diafragma keičiamas objektyvo angos skersmens dydis, tokiu būdu reguliuojamas ant foto elemento krentančios šviesos kiekis. Krentančios šviesos kiekis taip pat yra reguliuojamas objektyve valdoma sklende (angl. *shutter*), kuri būna atidaroma fotografijos metu. Priklausomai nuo atviro objektyvo trukmės, šviesos kiekis yra didesnis arba mažesnis. Tai reiškia, kad vaizdas suformuotas fotografijos metu bus arba šviesesnis arba tamsesnis. Skaitmeninė fotografija lyginant su tradicine fotografija skiriasi tuo, kad formuojamas šviesos srautas krenta ne ant foto jautrios cheminės juostelės, o ant elektroninio puslaidininkinio elemento. Tai reiškia, kad ir visi su galutiniu vaizdu susiję parametrai priklauso ne nuo cheminių kintamųjų, o fotoaparato elektronikos charakteristikų. Visi šie kintamieji derinami tam, kad suformuotas vaizdas būtų kuo aiškesnis ir atitiktų žmogaus akimi matomą vaizdą.



1 pav. camera obscura [3]

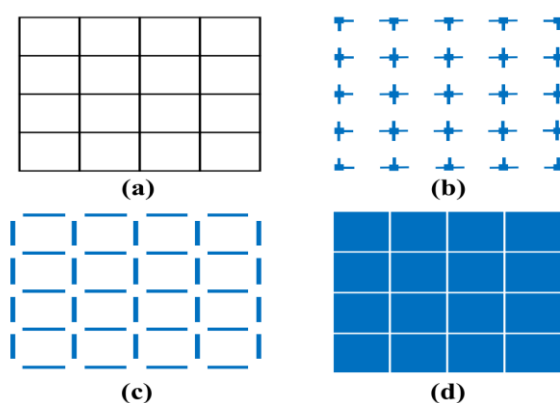
Vienas svarbiausių fotoaparato parametras yra židinio nuotolis. Tai yra atstumas tarp lęšio centro ir taško, kuriame optinį lęšį kirtusi šviesa, susikerta viename taške. Šis dydis nurodo fotoaparato šviesos sklaidos dydį, kas reiškia, kad esant didesniam židinio nuotoliui, plokštumoje sukurtas vaizdas bus didesnis.

Skiriamoji geba – vaizdo raiška arba rezoliucija, reiškianti pikselių skaičių viename ilgio vienete. Esant didelei skiriamajai gebai, suformuotas vaizdas yra detalesnis, bei tikslesnis. Skiriamoji geba yra aprašoma kadro ilgio, bei pločio sandauga, kaip pavyzdžiui 1920x1080, kas reiškia, kad ekrane ar jutiklio elemento plotyje, bei ilgyje telpa atitinkamai 1080 ir 1920 pikselių.

1.2. Vaizdo išskirtiniai taškai

Lokalūs išskirtiniai vaizdo taškai (angl. *local image features*), dar kitaip vadinami ypatingi taškai arba lokalūs vaizdo požymiai yra taškai vaizde, unikalūs apibrėžtomis savybėmis lyginant su greta esančiais taškais. Tokie taškai dar įvardijami kaip regionai, kampai ar briaunos. Žemiau pateiktame 2 paveikslėlyje pavaizduoti pavyzdžiai tokių išskirtinių taškų. Išskirtiniais taškais yra aprašomos vaizde esančios išskirtinės detalės, kurios nusako matomų objektų geometrinės detales, tokiu būdu įvardijant vaizde esantį turinį. Išskirtiniai taškai yra aprašomi skaitmeniniais deskriptoriais (angl. *descriptor*), kurie unikalčiai ir kompiuteriui suprantama kalba aprašo šiuos vietinius požymius.

Kompiuterinėje regoje, išskirtiniai taškai yra pamatinė dalis įgyvendinant tokias aplikacijas kaip objektų sutapdinimas, objektų sekimas, vaizdo stabilizacija, vaizdų suliejimas ir daugelyje kitų disciplinų.



2 pav. Išskirtinių taškų galimos variacijos [4]

Išskirtiniai taškai aprašo dominantį regioną kadre, kuris priklauso vaizde esančiam objektui. Tokių regionų aptikimo galimybės yra ribotos ir suprasti visas matomas detales yra ypatingai sudėtinga, kadangi naudojami algoritmai remiasi vaizdo taškų (angl. *pixel*) intensyvumo skirtumu tam, kad lokalizuotų deskriptoriaus aprašomus požymius. Tinkamo deskriptoriaus algoritmo parinkimas, bei jo parametrų nustatymas yra ypatingai svarbus norint užtikrinti specifinės užduoties vykdymo efektyvumą.

Išskirtiniai taškai turi tokias savybes [4]:

1. Išskirtinumas – tiriamo regiono sudedamosios dalys – pikseliai, turi stipriai skirtis atspalvio intensyvumu.
2. Lokalumas – išskirtiniai taškai turi būti priskirtini geometrinei padėčiai kadre.
3. Kiekis – norint pakankamai tiksliai aprašyti tiriamą objektą, pageidautina turėti kuo daugiau naudingų jį aprašančių taškų.
4. Tikslumas – išskirtiniai taškai turi būti aprašomi tiksliai ir atpažįstami keičiant jų padėtį, dydį, bei pasisukimą kadre.
5. Efektyvumas – detektoriais aptinkami išskirtiniai taškai turi būti aptinkami greitai.
6. Pakartojamumas – viena svarbiausių savybių, kuri lemia, ar aptiktas išskirtinis taškas gali būti atrastas kitame vaizdo kadre. Tai reiškia, kad išskirtinio taško aprašymas nesikeičia kintant kadrui.
7. Invariantiškumas – tai detektoriaus geba, tiksliai sudaryti matematinį modelį taškams atsižvelgiant į jų mastelio, pasukimo kampo pokyčius ir kitas galimas deformacijas.

8. Patikimumas – esant įvairiems trikdžiams, kaip pavyzdžiui vaizde esantiems triukšmams, vaizdo išsiliejimui ir t.t., detektorius negali būti per daug jautrus ir tokios vaizdo deformacijos neturi paveikti išskirtinių taškų aprašymo.

Visos šios savybės yra tarpusavyje priklausomos ir dažnai priklausomai nuo parinktų parametru vienos savybės yra stipriau išreiškiamos negu kitos. Kadangi pakartojamumas yra pamatinė savybė išskirtinių taškų radime, pagerinus vieną iš aukščiau aprašytų savybių, bus pagerintas ir pakartojamumo rodiklis. Tačiau dažnai yra taip, kad gerinant vienas savybes, kitos tampa nebe tokios geros. Pavyzdžiui, efektyvumas, bei išskirtinių taškų rastas kiekis yra savybės turinčios atvirkštinę tarpusavio priklausomybę, kas reiškia, kad aptikus daugiau išskirtinių taškų, taip pat pakyla ir algoritmo skaičiavimo laikas.

Įvairioms kompiuterinės regos aplikacijoms yra naudojami skirtingi išskirtinių taškų atpažinimo algoritmai. Taip yra todėl, kadangi šiuo metu naudojami išskirtinių taškų aptikimo algoritmai nėra pakankamai efektyvūs skiriantis vaizdų apšviestumui, kontrastui, vaizdo kokybei ir t.t. [4]

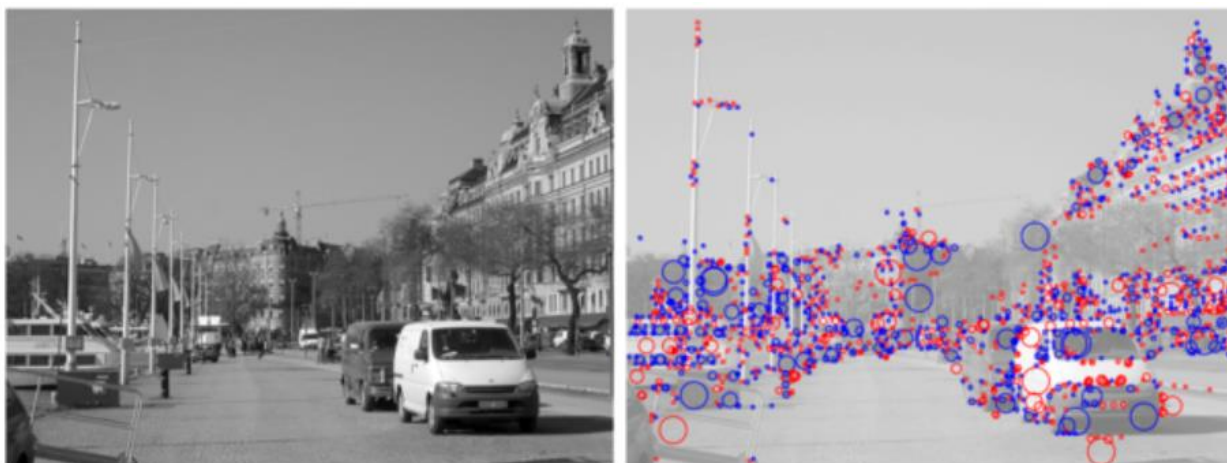
Išskirtinių taškų detektoriai išskiriami pagal jų svarbiausias aptikimo savybes. Tai yra kraštinės (angl. *edges*), kuriomis aprašomi pikseliai, kurių intensyvumo lygis turi staigų pokytį, lyginant su aplinkui esančiais taškais. Kampai (angl. *corners*), kuriais yra aprašomi kelių kraštinių susikirtimo vieta lokaliame regione. Bei regionai (angl. *blobs*), kurie aprašo panašumų, savo intensyvumu, bei kitomis savybėmis turinčius tam tikro dydžio regionus. Žemiau esančioje 1 – oje lentelėje yra pateikta dalis algoritmu, kurie suskirstyti į kategorijas pagal šias jų savybes. Literatūroje yra išskiriamas SIFT algoritmas kaip ypatingai invariantiškas, bei turintis kitas kokybines, anksčiau aprašytas savybes. Dėl to šiame darbe SIFT algoritmui teikiamas didžiausias dėmesys.

1 lentelė. Išskirtinių taškų algoritmai pagal ieškomų požymių kategorijas [4]

Kategorija	Klasifikacija	Išskirtinių tašku aptikimo algoritmas
Kraštinės	Diferencijuojantys	Sobel, Canny
Kampai	Paremti gradiento skaičiavimu	Harris, KLT, Shi-Tomasi, LOCOCO,
Kampai	Paremti šablono taikymu	FAST, AGAST, BRIEF, SUSAN, FAST-ER
Kampai	Paremti kontūrų radimu	ANDD, DoG-curve, ACJ, Hyperbola, fitting
Kampai	Apmokomi algoritmai	NMX, BEL, Pb, MS-Pb, gPb, SCG, SE, tPb, DSC, Sketch Tokens
Regionai	Paremti dalinėmis diferencialinėmis lygtimis	SIFT, SURF, CenSurE, LoG, DoG, DoH, Hessian, KAZE, Wade.
Regionai	Paremti šablonų taikymu	ORB, BIRSK, FREAK
Regionai	Segmentaciniai	MSER, IBR, EBR, MFD, FLOG, BPLR

1.3. SIFT – Scale invariant feature transform algoritmas

Šis deskriptorius ir su juo susiję vaizdo deskriptoriai naudojami daugelyje kompiuterinės regos sričių, susijusių su taškų atitikimu tarp skirtingų trimatės scenos vaizdų ir vaizdu pagrįstu objektų atpažinimu. SIFT deskriptorius yra invariantiškas vaizdo srities transformacijoms - vertimui, pasukimui ir mastelio keitimui, taip pat atsparus vidutinėms perspektyvos transformacijoms ir apšvietimo pokyčiams. Eksperimentais įrodyta, kad SIFT deskriptorius yra labai naudingas praktikoje, kai reikia suderinti vaizdus ir atpažinti objektus realiomis sąlygomis. Pradžioje SIFT deskriptorių sudarė pilkos spalvos vaizdo išskirtinių taškų aptikimo metodas, pagal kurį buvo kaupiama vaizdo intensyvumo vietinių gradientų krypčių statistika, kad būtų galima apibendrintai aprašyti vietines vaizdo struktūras aplink kiekvieną išskirtinį tašką, siekiant, kad šis deskriptorius būtų naudojamas atitinkamiems skirtingų vaizdų išskirtiniams taškams parinkti. Vėliau SIFT deskriptorius taip pat buvo taikomas tankiuose tinkluose (angl. *Dense SIFT*), kurie, kaip paaiškėjo, užtikrina geresnius rezultatus sprendžiant tokias užduotis, kaip objektų kategorizavimas, tekstūrų klasifikavimas, vaizdų lyginimas ir biometrija. SIFT deskriptorius taip pat buvo patobulintas, pritaikant spalvotų vaizdų analizei, bei 2+1-D erdvinio vaizdo analizei. [5]



3 pav. SIFT algoritmo išskirtinių taškų paieškos vizualizacija [5]

Pirmasis SIFT deskriptorius rėmėsi vaizdo spalvos intensyvumu aplink išskirtinius taškus. Šie išskirtiniai taškai gaunami iš Gauso skirtumų (angl. *difference of Gaussians*), toliau DoG, mastelio erdvės ekstremumų Gauso skirtumų piramidėje. Gauso piramidė gaunama iš įvesties vaizdo, ji pakartotinai išlyginant ir išskiriant taškus (angl. *sub-sampling*), o skirtuminė Gauso piramidė, gaunama suskaičiavus skirtumą tarp gretimų Gauso piramidžių. Tada iš taškų, kuriuose Gauso skirtumo reikšmės yra didžiausios, vaizdo srities erdvinio koordinatų ir piramidės mastelio lygmens atžvilgiu, nustatomi išskirtiniai taškai. Ketvirtame paveikslėlyje parodyti gauti išskirtiniai vaizdai nespalvotame vaizde panaudojus Laplaso mastelio erdvės ekstremumus. Apskritimai nurodo išskirtinių taškų nustatytą dydį erdvėje. Raudona spalva apibūdina šviesius regionus, mėlyna tamsius. Lowe'o pasiūlytas Gauso skirtumų metodas, skaičiavimo požiūriu, yra efektyvus būdas apskaičiuoti tokių Laplaso išskirtinių taškų aproksimacijas. Tačiau 2003 metais Lindebergas ir Bretzneris pasiūlė kitą būdą, kaip efektyviai aptikti Laplaso mastelio erdvės ekstremumus tam, kad analizę galima būtų atlikti realiu laiku. Šis metodas remiasi hibridine piramide.

Apibendrinant, SIFT detektoriaus pagrindinė veiksmų seka gali būti padalinta į žemiau pateikiamus 4 pagrindinius etapus išskirtinių taškų paieškoje [4]:

- Mastelio erdvės ekstremumų aptikimas: Pirmasis žingsnis - aptikti ekstremumus, ieškant jų visuose vaizdo dydžiuose ir vietose. Tai atliekama naudojant DoG filtrą, kad būtų galima nustatyti potencialius interesų taškus, kurie nekinta mastelio ir orientacijos atžvilgiu.
- Pagrindinių taškų lokalizavimas: Kiekvienai kandidato vietai nustatomas detalus modelis, kad būtų nustatyta jo vieta ir mastelis. Pagrindiniai taškai yra atrenkami pagal jų stabilumo rodiklius.
- Orientacijos priskyrimas: Naudojant vietines vaizdo gradiento kryptis, kiekvienai rakto taško vietai priskiriama viena ar daugiau orientacijų.
- Raktinių taškų deskriptoriai: Vietiniai vaizdo gradientai matuojami pasirinktu masteliu regione aplink kiekvieną rakto tašką, kur sudaromas 128 elementų vektorinis deskriptorius.

Išskirtinių taškų deskriptoriau yra vėliau naudojami sutapdinant skirtinguose vaizduose rastus išskirtinius taškus. Tai yra pagrindinis elementas nusakantis objektą ir yra itin svarbus matmuo objektų geometrijos atpažinime, kur yra lyginamas su kitais, duomenų bazėje kaupiamais deskriptoriais, išgautais iš anksčiau mokomųjų vaizdų. Geriausias kiekvieno deskriptoriaus atitikmuo randamas nustatant jo artimiausią atitikmenį. Jei atstumo santykis tarp artimiausio ir antrojo artimiausio kaimyno yra mažesnis už slenkstinį, atitikimas yra teigiamas. Priešingu atveju, atitiktis yra nepriimtina ir išskirtinis taškas nėra registruojamas.

Nepaisant to, kad SIFT raktų taškai yra atsparūs keliems veiksniams (pasukimui, mastelio keitimui ir kt.), jie nėra atsparūs stipriems apšvietimo svyravimams.

Ekhlal Halaf Gbash ir Suha Mohammed Saleh atliko tyrimą kaip galima būtų pagreitinti SIFT detektorių, tikrinant mažesnę kiekį taškų, panaudojus Fast Approximate Nearest Neighbor algoritimą. Siūloma sistema susideda iš keturių žingsnių [5]:

- Išankstinis apdorojimas (angl. pre-processing) – šiuo žingsniu analizuojamo vaizdo dominanti informacija yra išryškinama ir sudaromas aiškesnis dominančios informacijos vaizdas. Šiame etape turimas vaizdas konvertuojamas iš RGB į HSV sistemą. Taip pat pritaikomas Gauso filtras, atrenkamas dominantis regionas.
- Random sample consensus (RANSAC) – turint dominantį regioną, nustatoma jo struktūra ir priskiriama ieškomo objekto kategorijai.
- SIFT – gautam vaizdui atliekama SIFT detekcija. Pagal ankstesniame žingsnyje gautą informaciją apie dominantį regioną, atrenkami išskirtiniai taškai priklausantys tai kategorijai. Šis žingsnis matomas 6 paveikslėlio pirmame ir antrame vaizde.
- Atliekama aproksimacija – nustatomi taškai esantys per daug nutolę nuo dominančio regiono, taip eliminuojant netikslumus. Šis žingsnis matomas 6 paveikslėlio trečiame vaizde.

Norint užtikrinti geriausią rezultatą, verta atkreipti į šiuos svarbius aspektus ruošiant vaizdus rekonstrukcijai:

- Kameros fiksuojami objektai turi būti gausios tekstūros objektai. Reikėtų vengti mažai detalių turinčių objektų, pvz. balta siena ar tuščias stalas, kadangi išskirtinių taškų algoritmai tokiuose paviršiuose randa itin mažai galimų išskirtinių taškų. Taip pat reikėtų vengti blizgių paviršių.
- Fotografuojami vaizdai turi būti fiksuojami panašiomis sąlygomis. T.y. vaizdų sekoje esantys objektai turi būti apšviesti vienodai. Taip padidinama tikimybė teisingai sutaptinti daugiau išskirtinių taškų vaizdų sekoje. Taip pat reiktų vengti didelių dinaminių diapazonų nuotraukose (nuotrauka daryta prieš saulę arba nuotrauka fotografuota pro langą).
- Analizuojami vaizdai sekoje turi būti persidengiantys, todėl labai svarbu turėti kuo daugiau tarpusavyje persidengiančių vaizdų. Tačiau nereikėtų analizuoti per daug vaizdų, kadangi tokiu atveju naudojamas didesnis skaičiavimo resursas ir prailgėja rekonstrukcijos laikas. Jeigu analizuojamas yra vaizdo įrašas, dažnu atveju verta sumažinti kadrų skaičių per sekundę.
- Fotografuojama turi būti iš skirtingų apžvalgos taškų. Vaizdai neturėtų būti fiksuojami tik pasukant fotoaparata. Tačiau taip pat, kaip minėta aukščiau, privalo būti pakankamas kiekis panašioje padėtyje esančių vaizdų.

1.3.1. SIFT parametrai

Išskirtinių taškų paieškos proceso valdymas keičiamas jį aprašančiais parametrais. Kai kurie iš šių parametrų pateikti 2 lentelėje. Galima išskirti tris pagrindinius parametrus, kurie turi didžiausią įtaką išskirtinių taškų aptikimo kiekiui, bei aptinkamų taškų kokybei. Tai yra kontrasto slenkstinė riba, kraštinės aptikimo slenkstinė riba, bei taškų tapatumo slenkstis. SIFT algoritmu rasti išskirtiniai taškai pirmiausia išskiriami pagal vietinius ekstremumus DoG mastelio erdvėje. Tuomet, kontrasto, bei kraštinės slenkstiniais parametrais yra pašalinami mažą kontrastingumą turintys arba silpnai apibrėžtas kraštines nusakantys taškai. Sutapdinimo etape, tapatumo slenkstinė verte nurodo pašalinti dviprasmiškus, bei mažą atitikties galią turinčius taškus.

2 lentelė. SIFT algoritmo parametrai [6]

Parametrai	Paaiškinimas
Oktava	Oktavų sluoksnių skaičius
Sigma	Sigma vertė pradiniam Gauso lygties lyginimui
Kontrasto riba	Išskirtinio taško atspalvio intensyvumo riba lyginant su aplinkiniais taškais
Kraštinės riba	Principinių kreivių požymių santykio slenkstis
Deskriptoriaus amplitudės riba	Deskriptoriaus vektoriaus maksimali amplitudinė vertė
Išskirtinio taško vektorius	Išskirtinio taško maksimalus vektoriaus dydis
Sutapdinimo santykis	Santykis tarp arčiausio ir antro arčiausio taško sutapdinimo metu

Mažai kontrastingame vaizde, aptinkami išskirtiniai taškai gali būti įtakojami vaizde esančių triukšmų, todėl tokie taškai turi būti nepriimtini. Išskirtinio taško priimtumas įvertinamas sulyginus

absoliučiąją DoG skalės erdvės aukščiausią vertę su nurodyta kontrasto ribine verte. Dydziai nesiekiantys slenkstinės ribos yra nepriimtini, o jiems priklausomi išskirtiniai taškai atmetami. Tai reiškia, kad kuo kontrasto ribinė vertė yra didesnė – tuo mažiau išskirtinių taškų bus randama. Tuo tarpu, didinant kraštinės slenkstinę ribą, aptinkamų išskirtinių taškų skaičius mažėja [6].

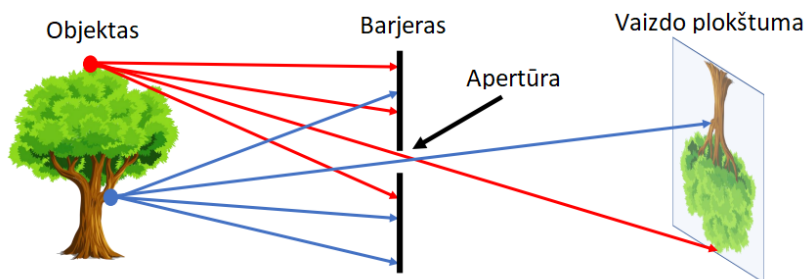
Standartinės SIFT detektoriaus MATLAB aplinkoje pagrindiniai parametrai yra pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Pagrindinių SIFT detektoriaus parametrų skaitinės ribos

Parametras	Dydis	Ribos
Kontrasto riba	0,0133	$0 \leq X \leq 1$
Kraštinės riba	10	≥ 1
Oktava	3	≥ 1
Sigma	1,6	$1 \leq X \leq 2$

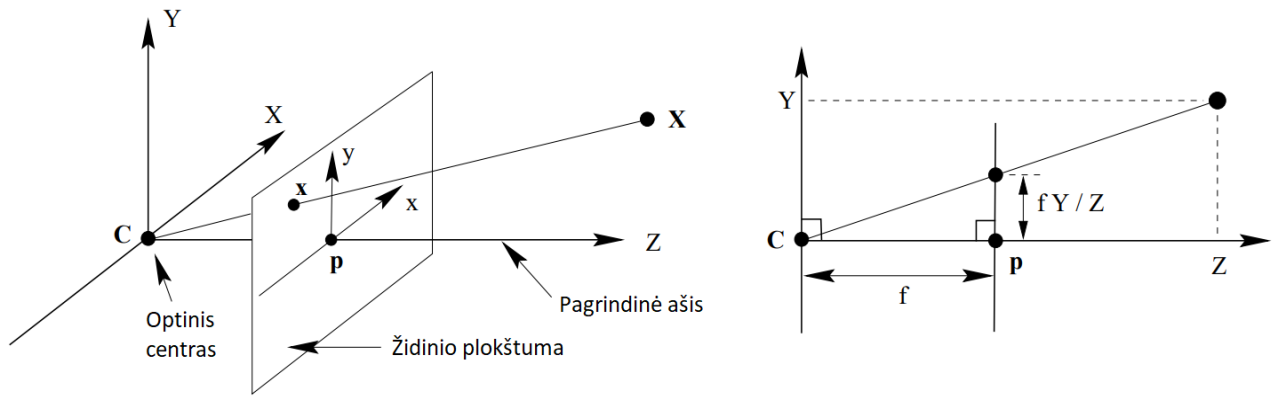
1.4. Standartinis kameros modelis

Standartinis kameros modelis – tai geometrinis ryšys tarp taškų trimatėje erdvėje ir jų projekcijų dvimatėje plokštumoje arba nuotraukoje. Išskiriami keli pagrindiniai modeliai – taškinis (angl. pinhole), žuvies akis (angl. fish-eye lense) ir kiti. Šiame skyriuje aptariamas paprasčiausias ir dažniausiai naudojamas kameros modelis – taškinis kameros modelis. Tai yra toks modelis, kuriame yra nagrinėjamas objektas, vaizdo plokštuma, bei tarp jų esanti plokštuma turinti nedidelę angą dar vadinama apertūra. Nesant šiam barjerui, vaizdo plokštumoje būtų atvaizduoti šviesos vektoriai visomis kryptimis. Apertūros paskirtis – atskirti pašalinius šviesos spinduliuotės vektorius ir praleisti tik ribotą kiekį ir ribotos krypties vektorius pro angą barjere. Tokiu būdu vaizdo plokštumą pasiekę vektoriai tiksliai atkartoja objektą. Remiantis šiuo modeliu, kuo mažesnė anga – tuo tikslesnis [7].



4 pav. Supaprastintas kameros modelis [7]

Pagal 5 – tame paveikslėlyje pateiktą koordinacių sistemą, sakoma, kad Z koordinacių ašis yra lygi f, dar vadinama vaizdo (nuotraukos) plokštuma arba židinio plokštuma. Šio kameros modelio sistemoje, taškas $(X, Y, Z)^T$ koordinacių sistemoje yra atvaizduojamas vaizdo plokštumoje $(\frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z}, f)^T$. Koordinacių sistemos centras vadinamas optiniu centru.



5 pav. Geometrinis vaizdo projekcijos atvaizdavimas [8]

Kamera yra aprašoma dvejais pagrindiniais parametrais: vidiniais (angl. *intrinsic*), bei išoriniais (angl. *extrinsic*). Pirmieji, aprašo kameros optinius parametrus, išoriniai – nuotraukos orientaciją, bei poziciją erdvėje. Kameros parametras yra išreiškiamas matrica K , kuri aprašo kameros charakteristiką. Šioje matricoje nėra atsižvelgiama į galimus vaizdo iškraipymus [9].

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Čia f_x , f_y – židinio nuotolio parametrai, nusakantys atstumą tarp objektyvo, objekto, bei vaizdo plokštumos. Paprastai tariama, kad abu šie parametrai yra vienodo dydžio, tačiau dėl objektyvo keliamų iškraipymų, klaidingos kameros kalibracijos ar rezoliucijos keitimo, šie parametrai gali kisti. Kintamieji x_0 ir y_0 arba taškas p , nurodo vaizdo plokštumos centrą. s kintamasis aprašo iškraipymo parametras, tačiau dažniausiu atveju jis yra lygus 0 [9].

Norint susieti kameros koordinatinių sistemą su trimate erdve, reikalingas išorinis parametras, reikalingas transformacijai. Ši transformacija aprašoma žemiau pateikta matrica P , kuria apskaičiuojama kameros koordinatė. Ją sudaro posūkio matrica R , bei pagalbinis vektorius T (angl. *translation vector*) [9].

$$P = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrica R aprašomas pasisukimas turi tris galimas posūkio ašis, vadinamas Eulerio ašimis [9].

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

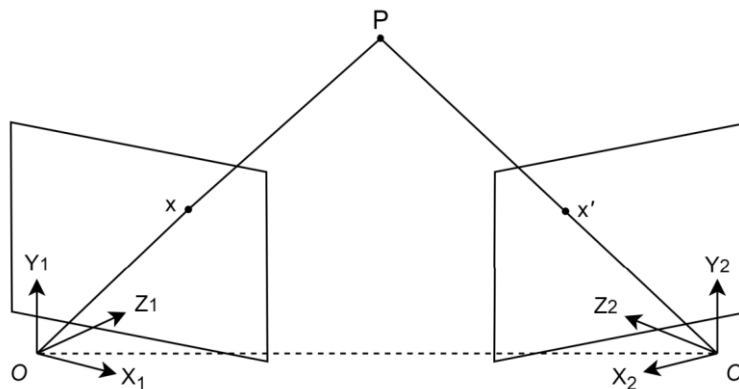
$$R_z(\delta) = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\sin\delta & 0 \\ \sin\delta & \cos\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tik žinant kiekvienos ašies posūkį, galima apskaičiuoti bendrą posūkio vertę R [9]:

$$R = R_x(\varphi) * R_y(\theta) * R_z(\theta)$$

1.5. Trimačio objekto rekonstrukcija

Trimačio modelio rekonstrukcija, tai toks modelio sukūrimas, kuriame panaudojus dvimačius vaizdus sukuriama geometrinė priklausomybė tarp analizuojamų vaizdų ir sujungiama į taškus trimatėje erdvėje. Yra ne vienas būdas apskaičiuoti trimačiui vaizdai. Vienos pusės (angl. *single-view*) vaizdo rekonstrukcijoje, kameros padėtis objekto atžvilgiu nekinta, tačiau objekto geometrinės detalės išryškinamos keičiantis ant jo krentančiais šviesai. Pagal tai, kaip krisdami šešėliai išryškina įvairias objekto detales, sutapdinus vaizdų seką, gaunamas objekto trimatis modelis. Šis metodas yra ribotas tuo, kad rekonstruotina yra tik viena analizuojamo objekto pusė. Šiuo atveju, įvairių pusių (angl. *multi-view*) vaizdo rekonstrukcija šį trūkumą pašalina. Tokiai rekonstrukcijai yra naudojamos daugelyje padėčių erdvėje darytos nuotraukos. Atrinkus nuotraukose esančius išskirtinius taškus ir juos sutapdinus, persidengiantys taškai sujungiami į objektą trejose ašyse. Taip pat yra abu šiuos metodus jungiantis hibridinis rekonstrukcijos metodas, kuris yra aprašomas pagrindinėmis šių metodų savybėmis. Tačiau hibridinis, bei vienapusis rekonstrukcijos metodai nusileidžia įvairių pusių rekonstrukcijos metodui savo sudėtingumu, todėl dažnu atveju rekonstrukcijai yra naudojamas pastarasis metodas. Šiam rekonstrukcijos modeliui priskiriami retojo (angl. *sparse cloud*) taškų debesies sudarymo metodas, bei tankaus (angl. *dense cloud*) taškų debesies sudarymo metodas [9].



6 pav. Stereo vaizdo geometrijos priklausomybė vaizdo projekcijose [9]

1.5.1. Vizualinė vienu metu vykdoma lokalizacija ir atvaizdavimas (VSLAM)

Vizualinė vienu metu vykdoma lokalizacija ir atvaizdavimas (angl. *visual simultaneous localization and mapping*) (VSLAM) – tai dar viena labai dažnai naudojama kompiuterinės regos metodika. Šios technikos pirmtakis SLAM, buvo paremtas išplėstinio Kalmano filtro (angl. *extended Kalman filter*) taikymu modeliuojant rekonstrukcijas robotikoje. Tobulėjant vaizdo registravimo technologijoms, kartu su didesne raiška, bei kompiuterinių skaičiavimų pajėgumais, buvo pristatytas patobulintas, realiu laiku, veikiantis monokuliarinis algortimas MonoSLAM. [10]

1.5.2. Lygiagretus sekimas ir atvaizdavimas

Šis Georg Klein ir David Murray metodas dar vadinamas PTAM (angl. *Parallel Tracking and Mapping*), pristatytas 2007 metais, yra skirtas vaizdų trimatei rekonstrukcijai panaudojus, rankoje laikomos foto kameros gauta įvestimi. Šio metodo išskirtinis bruožas yra dviejų pagrindinių trimatės rekonstrukcijos etapų vykdymas lygiagrečiai. Tai reiškia, kad sistemos dalys, atsakingos už išskirtinių taškų radimą ir trimatę rekonstrukciją, yra vykdomos atskirais kompiuterio procesorių branduoliais. Šis kompiuterinio resurso padalijimas leidžia šiam algoritmui atlikti itin tikslias rekonstrukcijas realiu laiku, kiekviename kadre atpažįstant ir sutapdinant tūkstančius išskirtinių taškų. Ši technika gali būti dar paspartinama, skaičiavimams atlikti panaudojus grafinės kompiuterines plokštes (angl. *graphical processing unit*). Algoritmas susideda iš šių pagrindinių punktų [11]:

- Vaizdo išskirtinių taškų sekimas ir rekonstrukcijos sudarymas vykdomi lygiagrečiai.
- Rekonstrukcija vykdoma remiantis raktiniais kadrais, kurių apdorojimas tikslinamas paketinėmis technikomis (angl. *bundle adjustment*).
- Rekonstrukcija inicijuojama 5 taškų algoritmu nagrinėjant stereo vaizdų porą.
- Nauji taškai įtraukiami naudojant epipoliarinę paiešką.
- Palaipsniui sudaromas itin daug taškų turintis taškų debesis (angl. *point cloud*)

1.5.3. Struktūra iš judesio (SfM)

Struktūra iš judesio (angl. *Structure from motion*) tai toks trimačio vaizdo rekonstrukcijos modelis, kuris remiasi dvimačių vaizdų sekos analize, keičiantis jų pozicijai erdvėje. Realiame pasaulyje, žmogus trimatį vaizdą supranta dėka dviejuose skirtinguose taškuose registruojamo vaizdo. SfM taip pat reikalauja daugiau negu vienos pozicijos vaizdų tam, kad būtų galima apskaičiuoti taškų nuotolį nuo kameros. Tačiau SfM vaizdai gaunami judinant tą pačią kamerą erdvėje, o ne pasitelkiant keliomis kameromis vienu metu. Šiame modelyje, įėjimo kintamieji yra persidengiančių vaizdų seka, keičiantis jų padėčiai erdvėje. Rezultatas – tiriamo fizinio objekto trimatė rekonstrukcija, bei vidinių ir išorinių kameros parametrų apskaičiavimas. SfM sudaromas iš šių etapų [10]:

1. Atpažįstami išskirtiniai taškai nagrinėjamų 2D vaizdų sekoje;
2. Sutapdinami rasti išskirtiniai taškai tarp nagrinėjamų vaizdų;
3. Sudaromos geometrinės priklausomybės tarp dvimačių sutapdintų taškų;
4. Vykdoma trianguliacija;
5. Atliekama ryšulio korekcija (angl. *bundle adjustment*).

Rasti išskirtiniai taškai turi būti invariantiški, atsparūs skalės, posūkio, bei atspalvio pokyčiams. Tai yra svarbu todėl, kad rekonstrukcijai naudojamos įvesties nuotraukos yra daromos iš įvairių pozicijų erdvėje palink objektą. Dėl šios priežasties, SfM pagrindiniu standartu naudojamas išskirtinių taškų

aptikimo algoritmas yra SIFT detektorius. Sekančiu žingsniu, SfM atlieka vaizdų, kuriuose yra matoma ta pati objekto scenos dalis, sutapdinimo procesą. Dažniausiai taikomas metodas atlikti vaizdų sutapdinimui yra kiekvieno modelį sudarančio vaizdo porų sutikrinimas, tokiu būdu atrenkant didžiausią sutaptį turinčias poras. Šis metodas reikalauja didelio kompiuterinio skaičiavimo resurso ir yra labai sudėtingas atliekant sutapdinimo procesą dideliems vaizdų kiekiams. Rezultate gaunamas persidengiančių vaizdų, bei jiems priklausomų išskirtinių taškų atitikmenų rinkiniai. Trečiuoju veiksmu atliekamas geometrinis atrinktų vaizdų porų tikrinimas. Kadangi šių porų panašumas yra grindžiamas tik jų išvaizda, toks tapatumas negarantuoja, kad rasti išskirtiniai taškai iš tikrųjų atitinka tą patį scenos tašką. Todėl SfM tikrina atitikmenis, bandydamas įvertinti transformaciją, kuri, naudodama projekcinę geometriją, atvaizduoja požymių taškus tarp vaizdų. Priklausomai nuo vaizdų poros erdvinės konfigūracijos, jų geometrinį santykį apibūdina skirtingi atvaizdai. Homografija apibūdina erdvėje judančio ar aplink savo ašį besisukančio fotoaparato, fiksuojančio plokštuminę sceną, transformaciją. Epipolinė geometrija aprašo judančios kameros santykį per kalibruotą matricą arba pirminę, nekalibruotą matricą. Jei galiojanti transformacija atvaizduoja pakankamą skaičių požymių tarp vaizdų, jie laikomi geometriškai patikrintais. Kadangi atitikmenys, gauti atlikus atitikimą, dažnai būna stipriai veikiami įvairių triukšmų, būtina įvertinti jų patikimumą tam skirtais metodais kaip pavyzdžiui, RANSAC metodu. Šio etapo rezultatas yra geometriškai patikrintų vaizdų porų rinkinys. Toliau sekantis žingsnis rekonstrukcijos etapas, inicijuoja pirminę modelio atskaitą parinkdamas dviejų vaizdų geometrinę rekonstrukciją. Šis pradinis etapas yra labai svarbus, kadangi nuo pirminės atskaitos priklauso sekančių vaizdų sutapties tikslumas. Rekonstrukciją inicijuojant blogai parinkta pirmine atskaita, šis gali būti nerekonstruotinas. Pirminės atskaitos inicijavimas rekomenduotinas vykdyti iš vaizdų esančių glaudžiai susijusių tarpusavyje erdvėje, dėl tikėtinos didelės sutapties kiekio. Sekantis žingsnis – trianguliacija. Tai labai svarbus SfM etapas, kadangi juo yra padidinamas esamo modelio stabilumas. Tai yra perteklinis geometrinių priklausomybių paieškos metodas, rekonstrukcijos stabilumą pagerinantis modeliui suteikdamas papildomų atitikmenų. Vaizdo registravimas ir trianguliacija yra atskiri procesai, tačiau jų sukuriamos geometrinės priklausomybės yra susijusios. Tarkim kameros erdvinės pozicijos neapibrėžtumas tiesiogiai įtakoja trianguliacija gautų taškų tikslumą, o didelis trianguliacijos metu gautų taškų skaičius gali patikslinti kameros pozicijos tikslumą. Šių rezultatų patikslinimui naudojamos ryšulio korekcijos (angl. *bundle adjustment*) metodikos. Gaunama retoji (angl. *sparse*) scenos rekonstrukcija, kuri vėliau gali būti sutankinama [24].

1.5.4. Mastelio neapibrėžtumas

Kadangi šis metodas yra paremtas vienos, erdvėje judančios, kameros fiksuojamų vaizdų apdorojimu, iš anksto nežinant rekonstruojamos aplinkos dydžių, rezultate gauta rekonstrukcija neatitinka realių matavimo vienetų, todėl toks rekonstrukcijos modelis nėra metrinis 3D modelis ir gali būti aprašomas tik santykiu realiam dydžiui. Šiuolaikiniai trimatės rekonstrukcijos algoritmai pasitelkia inercinius jutiklius arba lazerinius atstumo matuoklius tam, kad būtų modelyje būtų priskirtas realaus pasaulio matmuo. Inerciniais jutikliais paremti algoritmai stebi kameros judėjimą erdvėje – kameros kelių koordinačių ašimis, jos orientaciją erdvėje. Žinant kameros poslinkį tarp dviejų kadru, nesunkiai galima apskaičiuoti ir atstumą esantį tarp rekonstruotame modelyje esančių kameros taškų. Tokie algoritmai turi būti optimizuojami taip, kad įvairūs matavimo triukšmai, bei netikslumai būtų kuo labiau slopinami ir neįtakotų mastelio skaičiavimo rezultatų. Lazeriniai atstumo matuokliai taip pat teikia informaciją algoritmui apie kameros padėtį erdvėje, tačiau šiuo atveju kintamasis yra nebe

pačios kameros poslinkis, o išmatuotas atstumas nuo vaizdą fiksuojančios kameros iki rekonstruojamos aplinkos taško ant kurio krenta lazerio spindulys. Šiuo atveju, lygiai taip pat, sistemai pateikiamas realaus pasaulio dydis yra susiejamas su modelyje esančiais dydžiais [10].

1.6. Panašių tyrimų apžvalga

Šiame poskyryje apžvelgiami literatūroje rasti panašią problemą sprendžiantys tiriamieji darbai. Trumpai apibendrinami naudoti metodai, bei gauti rezultatai.

1.6.1. Stereo vaizdu paremtos 3D kelio duobių rekonstrukcijos tyrimas

Muhammad Uzair Ul Haq, tyrime pateikia kelio duobių trimatės rekonstrukcijos galimybes, praplečiant išskirtinių taškų aptikimo dydį, panaudojus informuotos, pusiau globalios, blokų sutapties metodiką. Ši technika pasirinkta dėl to, kad paprastas, darbe naudotas SIFT detektorius, nėra pajėgus atpažinti mažai kontrastingas, smėlėtas kelio duobės vietas. Tyrime, kameros yra montuotos ant automobilio, kuris juda nustatytais greičiais. Visos nuotraukos yra iš anksto apdorojamos aukšto dažnio filtrą, normalizuojama vaizdų histograma, bei pritaikomas Gauso filtras, kadangi nuotraukos, darytos automobiliui judant, jos turi įvairių iškreipimų, bei suliejimo požymių. Išmatavus kalibracinius duobių modelius, automobiliui nejudant, matavimo paklaida buvo lygi 3mm, automobiliui judant – iki 5mm. Tiriant kelio duobes realiomis sąlygomis, tūrio matavimo paklaida, automobiliui judant 10km/h greičiu, buvo lygi 20%, 15% - ploto rezultatui, bei 4% - duobės gylio matavimams [13].

1.6.2. Stereo vaizdu paremta kelio dangos stebėseną

Šiame darbe, Truman Shen, aprašo kelio dangos stebėsenos sistemą, paremtą stereo vaizdo rekonstrukcija. Šios sistemos dėka, automobilis gali aktyviai stebėti kelio dangos paviršiaus nelygumus ir iš anksto pritaikyti atitinkamus važiuoklės nustatymus, siekiant sumažinti keleivių diskomfortą. Darbe naudotas realiu laiku veikiančios sistemos Takata modelis. Kadangi kelio danga nėra lygi, jos stebėsenos sistema turi būti prisitaikanti prie kameros pozicijos pokyčių. Šiai problemai spręsti sistema stebi automobilyje įtaisytų jutiklių, nusakančių automobilio pokrypio kampą, duomenis, kuriuos realiu laiku pateikia kelio dangos rekonstrukcijos sistemos. Analizuojamas paviršius yra padalintas į atskirus regionus bendrame tinkle, o priklausomai nuo automobilio judėjimo krypties yra aktyvinami regionai patenkantys į automobilio ratų judėjimo trajektoriją. Tyrimo rezultatai parodė, kad atstumui iki kliūties siekiant 8 metrus, kelio paviršiaus nelygumų paklaida siekia 1,2 cm. Ši paklaida turi priklausomybę nuo rekonstruojamo vaizdo atstumo kadre ir atstumui siekiant 28 metrus, paklaida išauga iki 8.8 cm [14].

1.6.3. Kelio duobių aptikimas pagal skirtuminės transformacijos ir kelio dangos modeliavimą

Rui Fan, savo darbe pateikia naują metodą kelio dangos nelygumų atskyrimui nuo kelio duobių. Modelio sudarymui, naudota stereo vaizdo rekonstrukcijos metodas, kai kamera yra nukreipta vertikaliai į apačią. Algoritmas sudaro kelio dangos nelygumų žemėlapi, kuris yra vėliau transformuojamas pritaikant Otsu ribinių verčių atrankos metodą. Taip pat, algoritmas atmeta visus matomus nelygumus, kurie neatitinka apibrėžtų parametrų. Transformuotas nelygumų žemėlapis yra sulyginimas su pradiniu žemėlapiu, tokiu būdu gaunant skirtuminę reikšmę, kurioje lieka kelio duobių koordinacijų masyvas. Pagal nustatytas kelio duobių ribas, toliau yra atliekami veiksmai su kelio

dangos trimatės rekonstrukcijos gautais duomenimis. Rezultatuose pateikta, jog naudojant šį metodą, kelio nelygumų atpažinimas kaip kelio duobė, siekė 98,7% sutapties tikslumą [15]

1.6.4. Kelio duobių 3D rekonstrukcija naudojant naują vaizdo apdorojimo sistemą, bei struktūros iš judesio techniką

Šiame darbe, Adeel Ahmed, kartu su kolegomis, aprašo atliktą tyrimą, kuriame nagrinėjamos kelio duobių trimatės rekonstrukcijos SfM metodu galimybės. Tyrimui atlikti, sukurta sistema, kurioje vienos kameros fiksuojamas vaizdas yra transformuojamas į trimatį kelio dangos modelį. Išskirtinių taškų aptikimui ir jų sutapdinimui pasirinktas SIFT detektorius, o 5 taškų algoritmu, rasti taškai apjungiami į bendrą geometrinį modelį. Siekiant susieti gauto modelio matmenis su realiais metriniais dydžiais, pasitelktas lazerinis atstumo matuoklis. Nuotraukoje nustačius lazerio atspindį, jo vieta yra susiejama su artimiausiu jam esančiu išskirtiniu tašku. Turint atstumo matuoklio duomenis, apskaičiuojamas santykis tarp modelyje gautų matmenų ir išmatuotų, tokiu būdu gaunant modelio mastelį. Darbe tirtos 30 skirtingų kelio duobių, o taip pat 2, skirtingų formų, pagaminti modeliai su tiksliais matmenimis, patikrinti sistemos tikslumui. Bandyme nuotraukos darytos kamera pritvirtinus prie automobilio. Eksperimento duomenys rinkti automobiliui stovint, bei judant 10, 15, bei 20 km/h greičiu. Stebėti kelio duobės perimetro, bei gylio matavimų duomenys. Priklausomai nuo automobilio judėjimo greičio, duobės perimetro matavimo paklaida kito nuo 5,2% automobiliui stovint, iki 27.8% automobiliui judant 20km/h greičiu. Duobės gylio matavimų paklaida, lyginant su realiai išmatuotomis vertėmis, kito nuo 5,3% iki 26,6% [16].

2. Metodinė dalis

Šiame skyriuje aprašomi tyrimo užduočiai įvykdyti nustatyti trimatės rekonstrukcijos kokybiniai parametrai, bei jiems gauti atliktų veiksmų seka. Skyrius padalintas į keturias pagrindines dalis:

- Aprašomi tiriamojo darbo eigos etapai;
- Apibrėžiami tiriamo objekto kokybiniai parametrai;
- Aprašoma tyrime naudota metodika, išskirtinių taškų aptikimui/sutapdinimui, bei trimačio objekto rekonstrukcijai vykdyti;
- Aprašomas rekonstruoto 3D modelio analizei skirtos programos veikimas.

2.1. Tiriamojo darbo eiga

Tyrimo tikslas yra suprasti kaip SIFT išskirtinių taškų detektoriaus parametrų vertės įtakoja trimatės rekonstrukcijos tikslumą. Dėmesys kreipiamas važiuojamosios dalies kelio paviršiaus vaizdo analizei, o konkrečiai jo defektams – kelio duobėms. Pagal SIFT detektoriaus parametrų aprašus, galima teigti, kad objektas, jo spalvinės savybės, paviršiaus tekstūra ar aplinkos apšviestumo sąlygos, turi didelę įtaką aptinkamų išskirtinių taškų kiekiui. Iš to daroma išvada, kad taikant sistemą, skirtą konkrečiam uždaviniui spręsti, reikalinga parinkti tam objektui atpažinti geriausią rezultatą teikiančius SIFT parametrus. Tyrimo vykdymas pradedamas nuo rekonstrukcijos kokybinių parametrų apsirašymo, bei kameros tipo parinkimo. Taip pat yra pagaminamas etaloninis modelis, skirtas matavimų tikslumui įvertinti. Šie žingsniai aprašomi 2.2 ir 2.3 skyreliuose. Nustačius kriterijus, pagal kuriuos bus sprendžiamas trimatės rekonstrukcijos tikslumas, bei pasirinkus tyrime naudojamos kameros tipą, toliau seka veiksmai, kurie yra padalinti į šiuos pagrindinius žingsnius:

- Įvertinamas SIFT detektoriumi rastų, bei sutapdintų išskirtinių taškų kiekio pokytis, tolygiai keičiant kontrasto, bei kraštinių parametrų ribines vertes. Nustatomos parametrų skaitinės vertės su kuriomis rastų ir sutapdintų išskirtinių taškų kiekio santykis yra didžiausias.
- Naudojant naujai gautus SIFT algoritmo parametrus, atliekama etaloninio modelio rekonstrukcija. Įvertinama galima matavimų paklaida lyginant su realiai išmatuotais dydžiais.
- Atliekama kelio duobių trimatė rekonstrukcija keičiant SIFT parametrų vertes. Gauti modeliai analizuojami MATLAB programiniu paketu, skaičiuojant jų matmenis pagal aprašytus tikslumui įvertinti skirtus dydžius.

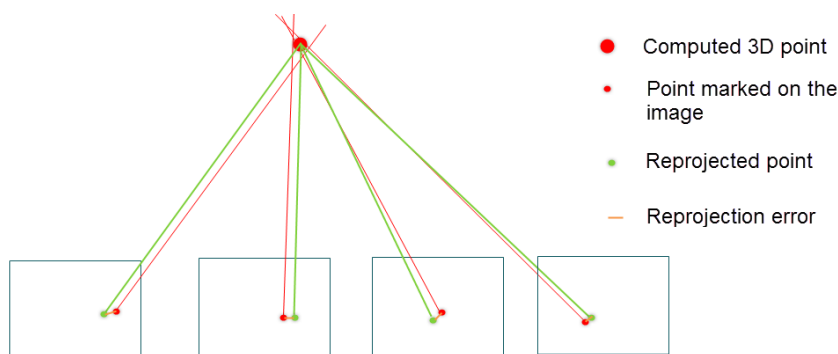
2.2. Kokybiniai parametrai

Tyrime matavimų kokybiniai parametrai aprašyti duobės fiziniiais dydžiais, išskirtinių taškų sutapdinimo dydžiu. Visų šių matavimų metodika aprašyta vėlesniuose skyriuose. Taip pat bus stebimas projekcijos paklaidos koeficientas (angl. *reprojection error*), nustatyti kameros kalibracijos tikslumui [17]. 4 lentelėje pateikti projekcijos paklaidos koeficientai lyginant skirtingus kameros modelius, bei du kamerų tipus. Šio koeficiento matavimo tikslas yra nustatyti tinkamiausią

bandymams skirtą kamerą, bei kameros modelio tipą, kad rekonstruotas modelis būtų atkurtas kuo tiksliau. Šis dydis nusako kameros kalibracijos tikslumą. Projektijos paklaida aprašoma pikseliais ir nusako, kiek yra nutolęs išmatuotas projektijos taškas vaizde, lyginant su realiu tašku nagrinėjamame vaizde.

Fiziniam duobės dydžiams priskiriami šie dydžiai:

- perimetras;
- maksimalus gylis;
- vidutinis gylis;
- paviršinis plotas;
- tūris.



7 pav. projektijos paklaidos pavyzdys [17]

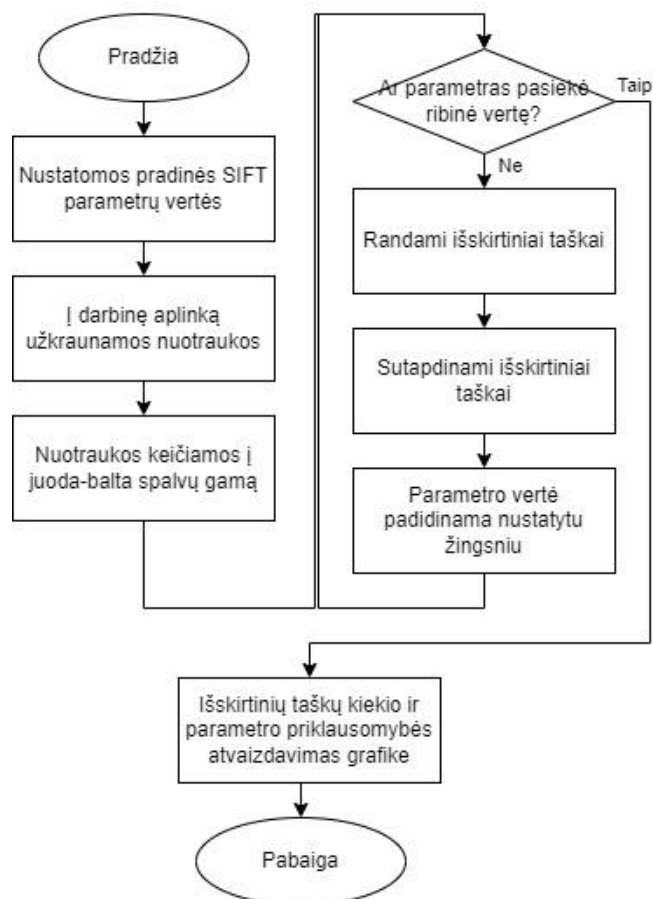
4 lentelė. Projektijos paklaidos naudojant skirtingas kameras

Kamera	DSLR	Telefono kamera
Kameros modelis	Projektijos paklaida	
Simple pinhole	0,432	0,883
Pinhole	0,431	0,861
Simple radial	0,432	0,807

2.3. SIFT parametrų įvertinimas

Šiame žingsnyje yra įvertinama SIFT detektoriaus parametrų įtaka išskirtinių taškų aptinkamumui, bei jų sutapdinimui. Vertinimas atliekamas MATLAB programinės įrangos aplinkoje aprašyta programa. MATLAB bibliotekose aprašyta `detectSIFTFeatures()` funkcija yra modifikuojama pakeičiant parametrus aprašančius kintamuosius globaliais kintamaisiais. Turint galimybę keisti standartines parametrų vertes, į programos aplinką užkraunama duobės dviejų nuotraukų informacija. Nuotraukų spalvinis tonas keičiamas į juoda – balta spalvinę gamą. Siekiant iširti parametrų pokyčio

įtaką, sukuriamas for ciklas. Kiekviename ciklo rate yra atliekama abiejų nuotraukų išskirtinių taškų paieška modifikuotos SIFT išskirtinių taškų aptikimo funkcijos pagalba. Funkcija extractFeatures() aprašomi išskirtinių taškų deskriptoriai arba jų vektoriai pagal detectSIFTFeatures() funkcija nustatytus išskirtinių taškų objektus. Gautas išskirtinių taškų kiekio ir jam priklausančių parametru masyvas atvaizduojamas grafikuose pateikiant rastų ir sutapdintų išskirtinių taškų priklausomybės grafikus. Žemiau pateiktame 8 paveikslėlyje pateiktas programos veikimo algoritmas. Rezultatai pateikiami 3.1 skyrelyje.



8 pav. SIFT parametrų priklausomybės nustatymo algoritmas

2.4. Kelio duobių vaizdo fiksavimo metodika

Aprašytiems matavimams atlikti, tyrime naudotas Windows stacionarus kompiuteris turintis Nvidia Geforce 1660Ti 8GB vaizdo plokštę. Nuotraukos fotografuojamos Nikon D5600 veidrodine DSLR kamera. Naudotas 55mm lęšis su siaurai praverta apertūra tam, kad gautas vaizdas būtų sufokusuotas visame kadre. Šia vaizdo kamera daromos 6000x4000 rezoliucijos nuotraukos. Vienos nuotraukos dydis – 17mb. Fotoaparatas yra pastatomas ant trikojo taip, kad objektyvą nukreipus vertikaliai žemyn, kameros jutiklis nuo žemės yra pakilęs 1 metro atstumu, taip kaip parodyta 9 paveikslėlyje. Rekonstrukcijai atlikti darytos 3 nuotraukos, paslenkant kameros poziciją 10 cm atstumu. Atliekant objekto rekonstrukciją COLMAP aplinkoje, tai yra minimalus nuotraukų skaičius skirtas rasti kameros pozicijai erdvėje. Trys nuotraukos daromos su tikslu išlaikyti rekonstrukcijos paprastumą. Taip pat daroma prielaida, kad esant mažesniai įvesties nuotraukų kiekiui, rezultate bus gaunamas aiškiau apibrėžiamas rekonstrukcijos tikslumo pokytis naudojant skirtingas SIFT detektorius

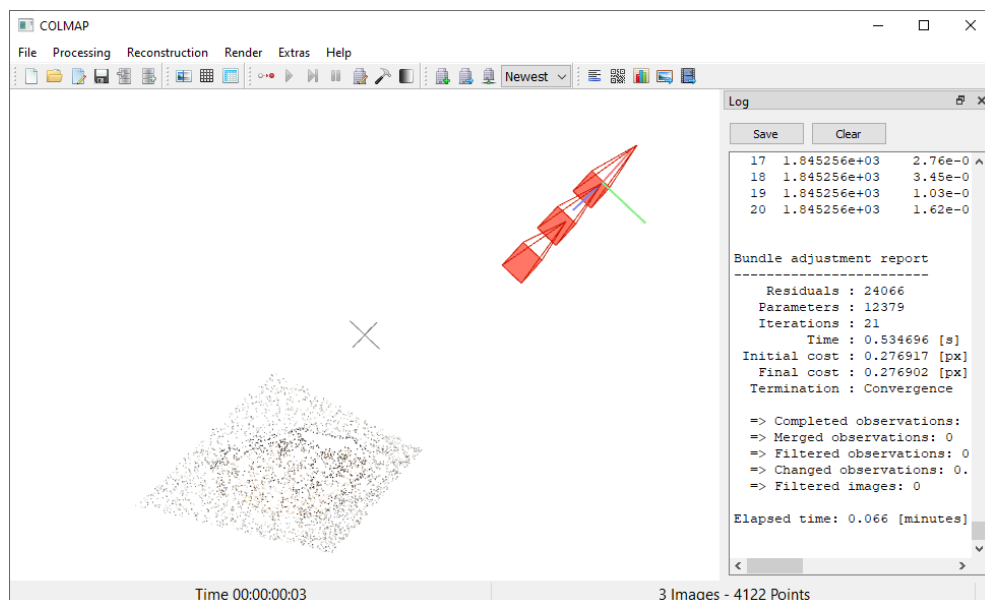
parametrų vertes. Tyrimui atlikti, pasirinktos 5-ios skirtingų formų, bei gylio kelio duobės. Taip pat, matavimų tikslumui patikrinti, iš gipso mišinio, pagamintas kontrolinis duobės modelis. Modelio angos skersmens ilgis yra 130 mm, gylis – 20 mm. Šio modelio dugnas yra padengtas 1cm kvadratiniais baltais, bei juodais regionais, išdėstytais kaip šachmatų lentoje. Toks sprendimas priimtas dėl to, kad modelio kiaurymė yra tuščiavidurė, o modelis yra statomas ant balto popieriaus lapo viršaus, kas lėmė mažą aptinkamų išskirtinių taškų kiekį dugno plokštumoje. Pirmi bandymai rasti išskirtinius taškus buvo nesėkmingi dėl mažo rastų išskirtinių taškų kiekio baltame popieriaus paviršiuje. Gautus pirminius rezultatus patvirtina ir literatūros apžvalgoje darytos prielaidos. Kontrolinio modelio nuotrauka pateikta 12 – tame paveikslėlyje.



9 pav. Duobės vaizdo fiksavimo metodika

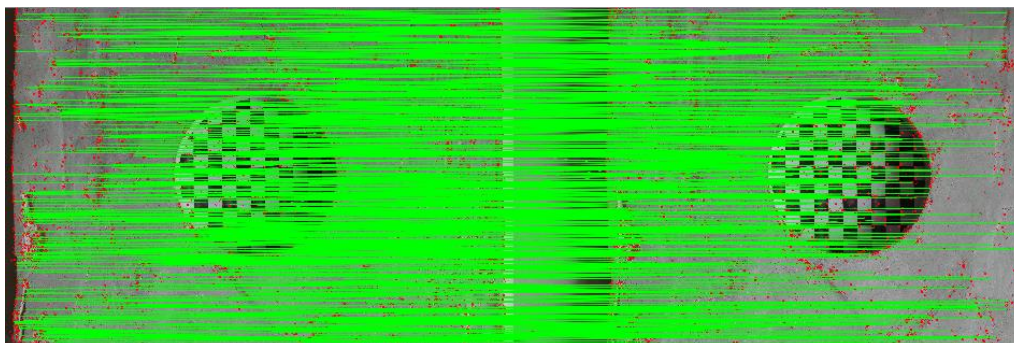
2.5. Trimačio objekto rekonstrukcija

Viena dažniausiai naudojamų vaizdų geometrija paremta SfM modelių generavimo platformų yra COLMAP atviro kodo programinis paketas [18, 19]. COLMAP apjungia visus, 3D rekonstrukcijai reikalingus žingsnius. Norint atlikti paprastą, bei greitą objekto trimatę rekonstrukciją, tam užtenka vos kelių žingsnių. Darbo aplinka yra gana intuityvi, todėl net nepatyręs vartotojas gali lengvai atlikti rekonstrukcijos užduotis. Nesudėtingiems objektams, programa turėtų veikti nekeičiant jokių parametrų. Tačiau pradiniai programoje nustatyti parametrai yra parinkti ieškant kompromiso tarp rekonstrukcijos kokybės, bei greičio. Rekonstrukcija gali būti vykdoma tiek grafinėje vartotojui skirtoje aplinkoje, tiek komandinėje eilutėje aprašant komandas. Šiame darbe buvo naudojamosi grafinės aplinkos teikiamais įrankiais. Programinės aplinkos vaizdas pateiktas 10 paveikslėlyje.

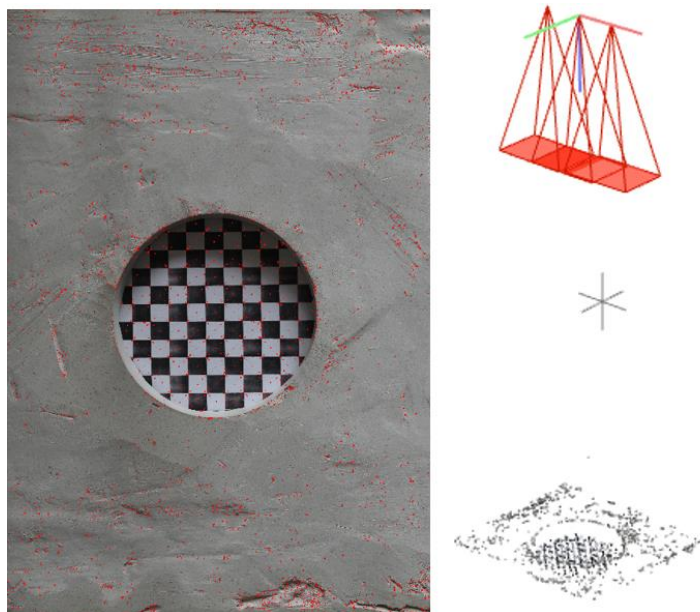


10 pav. COLMAP programinio paketo grafinė aplinka

Pirmasis žingsnis pradedamas nuo išskirtinių taškų radimo įvesties nuotraukose naudojant *Processing*>*Feature extraction* įrankį. Šiame etape, yra nurodomi vidiniai kameros kalibracijos parametrai. Šie parametrai gali būti pateikiami rankiniu būdu arba nustatomas automatinis aprašymas pagal, kiekvienoje nuotraukoje esančia EXIF vidine kameros informacija. Šioje informacijoje nurodomas kameros tipas, gamintojas, lęšio židinio nuotolis, apertūros dydis ir t.t. Tyrime naudotas automatinis parametrų nuskaitymas. Išskirtinių taškų atpažinimui COLMAP naudoja SIFT detektorių. Pirmoje tyrimo dalyje, tiriamas etaloninis objektas ir yra naudojami SIFT standartiniai parametrai. Nuotraukos su atpažintais išskirtiniais taškais pavyzdys pateiktas 12(a) paveikslėlyje. Sekančiu žingsniu, įrankiu *Processing*>*Feature Matching*, rasti išskirtiniai taškai yra sulyginami tarpusavyje su kitose nuotraukose rastais išskirtiniais taškais ir apskaičiuojama geometrinė priklausomybė tarp jų. Naudoti standartiniai sutapdinimo nustatymai. Kadangi modelio rekonstrukcijai naudojamos tik trys nuotraukos, šis etapas įvykdomas vos per 60ms. Esant kelioms dešimtims ar šimtams nuotraukų, šis laikas gali išaugti iki kelių minučių ar net kelių valandų. Greitis priklauso ir nuo kompiuterio GPU pajėgumo.



11 pav. Sutapdintų išskirtinių taškų atvaizdavimas



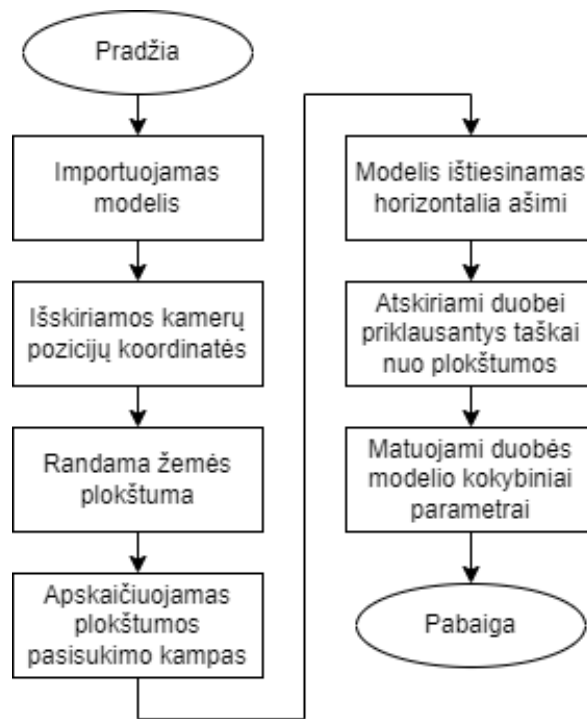
12 pav. (a) kairėje – rasti etaloninio modelio taškai, (b) dešinėje – modelio retoji rekonstrukcija

Atlikus išskirtinių taškų atpažinimo, bei sutapdinimo veiksmus, sekančiu žingsniu, atliekama trimačio modelio rekonstrukcija, paeiliui sujungiant ir priskiriant geometrinę priklausomybę ankstesniuose veiksmuose sutapdintus išskirtinius taškus. Čia taip pat yra naudojami standartiniai įrankio nustatymai. Gaunamas rezultatas yra retas taškų debesis, kartu su erdvinės kamerų padėties koordinatėmis. Šis trimatis rekonstruotas modelis yra eksportuojamas tolimesnei analizei. Eksportuojamas tekstinis failas „*points3D.txt*“, kuriame nurodyta kiekvieno taško erdvinė koordinatė, projekcijos paklaidos vertė, bei kita informacija. Šio failo informacinė sudėtis pavaizduota pavyzdyje žemiau.

```
# 3D point list with one line of data per point:
# POINT3D_ID, X, Y, Z, R, G, B, ERROR, TRACK[] as (IMAGE_ID, POINT2D_IDX)
# Number of points: 4627, mean track length: 2.8088506453595574
1 -2.4514104028337789 -11.704981588227536 72.806556893751292 81 78 71
0.15568230683386419 1 9 2 6 3 7
```

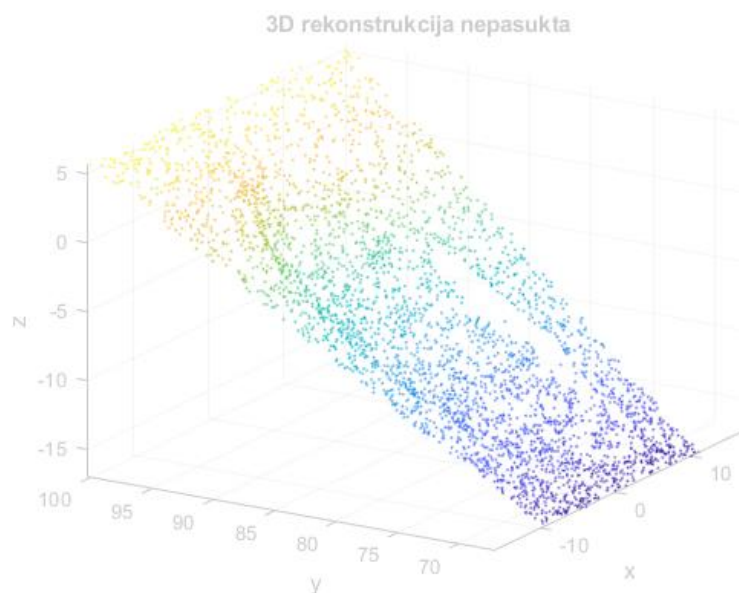
2.6. Rekonstruoto modelio analizė MATLAB programiniu paketu

Projekte naudojamas MATLAB R2021b programinis paketas. Aprašyta programa skirta rekonstruoto modelio kokybinių parametrų analizei. Bendras programos algoritmas pateiktas 13 paveikslėlyje. Kiekviena šio algoritmo dalis plačiau aprašoma tolimesniuose skyriuose.



13 pav. Rekonstruoto modelio analizei skirtos programos algoritmas

Programa pradeda nuo COLMAP sugeneruoto modelio duomenų importavimo į darbinę aplinką. Modelio koordinatinių taškų apjungiami į taškų debesį funkcija *ptCloud()* tolimesniems veiksams su modeliu.



14 pav. Nepasuktas rekonstruotas trimatis modelis

2.6.1. Modelio pasisukimo kampo pašalinimas

Pirminis importuotas modelis gaunamas su dideliu pasisukimu koordinatinių ašies X atžvilgiu dėl kameros pozicijos erdvėje. Norint supaprastinti modelio analizei skirtus skaičiavimus, 3D modelis yra ištiesinamas. Pirmas žingsnis yra nustatyti žemės plokštumos pasisukimo kampą X ašimi. Šiam tikslui naudojama funkcija *pcfitplane*. Šioje funkcijoje aprašomas maksimalus galimas atstumas tarp plokštumos ir taško, aprašomas normalus plokštumos vektorius, bei maksimalus galimas posūkio kampas. Funkcijos rezultatas yra taškai išsidėstę pagal nustatytus apribojimus apskaičiuotoje plokštumoje. Ši plokštuma laikoma žemės plokštuma.

```
[model1,inlierIndices,outlierIndices] = pcfitplane(ptCloud,...
          maxDistance,referenceVector,maxAngularDistance);
plane1 = select(ptCloud,inlierIndices);
remainPtCloud = select(ptCloud,outlierIndices);
```

Pagal kintamojo *plane1* koordinates, nustatomi plokštumos ribiniai taškai YZ koordinatinių ašyje. Šių dviejų taškų vektoriaus kampas apskaičiuojamas pagal žemiau pateiktą formulę ir yra lygus žemės plokštumos kampui koordinatinių ašyje.

$$Kampas = \frac{U_z - I_z}{U_y - I_y}$$

,kur U ir I – ribiniai plokštumos taškai.

Gauta plokštumos kampo reikšmė radianais, paverčiama į laipsninę išraišką. Modelis pasukamas pritaikant transformacijos matricą, skirtą vektorių pasukimui Euklido erdvėje. Elementarusis pasukimas – tai vektoriaus pasukimas vienos koordinatinių ašies atžvilgiu. Toliau pateiktomis formulėmis, skaičiuojama vektoriaus transformacija atsižvelgiant į sukimo ašį. Gautas rezultatas – trimatis modelis esantis lygiagrečiai Y koordinatinių sistemos ašiai. Pasukto modelio vaizdas pateiktas 15 – tame paveikslėlyje.

X ašiai:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

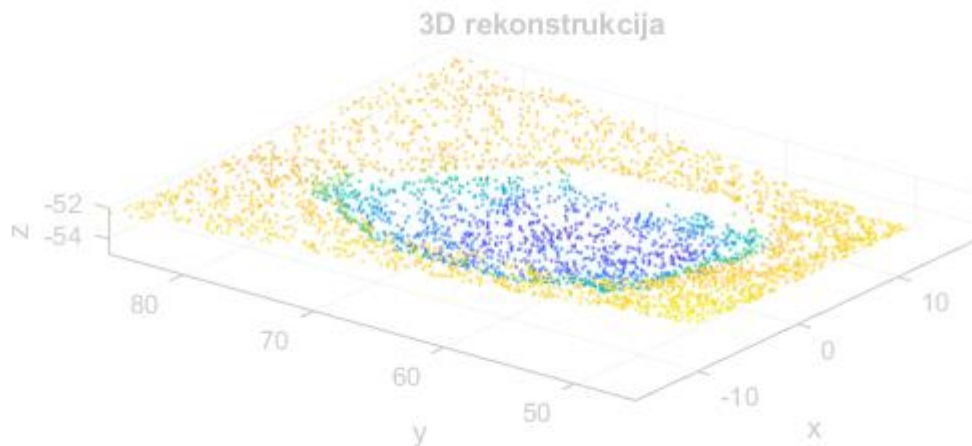
Y ašiai:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Z ašiai:

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

, čia θ – plokštumos pasisukimo kampas koordinatinių erdvėje.



15 pav. Pasuktas rekonstruotas duobės trimatis modelis

2.6.2. Perimetro, bei paviršiaus ploto skaičiavimas

Tolimesniems veiksams vykdyti, reikalinga atskirti taškų debesies narius priklausančius žemės plokštumai, nuo duobės paviršių nusakančių narių. Tai atliekama atimant anksčiau rastos plokštumos taškus iš viso modelio taškų.

$$PC_d = PC_m - PC_p$$

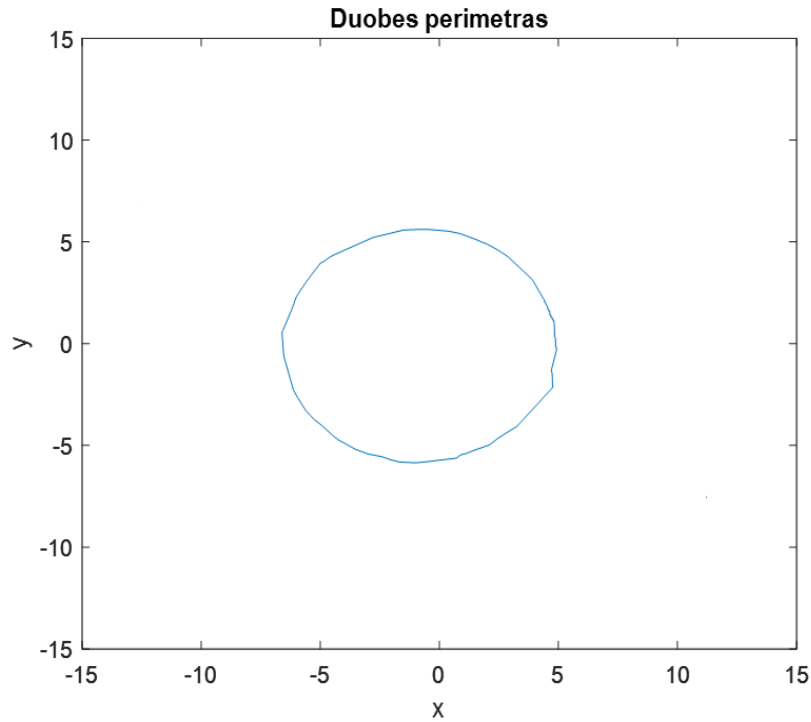
, kur PC_d – duobės taškų debesis, PC_m – pilno modelio taškų debesis, PC_p – plokštumos taškų debesis.

Atskyrus duobės taškų debesį, nuo likusio modelio, atliekamas duobės perimetro nustatymas. Duobės taškų debesies X ir Y ašių nariai yra priskiriami naujiems kintamiesiems. Funkcijos $boundary(x,y)$ pagalba nustatomi ribiniai turimos figūros taškai XY plokštumoje. Perimetras suskaičiuojamas išmatavus atstumus esančius tarp šių taškų. Turint nagrinėjamos figūros perimetrą, apskaičiuojamas ir jos paviršiaus plotas pagal funkciją $polyarea(x,y)$ Gautas perimetro atvaizdas pateiktas 16 paveikslėlyje.

```

x_bondary = X_Cloud;
y_bondary = Y_Cloud;
k = boundary(x_bond,y_bond,1);
Xb=x_bondary(k);
Yb=y_bondary(k);
pointsXY=[Xb Yb];
perimeter = 0;
for i = 1:size(pointsXY, 1)-1
perimeter = perimeter + norm(pointsXY(i, :) - pointsXY(i+1, :));
end
perimeter = perimeter + norm(pointsXY(end, :) - pointsXY(1, :))
Area=polyarea(Xb,Yb)

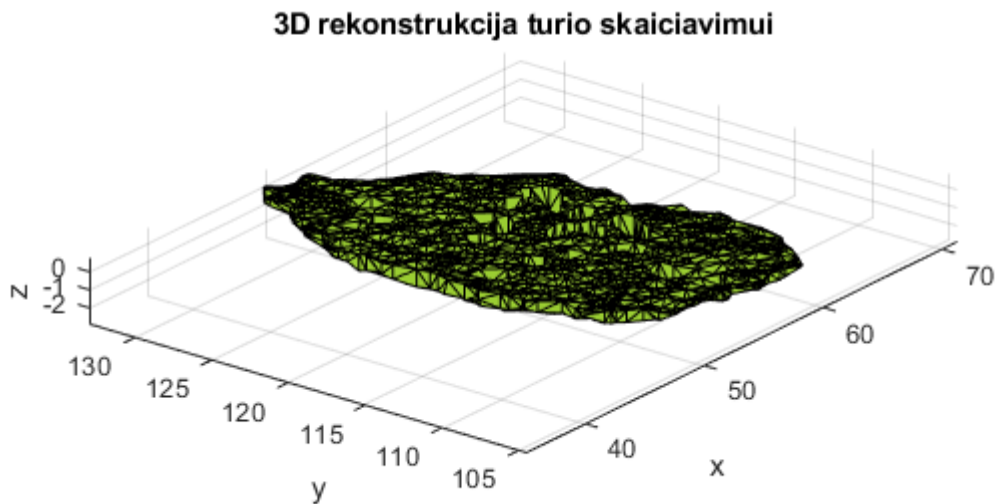
```



16 pav. Etaloninio modelio duobės perimetro atvaizdas grafike

2.6.3. Gylio, bei duobės tūrio skaičiavimas

Anksčiau gautas trimatės rekonstrukcijos taškų debesis toliau taikomas tūrinei duobės analizei. Tūrio skaičiavimui atlikti galimi keli variantai. Vienas galimų būdų yra taškų debesies Z ašies verčių suintegravimas. Tačiau šis būdas pasižymi itin dideliu netikslumu esant mažam kiekiui taškų trimačio objekto taškų debesyje. Taip pat, šiuo būdu matuojant tūrį, jo dydis yra tiesiogiai priklausomas nuo modelyje esančių taškų kiekio, todėl rezultatas negali būti pastovus tikslus dydis, kintant 3D modelio tikslumui. Tyrimė naudotas metodas pasitelkia MATLAB funkciją *alphaShape()*, sukurti alpha formą. Alpha forma yra euklidinės plokštumos linijinių vientisų paprastųjų kreivių, susietų su baigtinio taškų rinkinio forma. Kadangi duobės modelis nėra uždara figūra, norint sugeneruoti tūrinę alpha formą, uždaromas modelio viršus, dublikavus Z ašies reikmes ir jas priskiriant nulinei reikšmei. Objekto tūrinis vienetas apskaičiuojamas panaudojant *volume()* funkciją. Tam, kad nustatyti duobės maksimalų, bei vidutinį gylius, imama trimačio objekto taškų debesies Z ašies reikšmės. Didžiausia reikšmė lygi maksimaliam gyliui, o visų taškų vidurkis – vidutiniam duobės gyliui.



17 pav. 3D rekonstrukcija tūrio skaičiavimui

2.6.4. Kalibracija

Trimačio modelio išmatuoti dydžiai susiejami su realiais matmenimis atliekant proporcijos palyginimą tarp išmatuoto žinomo matmens ir tų pačių erdvinių taškų rekonstruotame 3D modelyje atstumo. Kadangi rekonstruojamas modelis ir jo taškai yra randami pagal geometrinę priklausomybę atsižvelgiant į kameros poslinkio poziciją erdvėje, COLMAP sugeneruoja ne tik objekto taškus koordinatų erdvėje, bet ir kameros pozicijos vietą joje. Žinant šį tašką, apskaičiuojamas atstumas nuo kameros taško modelyje iki pasirinkto taško rekonstruojamame objekte. Realiois sąlygomis šis atstumas yra matuojamas metriniu rulete, nuo taško iki kameros sensoriaus, atimant židinio nuotolio atstumą. Sensoriaus pozicija kameroje yra pažymėta ant plastikinio korpuso. Židinio nuotolis reguliuojamas ir taip pat, žymimas skaitinėmis vertėmis ant kameros lęšio. Tyrime kamera statoma 1 metro atstumu nuo atskaitos taško objekte. Naudotas lęšio židinio nuotolis 55 mm. Gaunamas atstumas lygus 94.5 cm atstumui iki matuojamo taško objekte, proporcijos būdu sulyginamas su tų pačių erdvinių taškų atstumu 3D modelyje. Etalono matavimo pavyzdžiu, K koeficientas pagal žemiau pateiktą lygtį gautas $K = 1.13$.

$$K = \frac{L_R}{L_M}$$

$$L_R = K * L_M$$

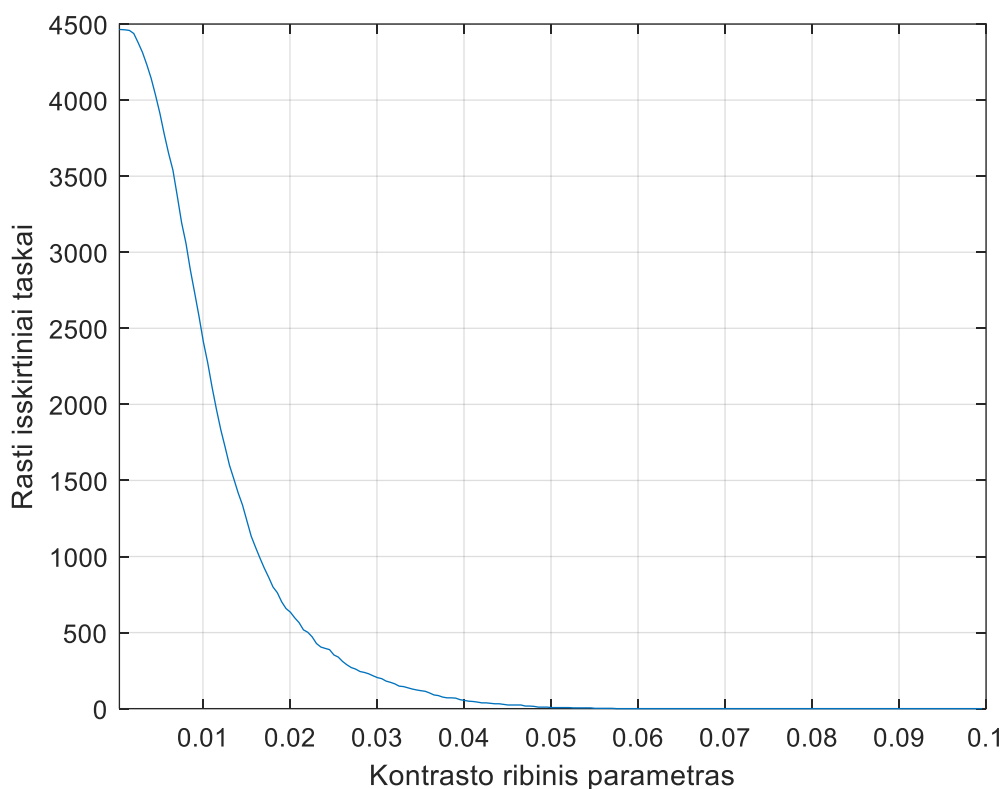
, čia K – santykis tarp realiai išmatuoto atstumo L_R ir modelyje matuoto L_M atstumo dydžių.

3. Tyrimo rezultatų dalis

Šiame skyriuje yra aprašomi tyrime atliktų veiksmų rezultatai. Skyrius padalintas į tris pagrindinius: SIFT detektoriaus parametrų įtaka išskirtinių taškų paieškoje, kameros kalibracijos tikslumo vertinimas, bei išskirtinių taškų įtaka 3D modelio rekonstrukcijos kokybiniais parametrams.

3.1. SIFT parametrų įtaka išskirtinių taškų paieškoje

Literatūros apžvalgoje aprašytas SIFT išskirtinių taškų detektorius. Šiame darbe buvo ištirti du didžiausią įtaką išskirtinių taškų rastam kiekiui turintys algoritmo parametrai. Tirti SIFT parametrai yra kontrasto slenksstinės reikšmės dydis, bei kraštinės ribinė vertė. Toliau šie parametrai atitinkamai vadinami CT (angl. *Contrast Threshold*), bei ET (angl. *Edge Threshold*). Pirmiausia, abu šie parametrai patikrinami pagal duotame vaizde aptiktų išskirtinių taškų kiekį. Sistemos patikrinimui analizuojamos 5 skirtingų dydžių kelio duobės. Gauti išskirtinių taškų kiekio rezultatai yra pateikiami minėtų vaizdų vidurkio vertėmis. Tam, kad nustatyti atpažintų išskirtinių taškų priklausomybę nuo minėtų parametrų, jų vertės palaipsniui didinome ir stebėjome algoritmo atsaką į pokyčius. CT parametras tikrinamas 0 – 0.1, ET: 1 – 30 ruožais.



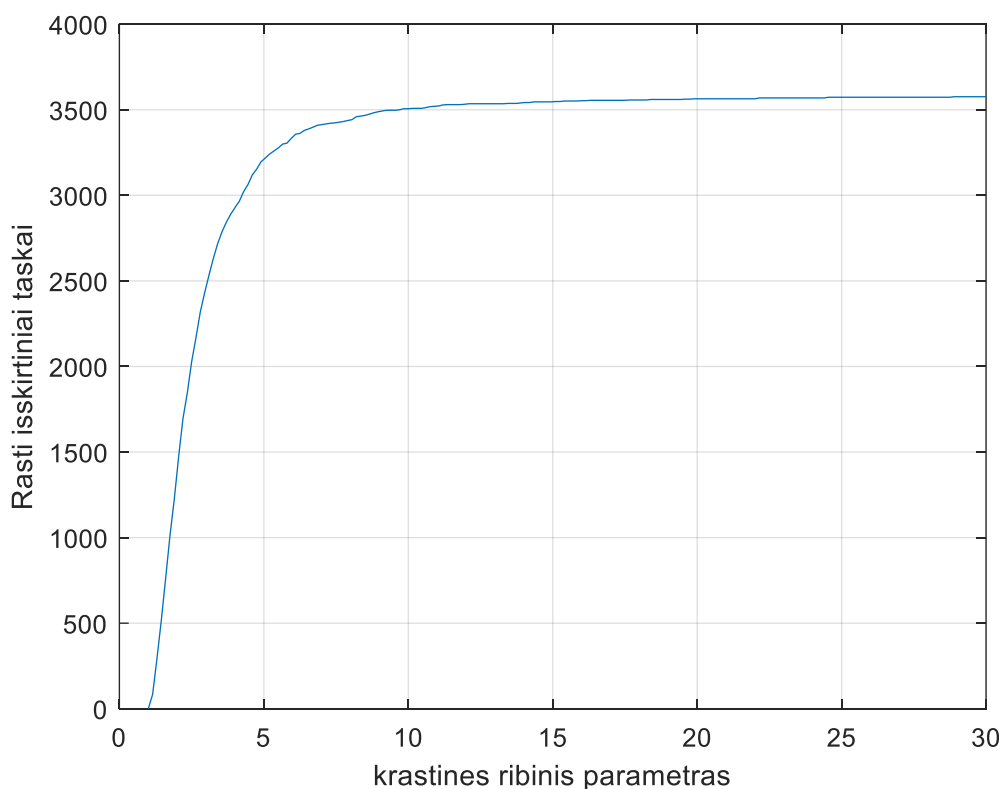
18 pav. Rastų išskirtinių taškų kiekio priklausomybė nuo kontrasto perimetro ribinės vertės

Kaip pateikta 18 paveikslėlyje, augant CT parametro vertei, aptinkamų išskirtinių taškų skaičius mažėja. Maksimalus išskirtinių taškų kiekis pasiektas ties 0.0001 CT parametro verte. Nuo šitos vertės, toliau didinant CT parametro reikšmę, aptinkamų išskirtinių taškų skaičius mažėja tol, kol pasiekus 0.1, išskirtinių taškų neberandama. Ši priklausomybės grafiką galima padalinti į keturias dalis.

- $CT \leq 0.0001$ – išskirtinių taškų maksimalus aptikimo skaičius;
- $0.0001 \leq CT \leq 0.015$ – šiame ruože stebimas didžiausias išskirtinių taškų kiekio mažėjimas;
- $0.015 \leq CT \leq 0.05$ – išskirtinių taškų kiekio mažėjimas sulėtėja, tačiau aptinkamas nedidelis kiekis;
- $0.05 \leq CT \leq 0.1$ – išskirtinių taškų detektorius neaptinka.

Aptinkamų išskirtinių taškų vidutinis kiekis, kintant ET parametrai pateiktas 19 paveikslėlyje. Priklausomybės grafikas nurodo, kad ET parametrai kintant nuo 1 iki 4, stebimas staigus aptinkamų taškų kiekio šuolis. Didžiausias išskirtinių taškų kiekis – 3576. Ši priklausomybė taip pat gali būti išskirta į 3 pagrindinius ruožus:

- $1 \leq ET \leq 4$ – Išskirtinių taškų kiekis sparčiai auga, tačiau kiekis nėra didelis;
- $4 \leq ET \leq 10$ – pokytis stabilizuojasi, ir pasiekia optimalų kiekį prie ET esant lygiam 10;
- $10 \leq ET \leq 30$ – laikosi stabilus maksimalus aptinkamų išskirtinių taškų kiekis.



19 pav. Rastų išskirtinių taškų kiekio priklausomybė nuo kraštinės perimetro ribinės vertės

Vien tik aptikti vaizde esančius išskirtinius taškus nėra informatyvu. Pagrindinis rodiklis, nusakantis ar detektorius sugeba efektyviai ir kiekybine prasme gausiai analizuoti duotą vaizdą, parodo sutaptintų taškų skaičius. Panašiu metodu atliekamas patikrinimas sutaptintų taškų kiekiui patikrinti kintant abiem algoritmo parametrams.

Kadangi išskirtinių taškų sutapdinimas yra vykdomas COLMAP programine įranga, rastos priklausomybės, patikrinamos sutapdinant vaizdus ir stebint sutapties kiekį. Parametrų koeficientai tikrinami vadovaujantis aukščiau apibrėžtais šių parametrų verčių ruožais. Gauti rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Išskirtinių taškų kiekio, bei sutapdintų taškų skaičius priklausomai nuo kontrasto parametro ribinės vertės.

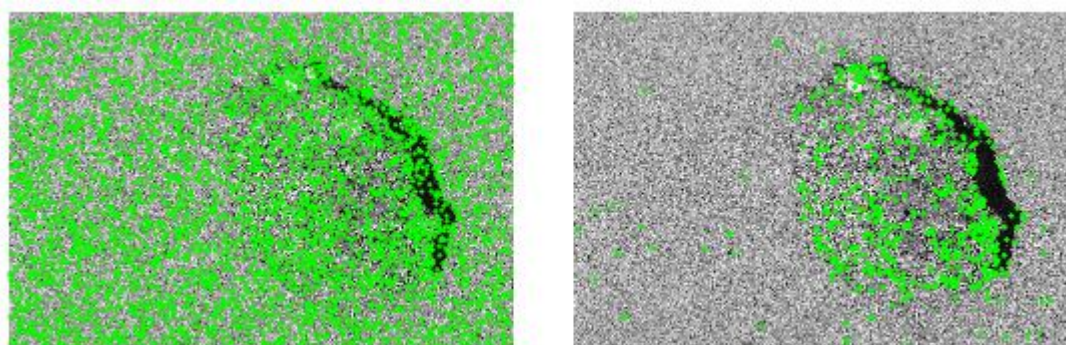
CT parametro vertė	Atpažinti taškai	Sutapdinti taškai	Santykis (%)
0.0001	9978	5799	58.12
0.007	9611	5816	60.51
0.01	8545	5012	58.65
0.015	4533	2354	51.93

6 lentelė. Išskirtinių taškų kiekio, bei sutapdintų taškų skaičius priklausomai nuo kraštinės parametro ribinės vertės.

ET parametro vertė	Atpažinti taškai	Sutapdinti taškai	Santykis (%)
1	0	0	0
3	6542	3658	55.92
5	8851	5266	59.50
10	9639	5829	60.47

Pagal aukščiau pateiktas lenteles sprendžiama, kad atpažintinių taškų kiekio priklausomybė nuo SIFT algoritmo parametrų, skaičiuota MATLAB programinio paketo aplinkoje, yra teisinga. Palyginus sutapdintų taškų ir visų atpažintų taškų skaičiaus santykį, nustatytos optimalios algoritmo vertės. Nors CT parametrui esant 0.0001, atpažintų taškų kiekis įgyja didžiausią vertę, didesnė visų taškų dalis yra neinformatyvi. Taip pat ir ET parametro atveju, optimaliausia parametro verte renkama ta vertė, turinti didžiausią sutapties santykį. 7 lentelėje pateikiamos parametrų vertės yra vertės, kuriomis gautas geriausias sutapdinimo rezultatas.

Taip pat pastebėta, jog augant CT parametro vertei yra nebeatpažįstami kelio dangos paviršiaus išskirtiniai taškai. Tai yra paaiškinama mažo kontrastingumo detalėmis būdinga asfalto danga. Šios informacijos praradimas apie žemės paviršiaus plokštumą yra negalimas, kadangi plokštuma yra reikalinga rekonstruoto modelio posūkio korekcijai ir nulinio laipsnio paieškai. Taip pat prarandama informacija apie šešėlyje esantį paviršių. Žemiau pateiktame paveikslėlyje pateikta išskirtinių taškų pozicijos esant optimaliems parametrų ir išderinus sistemą.



20 pav. Kairėje – sutapdinti išskirtiniai taškai, kai parametrai yra tinkami; dešinėje – kai parametrai nėra tinkami

7 lentelė. SIFT detektoriaus standartiniai ir optimalūs parametrai

Parametras	SIFT standartinė vertė	Optimali vertė
Kontrasto ribinė vertė	0.0133	0.007
Kraštinės ribinė vertė	10	10

3.2. Kalibracijos tikslumas

Šiame poskyryje pateikti rezultatai atliktų matavimų pagal pagamintą dirbtinę formą, skirtą imituoti duobės rekonstrukciją. Šio bandymo tikslas yra nustatyti atliekamų trimačio modelio matavimų patikimumą analizuojant objektą, kurio visi matmenys yra patikrinami išmatuojant jų dydžius realiomis sąlygomis liniuote. Bandymo metodika plačiau aprašyta 2.4 poskyryje. Matavimai atliekami objektą stebint iš keturių skirtingų pusių (lentelėje numeruojama nuo 1 iki 4) ir stebimas paklaidos tarp tikrojo ir išmatuoto, pagal rekonstruotą modelį, dydžių pokytis. Stebimi visi keturi darbe aprašyti rekonstrukcijos kokybiniai dydžiai:

- Duobės perimetras;
- Duobės paviršiaus plotas;
- Duobės tūris;
- Duobės maksimalus gylis;
- Duobės vidutinis gylis.

8 lentelė. Šablono matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais

Nr.	Perimetras (cm)			Paviršiaus plotas (cm ²)			Tūris (cm ³)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Tikras	Išmatuota	Paklaida	Tikras	Išmatuotas	Paklaida (%)
1	40.8	37,6	-7.8	132.7	122.3	-7.8	265.4	241.2	-9.1
2		43.5	6.6		141.45	6.6		286.92	8.9
3		37,8	-7.3		122.9	-7.4		239.9	-9.6
4		38,3	-6.1		124.6	-6.1		239.4	-9.8

9 lentelė. Šablono matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais

Nr.	Maksimalus gylis (cm)			Vidutinis gylis (cm)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)
1	2	1.95	-2.5	2	1.90	-5.0
2		1.99	-0.5		1.98	-1.0
3		1.96	-2		1.93	-3.5
4		2.02	1		1.98	-1.0

8 lentelėje pateikti perimetro, paviršiaus ploto, bei tūrio matavimai. Atsižvelgiant į tai, kad cilindro formos duobės diametras yra lygus 13cm, o gylis 2cm, didžiausia užfiksuota perimetro matavimo paklaida yra lygi 7,8%, kas reiškia 3.2 cm nuokrypį nuo tikrosios vertės. Mažiausia perimetro matavimo paklaida lygi 6.1% ir tai yra lygu 2.5cm neatitikimui. Dėl pasirinktos paviršiaus ploto skaičiavimo technikos, šio dydžio matavimo paklaidos sutampa su perimetro matavimuose stebėtomis paklaidomis. Didžiausia matavimo paklaida gauta skaičiuojant trimačio modelio tūrį (9.8%). Mažiausia tūrio matavimo paklaida lygi 8.9%, kas reiškia 23.6cm³ nuokrypį nuo tikrojo dydžio.

9 lentelėje pateiktos gylio matavimo išmatuotos vertės. Čia didžiausia paklaida fiksuota matuojant vidutinio gylio dydį ir yra 5% arba 0.1cm nuokrypis. Mažiausias vidutinio gylio nuokrypis yra 1%, o tai yra 0,02cm. Sulyginus maksimalaus ir vidutinio gylio išmatuotas vertes, nustatyta, kad maksimalaus dydžio matavimo vertės nukrypsta nuo tikrojo matmens daugiausiai per 0.05cm. Perimetro, bei gylio matavimus galima išskirti į horizontaliąją, bei vertikaliją trimačio modelio analizę. Pagal šiuos duomenis, rekonstrukcijos tikslumas vertikaliją ašimi yra beveik dvigubai tikslesnis už horizontalios ašies modelio taškų matavimus. Tai gali būti įtakojama kameros lęšio vaizdo iškraipymo, bei kameros pasisukimo kampo objekto atžvilgiu. Vidutinės matavimų paklaidos pateiktos 10 – oje lentelėje.

10 lentelė. Vidutinės matuojamų dydžių paklaidos

Matuojamas dydis	Vidutinė paklaida (%)
Perimetras	6,95
Paviršiaus plotas	6,95
Tūris	9.35
Vidutinis gylis	2.62
Maksimalus gylis	1.5

3.3. Išskirtinių taškų įtaka rekonstrukcijai

Šioje tyrimo dalyje analizuojami trimatės rekonstrukcijos tikslumo požymiai pagal 2.2. skyriuje aprašytus kokybinius kriterijus. Dėl galimų tikrų tyrimui atlikti naudotų kelio duobių paviršiaus ploto, bei tūrio matavimo netikslumų, paklaida nuo tikrojo dydžio šiems matavimams nėra skaičiuojama. Vietoj jos, kiekviena duobė fotografuota dvejose skirtingose pozicijose ir lyginama yra šių modelių rekonstrukcijų sutaptis. Lentelėje pateikiama mažiausia gauta vertė, bei skirtumas tarp šių dviejų matavimų išreikštas procentais.

Vadovaujantis nustatytomis SIFT detektoriaus parametrų priklausomybėmis, šiam bandymui pasirinktos trys matavimo grupės:

Pirmoji – bandyme naudojami standartiniai SIFT detektoriaus parametrų dydžiai;

Antroji – bandyme naudojami blogai parinkti SIFT detektoriaus parametrų dydžiai;

Trečioji – bandyme naudojami optimalūs SIFT detektoriaus parametrų dydžiai;

Išskirtinių taškų detektoriaus parametrus nustačius pagal jų standartines vertes, gautos rezultatų paklaidos yra kiek didesnės, nei 3.2. skyriuje gautos vertės. Perimetro matavimo didžiausias nuokrypis gautas 9.4%, tačiau maksimalaus gylio matavimai išlieka tikslesni ir maksimalus nuokrypis lygus tik 3%. Vidutinio gylio maksimali paklaida lygi 7.2%, tačiau šio dydžio nuokrypis yra įtakojamas realaus matavimo netikslumų. Palyginus dviejų kameros pozicijų modelius, tūrio, bei paviršiaus ploto skaičiavimai išlieka pakankamai tikslūs rekonstruojant ir realias kelio duobes. Rezultatai pateikiami 11 ir 12 lentelėse (numeracija atitinka duobės numerį).

11 lentelė. Matavimų rezultatai su standartiniais SIFT parametrais

Nr.	Perimetras (cm)			Paviršiaus plotas (cm ²)			Tūris (cm ³)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Min. Išmatuota	Maks. Išmatuota	Paklaida (%)	Min. Išmatuota	Maks. Išmatuota	Paklaida (%)
1	148.0	160.3	8.3	1369.0	1378.6	0.7	2738.0	2784.5	1.7
2	165.0	178.4	8.1	1701.6	1723.7	1.3	3403.1	3467.8	1.9
3	132.0	121.6	-7.9	1075.9	1089.0	-1.2	2138.8	2178.0	-1.8
4	140.0	152.0	8.6	1225.0	1243.4	1.5	2450.0	2503.9	2.2
5	108.0	97.8	-9.4	721.0	729.0	-1.1	1431.8	1451.0	-1.8

12 lentelė. Matavimų rezultatai su standartiniais SIFT parametrais

Nr.	Maksimalus gylis (cm)			Vidutinis gylis (cm)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)
1	5.0	5.2	3.0	3.5	3.7	6.2
2	6.0	6.2	2.8	4.5	4.8	6.8
3	4.0	3.9	-2.2	3.5	3.3	-5.9
4	5.0	5.1	1.9	4.0	4.3	7.1
5	6.0	5.9	-2.0	5.0	4.7	-6.5

SIFT parametrus nustačius taip, kad sutaptintų išskirtinių taškų skaičius būtų nedidelis, gautos daugiau, nei per pus didesnės matavimų paklaidos. Maksimalaus gylio paklaida, kai kurių objektų sąlyga, išlieka maža. Tai paaiškinama mažu išskirtinių taškų kiekiu ir tikimybe, kad išskirtinis taškas bus aptiktas žemiausioje duobės vietoje. Tūrio, bei paviršiaus ploto matavimų suliginimas tarp dviejų skirtingų kameros pozicijos modelių išlaiko nedidelę sutapties paklaidą, tačiau yra kiek didesnės. Rezultatai pateikiami 13 ir 14 lentelėse.

13 lentelė. Matavimų rezultatai su blogai parinktais SIFT parametrais

Nr.	Perimetras (cm)			Paviršiaus plotas (cm ²)			Tūris (cm ³)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Min. Išmatuota	Maks. Išmatuota	Paklaida (%)	Min. Išmatuota	Maks. Išmatuota	Paklaida (%)
1	148.0	122.1	-17.5	1319.0	1334.8	1.2	2638.0	2685.5	1.8
2	165.0	133.2	-19.3	1628.4	1651.6	-1.4	3330.5	3203.1	-2.2
3	132.0	112.9	-14.5	1039.0	1050.4	1.1	2078.0	2117.5	1.9
4	140.0	114.7	-18.1	1175.0	1195.0	1.7	2350.0	2408.8	2.5
5	108.0	85.1	-21.2	668.8	679.0	-1.5	1332.2	1358.0	-1.9

14 lentelė. Matavimų rezultatai su blogai parinktais SIFT parametrais

Nr.	Maksimalus gylis (cm)			Vidutinis gylis (cm)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)
1	5.0	5.3	6.1	3.5	3.8	8.4
2	6.0	5.7	-4.3	4.5	4.2	-7.5
3	4.0	4.2	5.1	3.5	3.9	10.1
4	5.0	5.2	3.8	4.0	4.3	8.1
5	6.0	5.8	-3.3	5.0	4.5	-9.6

SIFT detektoriaus parametrus nustačius pagal nustatytas optimalias vertes atlikti matavimai parodė, kad perimetro automatinio matavimo, pagal trimatį duobės modelį, maksimalus nuokrypis nuo realiai išmatuoto dydžio skiriasi 7.2%. Mažiausias nuokrypis lygus 6.3%, o tai yra apie 10cm netikslumas. Maksimalus duobės gylis išmatuotas su didžiausia – 3% paklaida, o matuojant vidutinį duobės gylį, didžiausias nuokrypis yra 7%. Paviršiaus ploto matavime, sulyginus du, skirtingų kameros pozicijų modelius, didžiausias neatitikimas tarp jų lygus 1.5%. Tūrio, kiek daugiau – 2.3%. Sulyginus gautus rezultatus su dirbtinio duobės modelio rezultatais, galima teigti, kad esamos paklaidos yra patenkinamose ribose. Lyginant su gautais rezultatais, naudojant standartinius SIFT parametrus, matavimų paklaida yra mažesnė, kai matuojama nustačius optimalius parametrus.

15 lentelė. Matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais

Nr.	Perimetras (cm)			Paviršiaus plotas (cm ²)			Tūris (cm ³)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Min. Išmatuota	Maks. Išmatuota	Paklaida (%)	Min. Išmatuota	Maks. Išmatuota	Paklaida (%)
1	148.0	137.3	-7.2	1363.0	1374.0	-0.8	2695.8	2748.0	-1.9
2	165.0	175.4	6.3	1707.6	1728.1	1.2	3415.1	3476.6	1.8
3	132.0	141.0	6.8	1086.0	1102.3	1.5	2172.0	2217.6	2.1
4	140.0	150.5	7.5	1229.0	1242.5	1.1	2458.0	2504.7	1.9
5	108.0	116.0	7.4	731.0	737.6	0.9	1462.0	1495.6	2.3

16 lentelė. Matavimų rezultatai su optimaliais SIFT parametrais

Nr.	Maksimalus gylis (cm)			Vidutinis gylis (cm)		
	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)	Tikras	Išmatuota	Paklaida (%)
1	5.0	4.9	-2.4	3.5	3.3	-6.3
2	6.0	6.2	2.6	4.5	4.8	6.8
3	4.0	4.1	1.7	3.5	3.7	6.7
4	5.0	5.1	2.2	4.0	4.3	7.0
5	6.0	6.2	3.0	5.0	5.3	6.7

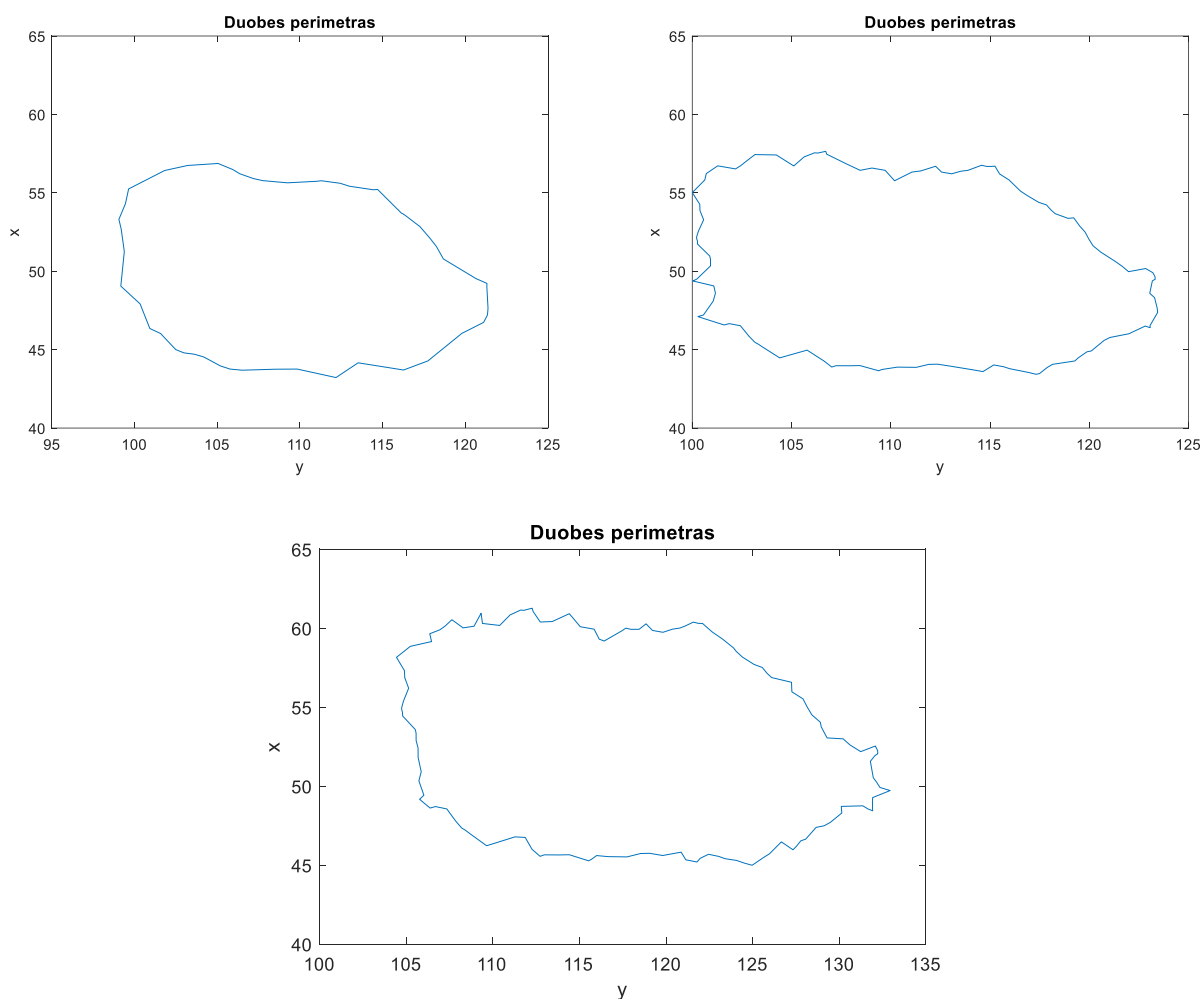
17 lentelėje pateiktos vidutinės matavimų paklaidos esant trimis skirtingais būdais aprašytiems SIFT algoritimų parametrams. Rasti optimalūs parametrai šiek tiek sumažina matavimo gautą paklaidą lyginant su detektoriumi turinčiu standartinės parametru vertes. Didžiausias pokytis matomas

perimetro matavime. Tai paaiškinama didesne išskirtinių taškų gausa, bei tiksliau nustatytomis kelio duobės formomis XY ašių atžvilgiu.

17 lentelė. Vidutinės matavimų paklaidos

Matuojamas dydis	Vidutinė paklaida (%)		
	Standartinis	Blogas	Optimalus
Perimetras	8.6	18.1	7.0
Paviršiaus plotas	1.2	1.4	1.1
Tūris	1.9	2.1	2.0
Maksimalus gylis	2.5	4.5	2.4
Vidutinis gylis	6.6	8.7	6.7

Žemiau pateiktuose grafikuose nurodyti duobių perimetrų aptikti kontūrai. Pagal vaizdą grafikuose ir duomenis gautus matavimų metu, nustatyta, kad parinkus netinkamus SIFT išskirtinių taškų detektoriaus parametrus, perimetro matavimo rezultatai turi didžiausią pokytį. Neaptikus pakankamai išskirtinių taškų, objekto dydis, bei forma, neatitinka tikrojo objekto. Sulyginus standartinių parametrų ir optimalių parametrų rezultatus, matoma, kad pastaraisiais parametrais rekonstruotas objektas yra detalesnis, bei labiau atitinka išmatuotus dydžius.



21 pav. Viršus: kairėje – perimetras, kai parametrai yra blogi, dešinėje – parametrai standartiniai; apačioje – nauji parametrai

Rezultatai ir išvados

1. Apžvelgta esama mokslinė literatūra nagrinėjanti SIFT išskirtinių taškų aptikimo algoritmo parametrų įtaką. Nustatyti pagrindiniai, didžiausią įtaką turintys SIFT išskirtinių taškų aptikimo algoritmo parametrai: kontrasto ribinės vertės (angl. *contrast threshold*) ir kraštinės aptikimo ribinės vertės (angl. *edge threshold*) parametrai.
2. Įvertinus literatūroje rastus darbus, nustatyti šie rekonstrukcijos tikslumui įvertinti skirti dydžiai: perimetro, duobės paviršiaus ploto, maksimalaus duobės gylio, vidutinio duobės gylio, bei tūrio matmenų dydžiai.
3. Geriausi užduoties rezultatai stebėti, kai SIFT detektoriaus kontrasto ribinė vertė – 0.007, o kraštinės ribinė vertė – 10.
4. Lyginant su kitais matavimais, tūrio matavimo paklaida yra didžiausia. Esant optimaliems SIFT nustatymams, lyginant su realiai išmatuota verte ji siekė 9.35% neatitikimą. Tiksliausiai įvertintas gylio matmuo, kurio vidutinė paklaida 2.62%.
5. Nustatyta, kad optimaliais SIFT parametrais gautos rekonstrukcijos perimetro matavimo vid. paklaida yra 1.6% mažesnė, lyginant su standartiniais SIFT parametrais gauta rekonstrukcija. Gylio matavime nestebėtas reikšmingas pokytis tarp standartinių ir optimalių nustatymų. Paklaidų skirtumas tarp blogų ir optimalių SIFT parametrų rekonstrukcijų perimetro matavime lygus 11.1%. Blogais SIFT parametrais matuota maksimalaus gylio vidutinė paklaida išauga iki 4.5%, optimaliais - 2.4%.

Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS AUTOMOBILIŲ KELIŲ DIREKCIJA. Lietuvos automobilių kelių direkcijos, 2021m. šešių mėnesių veiklos ataskaita. [žiūrėta 2022 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <https://governance.lt/wp-content/uploads/2020/09/lakd-2021-06.pdf>
2. AMERIKOS AUTOMOBILIŲ ASOCIACIJA. Pothole Damage Costs Drivers \$3 Billion Annually Nationwide. [žiūrėta 2022 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <https://news.aaacalif.com/news/pothole-damage-costs-drivers-3-billion-annually-nationwide>
3. PHYSICS. The Camera Obscura. LibreTexts. [žiūrėta 2022 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/BSc_Optics_\(Konijnenberg_Adam_and_Urbach\)/03%3A_Optical_Instruments/3.02%3A_The_Camera_Obscura](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/BSc_Optics_(Konijnenberg_Adam_and_Urbach)/03%3A_Optical_Instruments/3.02%3A_The_Camera_Obscura)
4. EHAB Salahat, Murad QASIMEH. Recent Advances in Features Extraction and Description Algorithms: A Comprehensive Survey. 2017. *18th International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Ontario, Canada. Prieiga per doi:10.1109/ICIT.2017.7915508.
5. GBASHI, Ekhlās & SALEH, S.M. Scale-invariant feature transform algorithm with fast approximate nearest neighbor. *Baghdad Science Journal*. 2017, vol. 14, p. 651-661. Prieiga per doi: 10.21123/bsj.2017.14.3.0651.
6. MERIAMA Mahamdioua. Automatic adaptation of SIFT for robust facial recognition in uncontrolled lighting conditions. 2018. *IET Computer Vision 12(5)*. Prieiga per doi: 10.1049/iet-cvi.2017.0190.
7. KENJI Hata, Silvio SAVARESE. CS231A Course Notes 1: Camera Models. [žiūrėta 2022 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: https://web.stanford.edu/class/cs231a/course_notes/01-camera-models.pdf
8. HEDIVISION. Pinhole Camera Model. [žiūrėta 2022 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internet: <https://hedivision.github.io/Pinhole.html>
9. RICHARD Hartley, Andrew ZISSERMAN. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003. Prieiga per doi:10.1017/CBO9780511811685
10. ADEEL Ahmed, et al. Pothole 3D Reconstruction With a Novel Imaging System and Structure From Motion Techniques. 2022. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 5, p. 4685-4694. Prieiga per doi: 10.1109/TITS.2021.3054026.
11. GEORG Klein, David MURRAY. Parallel Tracking and Mapping on a Camera Phone. 2009. *8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, p. 83-86. Prieiga per doi:10.1109/ISMAR.2009.5336495.
12. MUHAMMAD Uzair Ul Haq, et al. Based 3D Reconstruction of Potholes by a Hybrid, Dense Matching Scheme. 2019. *IEEE Sensors Journal* p. 1-1. Prieiga per doi:10.1109/JSEN.2019.2898375.
13. TRUMAN Shen, Gregory SCHAMP, Mario HADDAD. Stereo vision based road surface preview. 2014. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*: 1843-1849. Prieiga per doi: 10.1109/ITSC.2014.6957961
14. RUI Fan. Pothole Detection Based on Disparity Transformation and Road Surface Modeling. 2019. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, p. 897-908. Prieiga per doi: 10.1109/TIP.2019.2933750.

15. PIX4D. *Reprojection error*. [žiūrēta 2022 m. gegužēs 20 d.]. Prieiga per internet: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-error>
16. SCHONBERGER Johannes, Johannes LUTZ, Frahm JAN-MICHAEL. Structure-from-Motion Revisited. 2016. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Prieiga per doi: 10.1109/CVPR.2016.445.
17. SCHONBERGER Johannes, Johannes LUTZ, Frahm JAN-MICHAEL. Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. 2016. *European Conference on Computer Vision*. Prieiga per doi: 10.1007/978-3-319-46487-9_31.
18. MATTIA Lecci, Simone MILANI. 3D Reconstruction From Web Harvested Images using A Forensic Quality Metric. 2010. *11th European Conference on Computer Vision*, Graikija. Prieiga per doi: 10.1007/978-3-642-15549-9_53.
19. XU Zhao, et al. A New Metric for Measuring Image-based 3D Reconstruction. 2012. *Pattern Recognition (ICPR), 21st International Conference*, p.1030 – 1033, Japonija. [žiūrēta 2022 m. gegužēs 20 d.]. Prieiga per internetu: <https://projet.liris.cnrs.fr/imagine/pub/proceedings/ICPR-2012/media/files/2365.pdf>
20. ELIF Vural, Aydn ALATAN. Outlier Removal For Sparse 3d Reconstruction From Video. 2008. *3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video*, pp. 341-344 Prieiga per doi: 10.1109/3DTV.2008.4547878.
21. TAI Meng, Alireza ENTEZARI. Visual Comparability of 3D Regular Sampling and Reconstruction. 2011. *IEEE Trans Vis Comput Graph*. Prieiga per doi: 10.1109/TVCG.2010.234
22. MARGARET Witherspoon. Assessment of Image Quality with a Fast Fully 3D Reconstruction Algorithm. 2001. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, p. 2238-2242 vol.4. Prieiga per doi: 10.1109/NSSMIC.2001.1009269.
23. D. N. Brito, et al. Evaluation of Interest Point Matching Methods for Projective Reconstruction of 3D Scenes. 2016. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 3, p. 1393-1400. Prieiga per doi: 10.1109/TLA.2016.7459626.
24. GUOXIANG Zhang, YangQuan CHEN. A Metric For Evaluating 3d Reconstruction And Mapping Performance With No Ground Truthing. 2021. [žiūrēta 2022 m. gegužēs 20 d.]. Prieiga per doi: 10.48550/arXiv.2101.10402
25. CHRISTIAN Beder, Richard STEFFEN. Determining an initial image pair for fixing the scale of a 3d reconstruction from an image sequence. 2006. *Pattern Recognition, 28th DAGM Symposium*, Vokietija. Prieiga per doi: 10.1007/11861898_66.
26. KHALED R. Ahmed. Smart Pothole Detection Using Deep Learning Based on Dilated Convolution. 2021. [žiūrēta 2022 m. gegužēs 20 d.]. Prieiga per doi: 10.3390/s21248406.
27. SERGIY Skuratovskyi, et al. Outdoor Mapping Framework: from Images to 3D Model. 2019. *Signal Processing Symposium (SPSymposium)*, p. 296-399. Prieiga per doi: 10.1109/SPS.2019.8882019.
28. ANDREA Lingua, Davide MARENCHINO, Francesco NEX. Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications. 2009. [žiūrēta 2022 m. gegužēs 20 d.]. Prieiga per doi: doi: 10.3390/s90503745

Priedai

1 priedas. Matlab programos kodas. SIFT parametrų analizė.

```
global ContrastTh; global EdgeTh; global NumLayer; global Sigma;
nLength = 1;
ContrastTh = 0.00001;
EdgeTh = 10;
NumLayer = 4;
Sigma = 3;

frm = obj;
frm2 = obj2;
frm = rgb2gray(frm);
frm2 = rgb2gray(frm2);

for i=1:200
    [points_sift] = detectSIFTCustom(frm);
    [points2_sift] = detectSIFTCustom(frm2);

    [features1,valid_points1] = extractFeaturesCustom(frm,points_sift);
    [features2,valid_points2] = extractFeaturesCustom(frm2,points2_sift);
    indexPairs = matchFeatures(features1,features2);
    matchedPoints1 = valid_points1(indexPairs(:,1),:);
    matchedPoints2 = valid_points2(indexPairs(:,2),:);
    matchedPoints3 = matchedPoints1.Count;

    matrix_contr(i,1) = ContrastTh;
    matrix_pointC(i,1) = length(valid_points1);
    matrix_matchC(i,1) = matchedPoints3;

    ContrastTh = ContrastTh + 0.0005;
end

ContrastTh = 0.00667;
EdgeTh = 1;
clear points_sift;

for i=1:200
    [points_sift] = detectSIFTCustom(frm);
    [points2_sift] = detectSIFTCustom(frm2);

    [features1,valid_points1] = extractFeaturesCustom(frm,points_sift);
    [features2,valid_points2] = extractFeaturesCustom(frm2,points2_sift);
    indexPairs = matchFeatures(features1,features2);
    matchedPoints1 = valid_points1(indexPairs(:,1),:);
    matchedPoints2 = valid_points2(indexPairs(:,2),:);
    matchedPoints3 = matchedPoints1.Count;

    if(matchedPoints3>3450)
        matchedPoints3 = 3450;
    end

    matrix_edge(i,1) = EdgeTh;
    matrix_pointE(i,1) = length(valid_points1);
    matrix_matchE(i,1) = length(matchedPoints1);

    EdgeTh = EdgeTh + 0.15;
end

figure(1)
```

```

plot(matrix_contr, matrix_pointC)
xlabel('Kontrasto ribinis parametras');
ylabel('Rasti isskirtiniai taskai');
xlim([0.0004 0.1])
grid on;
figure(2)
plot(matrix_edge, matrix_pointE)
xlabel('krastines ribinis parametras');
ylabel('Rasti isskirtiniai taskai');
xlim([0 30])
grid on;
figure(3)
plot(matrix_contr, matrix_matchC)
xlabel('Kontrasto ribinis parametras');
ylabel('Sutapdinti isskirtiniai taskai');
figure(4)
plot(matrix_edge, matrix_matchE)
xlabel('krastines ribinis parametras');
ylabel('Sutapdinti isskirtiniai taskai');

```

2 priedas. Matlab programos kodas. Rekonstrukcijos analizė.

```

[cameras, images, points3D] = read_model(path)

keys = images.keys;
camera_centers = zeros(images.length, 3);
view_dirs = zeros(3 * images.length, 3);
for i = 1:images.length
    image_id = keys{i};
    image = images(image_id);
    camera_centers(i,:) = -image.R' * image.t;
    view_dirs(3 * i - 2,:) = camera_centers(i,:);
    view_dirs(3 * i - 1,:) = camera_centers(i,:) + image.R' * [0; 0; 0.3];
    view_dirs(3 * i,:) = nan;
end

keys = points3D.keys;
xyz = zeros(points3D.length, 3);
for i = 1:points3D.length
    point_id = keys{i};
    point = points3D(point_id);
    xyz(i,:) = point.xyz;
end

cameraPOS=[5.052,-0.018,-0.114;-0.114,-0.182,0.016;-4.938,0.204,0.012];
ptCloud = [pointCloud(xyz)];

maxDistance = 0.2;
referenceVector = [0,0,1];
maxAngularDistance = 20;

[model1,inlierIndices,outlierIndices] = pcfitplane(ptCloud,...
    maxDistance,referenceVector,maxAngularDistance);
plane1 = select(ptCloud,inlierIndices);
remainPtCloud = select(ptCloud,outlierIndices);

Angle_Z1 = plane1.ZLimits(:,1);
Angle_Z2 = plane1.ZLimits(:,2);
Angle_Y1 = plane1.YLimits(:,1);

```



```

Angle_Y2 = plane1.YLimits(:,2);

slope = (Angle_Y2 - Angle_Y1) ./ (Angle_Z2 - Angle_Z1);
angle = atand(slope)
theta = 1*angle*pi/180;

rot = [1      0      0; ...
       0      cos(theta)  -sin(theta); ...
       0      sin(theta)   cos(theta)];

trans = [0, 0, 0];
tform = rigid3d(rot,trans);
ptCloudOut = pctransform(ptCloud,tform);
XYZ_Cloud = ptCloudOut.Location;
Z_Cloud = ptCloudOut.Location(:,3);

u=0;
clear XYZ_Cloud2;
for i=1:length(Z_Cloud)
    if(XYZ_Cloud(i,3)<-51.7)
        u = u + 1;
        XYZ_Cloud2(u,:) = XYZ_Cloud(i,:)+51.7;
    end

X_Cloud = XYZ_Cloud2(:,1);
Y_Cloud = XYZ_Cloud2(:,2);
Z_Cloud = XYZ_Cloud2(:,3);
XY_bound = boundary(X_Cloud, Y_Cloud);
XYZ_bound = boundary(X_Cloud, Y_Cloud, Z_Cloud);

x_bond = X_Cloud;
y_bond = Y_Cloud;
k = boundary(x_bond,y_bond,1);
Xb=x_bond(k);
Yb=y_bond(k);
figure(4)
plot(Yb,Xb);
title('Duobes perimetras');
xlabel('y');
ylabel('x');
ylim([40 65])
pointsXY=[Xb Yb];
Perimeter = 0;

for i = 1:size(pointsXY, 1)-1
    Perimeter = Perimeter + norm(pointsXY(i, :) - pointsXY(i+1, :));
end

Perimeter = Perimeter + norm(pointsXY(end, :) - pointsXY(1, :));
Area=polyarea(Xb,Yb)
Depth_max = max(Z_Cloud) - min(Z_Cloud)
Depth_avg = mean(Z_Cloud)
XYZ_Zero = XYZ_Cloud2;
XYZ_Zero(:,3) = [0];
XYZ_SUM = [XYZ_Cloud2;XYZ_Zero];

Shape3D = alphaShape(XYZ_SUM, 'HoleThreshold',15);
figure(5)
plot(Shape3D)
title('3D rekonstrukcija turio skaiciavimui');
xlabel('x');
ylabel('y');

```

```
zlabel('z');
Vol = volume(Shape3D)

pointA = [-1.287;-4.437;74.041];
pointB = cameraPOS(:,2);
Cam_dist = sqrt(sum((pointA - pointB).^2));

pointA2 = [-0.0409;-11.9565;12.552];
pointB2 = [0.05;-11.9278;12.8883];
Point_dist = sqrt(sum((pointA2 - pointB2).^2));
Coffset = 2.2
Calib = (895-55)/Cam_dist-Coffset;
Distance = Calib * Point_dist
```